

LOS USOS DEL SUELO EN LA GESTIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS MEDIANTE SISTEMAS DE TELEDETECCIÓN

Miguel POZO DE CASTRO*

(*) Director Técnico en la Secretaría de Estado de Aguas y Costas
Ministerio de Medio Ambiente. Pza. San Juan de la Cruz, s/n. 28071 Madrid

RESUMEN

En el texto se recogen las experiencias derivadas del desarrollo del estudio denominado “Obtención de información medioambiental básica para una gestión racional de los recursos hídricos mediante teledetección”, iniciado en 1995 por el entonces MOPTMA, hoy MIMAM.

El estudio tiene por objetivo identificar los cambios registrados en el territorio español, durante la última década, en los usos y ocupaciones del suelo que guardan más estrecha relación con la gestión de los recursos hídricos. El objetivo es doble, por cuanto persigue, no tanto detectar la variabilidad espacial y sus especificidades más destacables, como su evolución temporal reciente. En este sentido es del máximo interés analizar, entre otros aspectos, el comportamiento de la cobertura vegetal en dicho período (áreas agrícolas, masas boscosas y de vegetación natural, espacios con nula o escasa vegetación, etc), así como de los humedales y láminas de agua.

En particular, merece la pena destacar la importancia de cuantificar la evolución de la superficie regada. En efecto, este interés radica en que, primero, es un indicador de la demanda de agua para regadío y, segundo, constituye una fuente de información adicional de gran valor para poder contrastar otras bases estadísticas disponibles en relación con esta materia, elaboradas a partir de metodologías muy diferentes.

Las fechas seleccionadas para analizar el período de estudio corresponden, por razones tanto de oportunidad como de complementariedad con otras informaciones disponibles (proyecto Corine Land Cover, 1987), a los años 1984, 1991 y 1995.

Las repercusiones de la ocupación del suelo sobre las fases del ciclo hidrológico y la importancia que pueden llegar a tener en el balance hídrico de un territorio son evidentes. Estos efectos se pueden manifestar sobre sus diversos componentes, tanto en términos cuantitativos absolutos, como en términos de su distribución temporal. La teledetección centra su atención

en la fase terrestre del ciclo, escenario en el que se desarrollan algunos de los más importantes efectos medioambientales, cuyo origen descansa frecuentemente en las alteraciones del balance hídrico inducidas por cambios en el sistema suelo-vegetación.

INTRODUCCIÓN

La ordenación y gestión de los recursos hídricos constituye un componente clave, tanto en los procesos de toma de decisiones en materia de gestión medioambiental como en los análisis de estrategias territoriales.

Esto es así fundamentalmente por dos razones: primero, por los evidentes efectos espaciales que traen consigo determinadas utilidades del agua y su entorno; baste citar, por ejemplo, los derivados de la implantación de una zona regable o de la delimitación del perímetro de protección de un humedal. Segundo, y en sentido inverso, por la gran influencia que tiene la ocupación del suelo y, en general, del marco natural donde se desenvuelven las actividades económicas, sobre los procesos que dan lugar a la generación de los recursos hídricos, así como en la demanda final de éstos. Cabe mencionar en este sentido los cambios provocados por una nueva zona de cultivos o la urbanización de unos terrenos en las diversas fases que componen el ciclo hidrológico (modificación de la evapotranspiración y del régimen de escorrentías, entre otros).

Esta fuerte interdependencia convierte a la gestión de los recursos hídricos en un factor estratégico de primer orden en el plano territorial, y muestra la necesidad de tener presente estas interrelaciones de cara a efectuar dicha gestión de una manera racional y sostenible. Pero este objetivo último sólo puede alcanzarse a partir del conocimiento preciso de las principales características del medio físico, que configuran o condicionan el comportamiento hidrológico del territorio y, en definitiva, los procesos que tienen lugar en las cuencas fluviales. Se requiere, por tanto, disponer de cierta información básica que permita cuantificar los parámetros más relevantes al respecto.

Conforme a los criterios expuestos, la Dirección General de Planificación Territorial del MOPTMA inició en Octubre de 1995 la realización del estudio denominado "Obtención de información medioambiental básica para una gestión racional de los recursos hídricos, mediante teledetección". Fue formalizado en contrato con la empresa INISEL ESPACIO, S.A. (hoy en día INDRA ESPACIO, S.A.), figurando como subcontratistas las empresas AURENSA e INTA y contando para su financiación con una ayuda del 100% del Fondo de Cohesión. A partir de Mayo de 1996, las funciones de la citada Dirección General fueron asumidas por la Secretaría de Estado de Aguas y Costas, perteneciente al recientemente creado Ministerio de Medio Ambiente.

DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Objeto del Estudio

El estudio tiene por objeto central identificar los cambios registrados en el territorio español,

durante la última década, en los usos y ocupaciones del suelo que guardan más estrecha relación con la gestión de los recursos hídricos. El objetivo es doble, por cuanto persigue, no tanto detectar la variabilidad espacial y sus especificidades más destacables, como su evolución temporal reciente. Entre otros aspectos es de la máxima importancia analizar el comportamiento de la cobertura vegetal en dicho período (áreas agrícolas, con especial detalle sobre la evolución de la superficie regada, masas boscosas y de vegetación natural, espacios con nula o escasa vegetación, etc.), así como de los humedales y láminas de agua.

En particular, merece la pena destacar la importancia de cuantificar la evolución de la superficie regada. En efecto, aparte de los objetivos generales del trabajo, este interés radica en que, primero, es un indicador de la demanda de agua para regadío y, segundo, constituye una fuente de información adicional de gran valor para poder contrastar otras bases estadísticas disponibles en relación con esta materia, elaboradas a partir de metodologías muy diferentes. No es preciso insistir en la utilidad que tiene para la planificación hidrológica diagnosticar el comportamiento del sector en cada territorio.

Las fechas seleccionadas para analizar el período de estudio corresponden, por razones tanto de oportunidad como de complementariedad con otras informaciones disponibles (proyecto Corine Land Cover, 1987), a los años 1984, 1991 y 1995, sobre la base de una sola escena para cada uno de ellos. No obstante, las especificidades del Suroeste y Levante españoles en relación con la utilización de los recursos hídricos, de sobra conocidas pero de nuevo puestas de manifiesto con claridad durante la ejecución del trabajo, aconsejaron cambiar ligeramente para estas zonas la metodología prevista inicialmente para toda España. Este cambio consistió en la ampliación del número de escenas tratadas, a fin de mantener un nivel de precisión similar en toda la superficie nacional.

Sin embargo, el principal interés del presente proyecto radica quizás en que reporta un fondo documental de primera magnitud (no sólo por su propia tipología sino más bien por su extensión temporal y espacial), lo que le confiere un marcado carácter instrumental cuyo tratamiento y explotación, sin duda, permitirán aplicaciones diversas desde muy diferentes ópticas. En todo caso, desde este momento, ya está a disposición de los diferentes órganos del Ministerio un importante acervo de información básica, sin duda útil para poder, por un lado, analizar el impacto territorial de políticas sectoriales como la agrícola, forestal o hidráulica, y, por otro, anticipar medidas para evitar o paliar problemas de conocida importancia en España, tales como la desertización, degradación de los suelos, sobreexplotación de acuíferos (con la consiguiente desecación de zonas húmedas, en su caso), degradación de algunos espacios naturales, etc.

Justificación del Proyecto

La razón de adoptar como objetivo central del proyecto la clasificación de los usos del suelo, radica en las repercusiones que la ocupación del suelo tiene sobre las fases del ciclo hidrológico, y en la importancia que tales repercusiones pueden llegar a tener en el balance hídrico de un territorio. Estos efectos se pueden manifestar sobre sus diversos componentes, tanto en términos cuantitativos absolutos como en términos de su distribución temporal.

Como es sabido, el agua en su recorrido a lo largo del ciclo hidrológico: precipitación,

evaporación, infiltración, evapotranspiración y escorrentía (superficial y subterránea) pasa por diferentes estados, en los cuales se producen diversos procesos que involucran flujos de intercambio y transporte de materia y energía. Las interacciones de la actividad humana con el ciclo hidrológico son muy numerosas y afectan a todas sus fases, teniendo algunas de estas interacciones una gran repercusión, tanto en los recursos finalmente generados como en las condiciones bajo las que posteriormente hay que efectuar su aprovechamiento. En este proyecto la atención se centra en la fase terrestre del ciclo, escenario en el que también se desarrollan algunos de los principales efectos medioambientales, cuyo origen descansa frecuentemente en las alteraciones del balance hídrico inducidas por cambios en el sistema suelo-vegetación (erosión causada por deforestación, modificación del nivel freático, salinización, aterramientos, etc).

En efecto, junto a otros factores como la pendiente o la rugosidad, las características de la cobertura del suelo (básicamente presencia o ausencia de vegetación), determinada en gran medida por el uso del mismo, juegan un papel esencial, aunque todavía no completamente conocido, en los fenómenos que tienen lugar en la zona de agua del suelo. En dicha zona la precipitación se divide en tres componentes principales: escorrentía superficial, recarga de aguas subterráneas y evapotranspiración.

Si bien el conocimiento de la componente de escorrentía superficial es la que tradicionalmente ha constituido el objeto principal de los estudios hidrológicos asociados a la gestión y explotación de los recursos hídricos, la creciente importancia y consideración de los valores ambientales hace que también las componentes de flujo vertical de esta fase del ciclo (infiltración, evapotranspiración, recarga, ...), reciban una atención cada vez mayor. En estos procesos, las características de la cobertura vegetal juegan un papel determinante y sus relaciones con la conservación de los ecosistemas son evidentes, debido fundamentalmente a la influencia que tienen sobre el régimen hídrico.

El conocimiento de la ocupación del suelo constituye, por esta razón, una información de gran importancia para poder predecir los efectos de las futuras actuaciones en materia de gestión de los recursos hídricos. Una clasificación de usos del suelo orientada hacia este campo ha de tender, por tanto, a la discriminación de clases que proporcionen la mayor capacidad de explicación de comportamientos, tanto por el lado puramente hidrológico, de gran influencia en la generación de la oferta, como por el de la caracterización de las demandas de agua.

La leyenda elaborada para este estudio pretende dar respuesta a este doble requerimiento. En tal sentido se han distinguido las siguientes grandes clases de uso del suelo: Superficies artificiales, Áreas agrícolas (distinguiendo entre tierras de labor en secano y cultivos de regadío, entre otras subclases), Bosque y vegetación natural, Roquedos y espacios con escasa vegetación y, finalmente, Cursos y láminas de agua. Dentro de estas cabeceras o clases de 1^{er} orden, se han considerado hasta un total de 31 subclases, en algunos casos de 3^{er} orden. Aunque no es éste el lugar para entrar en mayores detalles, quizás valga la pena recoger unos breves comentarios respecto de algunos de estos grandes usos:

Superficies artificiales. A pesar de las comparativamente pequeñas superficies involucradas, su influencia se extiende a áreas mucho mayores. Una característica hidrológica relevante de esta clase es su elevada impermeabilidad, aunque ésta puede ser muy variable. Desde el

punto de vista de sus efectos sobre los recursos, se caracteriza por producir unos impactos intensos y localizados.

Bosques. El papel de las masas forestales en el comportamiento hidrológico de las cuencas es fundamental ya que, al aumentar tanto la infiltración como la evapotranspiración, disminuye la escorrentía superficial y por tanto, los riesgos de avenidas (con caudales de punta y volúmenes menores), así como de erosión.

Zonas de regadío. La cuantificación de la superficie de esta clase de uso constituye, en primer lugar, un valioso indicador para estimar la demanda de agua. En el plano hidrológico, se caracteriza por el aumento de la evapotranspiración (puede incluso llegar a coincidir con la potencial) y, a veces, de la escorrentía, lo que produce un mayor potencial erosivo y un aumento del transporte de sedimento. Si a ésto se une el menor caudal de los cursos fluviales ocasionado por las detracciones de agua, es inmediato deducir sus posibles efectos sobre la colmatación de cauces, por depósito del sedimento. Por otro lado, los caudales efluentes de las zonas regadas registran un aumento de salinidad, entre otros agentes contaminantes que se van depositando selectivamente a lo largo de su recorrido por el subsuelo.

Roquedos y espacios con escasa vegetación. Estas superficies se caracterizan, entre otras cuestiones, por una escorrentía alta y riesgo de erosión elevado.

Cursos y láminas de agua. Esta clase refleja la extensión superficial de masas de agua, básicamente embalses, lagos y lagunas interiores. Permite, entre otros aspectos, obtener una primera idea del estado de conservación de los humedales y del grado de explotación de los acuíferos asociados, en su caso.

En relación con la tecnología adoptada, se ha escogido la teledetección, en concreto las imágenes tomadas por el satélite Landsat TM, por estimar que es la más adecuada para las características del estudio, ya que es capaz de aportar cuatro tipos de información sobre los recursos naturales, todos ellos de gran interés para estudios del territorio: información temporal (sobrevuelan la zona cada cortos períodos de tiempo, existiendo un archivo histórico), espacial (cubren grandes extensiones de terreno a un coste por hectárea relativamente bajo), espectral (los sensores captan la radiación emitida por la superficie terrestre, no sólo en la región visible del espectro sino también en la del infrarrojo) y radiométrica (los datos son codificados digitalmente, lo que permite su adecuado tratamiento informático).

En efecto, los sensores a bordo del satélite captan la energía de la radiación electromagnética reflejada o emitida por los objetos de la superficie terrestre en varias bandas de frecuencias (en número de 7 en el caso del sensor TM, Thematic Mapper, del satélite Landsat). Cada objeto se caracteriza por tener una absorción específica en cada banda espectral y por tanto una mayor o menor energía radiada o emitida. En concreto, la vegetación presenta una elevada absorción en la banda 3, debido a la demanda de energía por parte de la actividad clorofílica y, por contra, una baja absorción en la banda 4. Mediante el tratamiento de la información de estas dos bandas, pueden discriminarse las zonas de la escena que presentaban actividad clorofílica en la fecha en que fue tomada dicha imagen por el sensor. Tratamientos similares permiten identificar las superficies de agua y el resto de las clases de ocupación del suelo.

La considerable extensión del área de estudio, que abarca todo el territorio nacional, los objetivos perseguidos, unidos al plazo y presupuesto disponibles, condicionaron en gran medida la elección del satélite y sensor que mejor se adaptaba a las características del proyecto. Así, la selección del Landsat TM se basó principalmente en las siguientes razones: su resolución espacial (el tamaño del pixel es de 30x30 metros) satisfacía aceptablemente las exigencias derivadas de la escala de trabajo prevista (1:100.000); las resoluciones espectral, ya señalada, y orbital (16 días entre dos imágenes consecutivas de una misma escena) eran las que mejor permitían alcanzar el objetivo principal de identificar los usos del suelo, sin descartar otras posibles aplicaciones posteriores; y, de modo especial, el más ventajoso coste unitario que ofrece el mencionado satélite una vez satisfechos los requerimientos anteriores.

Metodología

La metodología establecida para la realización del proyecto coincide en sus rasgos generales con la habitualmente seguida en teledetección, si bien las características específicas de aquél tuvieron una gran influencia en el planteamiento de algunas de sus etapas. En síntesis fueron las siguientes:

Selección de fechas e imágenes

Esta tarea implica, por un lado, la elección de los tres años más interesantes o representativos dentro del período y, por otro, la delimitación de la época de cada año más adecuada para los propósitos del trabajo. La importancia de una acertada decisión en ambas cuestiones para el resultado perseguido es evidente, por ello fue necesario el análisis de múltiples factores. Así, para la elección de los tres aniversarios que habían de servir como referencia temporal del estudio, se atendió a:

- la existencia en el período de determinados eventos con consecuencias potencialmente importantes en la actividad agraria, como fueron la entrada en vigor de la Ley de Aguas en Enero de 1986 y la incorporación de España a la entonces Comunidad Económica Europea y, consecuentemente, la gradual adecuación a las exigencias de la Política Agraria Común; desde este punto de vista resulta aconsejable la inclusión de una fecha anterior a ambos hitos (1984 o 1985);
- la disponibilidad de los resultados del proyecto CORINE Land Cover correspondientes al año 1987 con una elevada afinidad con los de este trabajo;
- las características hidrológicas medias de los años elegidos fueron de tipo normal, en el sentido de que, en la medida de lo posible, ningún factor introdujera sesgos importantes en la determinación de los usos del suelo en cada uno de dichos años; sin embargo ello no fue totalmente posible, dado el pertinaz periodo de sequía registrado en España en la primera mitad de los 90.

Como resultado de este análisis se determinaron como más adecuados los años 1984 y 1991,

a los que, como resultaba prácticamente obligado, se añadió 1995, pues al interés que de por sí supone disponer de la información más reciente en el momento de comenzar el estudio, se une el de servir como elemento de validación de resultados mediante el contraste con la realidad, o verdad-terreno. Esta elección conforma, junto con los resultados del proyecto CORINE Land Cover elaborado a partir de imágenes del año 1987, una serie prácticamente cuatrienal para el conjunto del período 1984-1995.

En cuanto a la delimitación de la época del año a la que deberían corresponder las imágenes, el criterio básico a seguir fue el de optimizar las condiciones de identificación de los diferentes usos del suelo, asignando una mayor prioridad a la identificación de los usos agrícolas, en especial los de regadío. Dado que la respuesta espectral correspondiente a estos últimos (que depende del estado fenológico de los diferentes cultivos y es óptima en el momento inmediatamente anterior a su recolección) es particularmente característica en la estación veraniega (Junio a Septiembre), la elección debía recaer dentro de este periodo, si bien el caso de los cereales de primavera y las zonas en las que tienen lugar varias campañas a lo largo del año podrían suponer una excepción.

La considerable heterogeneidad climática que presenta nuestro territorio exigió realizar una zonificación del mismo, con objeto de poder precisar para cada zona el intervalo de fechas más apropiado. Esta delimitación geográfica de áreas homogéneas se realizó apoyándose en las divisorias de las grandes cuencas hidrográficas y la distribución de escenas Landsat TM, de donde procederían las imágenes, y considerando como criterios de homogeneización los correspondientes a las diferentes clasificaciones tanto de tipo climático (Capel Molina) como de similitud biogeográfica (Rivas Martínez) y agrícola (Papadakis) que se encuentran en la literatura. El análisis de la tipología de cultivos, el ciclo agrícola asociado y la distribución de zonas regables permitieron finalmente acotar, para cada una de dichas zonas, el intervalo de fechas más adecuado en la época estival.

La necesidad de delimitar las áreas regadas con suficiente precisión mostró la conveniencia de completar las imágenes de verano con las correspondientes a otras épocas del año, en aquellas zonas en las que adquieren importancia determinados cultivos de regadío que, ya sea por su calendario de siembra-recolección o por ser frecuente la existencia de varias cosechas anuales, no se detectan de forma óptima en la imagen de verano: Suroeste de Andalucía, Zona de Almería y Murcia, Zona de Valencia y La Mancha Oriental (Albacete), y Cataluña. En estas zonas se realizó un estudio multitemporal para cada uno de los años 1991 y 1995, integrando los resultados obtenidos de la interpretación de la imagen de verano con los correspondientes a dos imágenes adicionales de invierno-primavera y otoño-invierno.

En cuanto a los cereales de regadío, de gran importancia en algunas regiones del interior peninsular (Cuencas del Ebro, Guadiana, Júcar y Duero fundamentalmente) y cuya identificación pudiera presentar, en principio, algunas dificultades en la imagen de verano, bien por haberse realizado ya la recolección o bien por otras razones, una exploración realizada al efecto mostró que no se obtenían mejoras significativas que justificaran la utilización de imágenes adicionales de primavera, puesto que en esta estación se confundía la actividad clorofílica del regadío con la del resto de la vegetación.

Acotados los intervalos de fechas en cada caso, el proceso de selección de imágenes quedó supeditado a la disponibilidad de las mismas con la calidad necesaria, esto es, con un nivel de nubosidad mínimo, idealmente nulo, lo que en determinadas regiones entrañó ciertas dificultades, obligando en algún caso aislado a recurrir a la utilización de imágenes procedentes del satélite SPOT, según se indica más adelante.

El caso de las Islas Canarias es singular, ya que a la frecuente presencia de nubosidad se une la discontinuidad en la disponibilidad de imágenes, por razón de que la Unión Europea ha financiado intermitentemente las campañas de adquisición de datos (periodos de seis meses de 1987 a 1990, 1994 y 1995). Finalmente se optó por conformar dos aniversarios, los correspondientes a 1990 y 1995.

En total se han utilizado tres coberturas completas de España correspondientes a períodos de verano, lo que supone del orden de 50 escenas (en su mayoría completas) por año, a las que deben unirse cinco escenas adicionales de las épocas de invierno-primavera en los años 1991 y 1995 y otras tres de otoño-invierno de dichos años. Debido a la carencia de imágenes Landsat de las características requeridas en la zona de Valencia - La Mancha Oriental, se ha recurrido a la utilización de una imagen SPOT.

Elaboración de las clases Usos del Suelo

Como ya se ha señalado, interesa, por un lado, utilizar una clasificación que permita discriminar y poner de manifiesto las distintas ocupaciones del suelo según su diferente comportamiento, tanto desde el punto de vista de la generación de recursos hídricos (efectos en el ciclo hidrológico de los cambios en las ocupaciones del suelo, en cuanto afectan a la interacción del agua con el sistema suelo-vegetación), como de las implicaciones que supone de cara a la demanda de los mismos.

Por otro lado, la escala del trabajo, las limitaciones de la teledetección y la propia metodología adoptada, aconsejaron seleccionar finalmente la clasificación que se muestra en el epígrafe relativo a resultados. Como puede observarse, se ha seguido un esquema de jerarquía en tres niveles, lo que permite diferentes grados de agregación en la determinación de usos y, en consecuencia, la adaptación a las distintas situaciones en función de las necesidades de información o análisis.

Conviene señalar su relación con la clasificación de usos del suelo utilizada en el proyecto CORINE Land Cover, que en buena medida ha servido como base para elaborar la presente. Ambas siguen un esquema jerárquico si bien en CORINE se definen cuatro niveles frente a los tres de la aquí utilizada, siendo también mayor en CORINE el número de usos en el mayor nivel de desagregación, que en este trabajo asciende a 31. Dentro de las clases de regadío, se discrimina también por niveles de densidad, concretamente tres: alta, media y baja.

Correcciones geométricas y radiométricas de las imágenes. Georreferenciación

La necesidad de efectuar una restauración de la imagen surge como consecuencia de las distorsiones y errores que se producen en la captación de la misma, debido bien a las características y limitaciones de la propia instrumentación, bien a las condiciones atmosféricas, bien a las

condiciones dinámicas bajo las que se produce la toma de la imagen.

Las imágenes Landsat que se distribuyen comercialmente ya incorporan algunas correcciones radiométricas, por lo que las correcciones de este tipo que ha sido preciso realizar en el presente trabajo se limitaron a la realización puntual de algún realce local, tipo filtrado, que mejorara las condiciones de la imagen de cara a su interpretación posterior.

La corrección geométrica de las imágenes ha comprendido la realización de dos procesos sucesivos: en primer lugar, la transformación de las coordenadas de las celdas (o píxeles) de su posición original en la imagen, a las coordenadas que les corresponden en la realidad por su posición en la superficie terrestre, lo cual permitió tanto su superposición con otros elementos cartográficos convencionales, que se utilizan en el trabajo como auxiliares, como de las propias imágenes entre sí. Para ello, se han utilizado un número variable de puntos de control, en torno a 60 por cada escena, distribuidos adecuadamente. Una vez identificados dichos puntos en la imagen y en el mapa topográfico 1:50.000 y obtenidas sus coordenadas UTM, se determinaron los coeficientes de las ecuaciones de transformación, para las que se seleccionaron polinomios bivariados de segundo grado. Finalmente, se comprobó la bondad del ajuste (y de los puntos de control elegidos), exigiéndose que el error cuadrático medio se situara en valores inferiores al tamaño del pixel, esto es, 30 metros. Dado que para cada escena se dispone de varias imágenes, las correspondientes a las diferentes fechas, y que este proceso de determinación de los parámetros de la transformación geométrica necesaria es común para todas ellas, se realizó únicamente para una de las fechas, registrando el resto de las imágenes de la escena contra ella.

Este proceso culmina con la georreferenciación de las imágenes, lo que hace posible la medición de superficies y la integración de los diferentes elementos de información producidos, imágenes y coberturas vectoriales de clasificación de usos, en un sistema de información geográfica.

En segundo lugar, se realizó un proceso de remuestreo, mediante el que se obtienen, a partir de los valores digitales de las celdas o píxeles en la imagen original, los valores digitales correspondientes a las posiciones de las celdas de la malla en la imagen transformada. Este último proceso es necesario debido a que la posición transformada de las celdas originales no coincide con la con la trama de celdas de la imagen.

Para el proceso de remuestreo, se han seguido dos métodos, el del vecino más próximo y el de convolución cúbica. Cada uno de ellos da lugar a una colección diferente de imágenes corregidas, que se han utilizado con objetivos distintos en las siguientes fases del trabajo. Así, las procedentes del primer método han servido para la determinación de los índices de vegetación normalizados, en tanto que las resultantes del segundo de los métodos se utilizaron, en la fase de fotointerpretación, para la identificación de los usos del suelo.

El resultado de esta etapa está constituido, por tanto, por dos colecciones de imágenes corregidas por dos métodos, el de vecino más próximo y el de convolución cúbica y geocodificadas con la precisión y características de la serie cartográfica nacional a escala 1:100.000: proyección UTM, elipsoide Hayford Internacional 1909, distinguiendo las diferentes zonas o husos, 27 a 31, que en esta proyección corresponden a España.

Obtención de Índices de Vegetación y Biomasa

El objetivo perseguido con la obtención de este índice de vegetación es evaluar de una forma rápida y sencilla la densidad y el vigor de la vegetación en general, así como su distribución sobre el suelo. La clasificación supervisada de los índices de vegetación constituye además una valiosa ayuda de cara a mejorar la fiabilidad de la fotointerpretación convencional, especialmente en lo que se refiere a la determinación de las envolventes de zonas regadas, lo cual es particularmente útil en las zonas de regadío disperso y/o con tamaño de parcela pequeño.

La definición de índices de vegetación se basa en el hecho de que la vegetación en buen estado de desarrollo tiene una respuesta espectral específica, caracterizada por una reflectancia muy baja en las longitudes de onda correspondientes a la banda del rojo, R, (banda 3 del TM) debido a que la planta absorbe casi toda la energía luminosa en esta fracción del espectro, mientras que muestra una reflectancia muy elevada en el intervalo de longitudes correspondiente al infrarrojo próximo, IRP, (banda 4 del TM). La diferencia entre ambas es, por tanto, un buen indicador del estado de las plantas desde el punto de vista de su crecimiento. De las diferentes formulaciones de índices de vegetación existentes, se ha utilizado en el presente trabajo el denominado Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, (IVDN o NDVI en siglas anglosajonas), que se define de la siguiente forma:

$$NDVI = (IRP - R)/(IRP+R)$$

cuyos valores posibles se sitúan entre -1 y 1, resultando muy sencilla su interpretación así como la comparación entre diferentes zonas.

Para la obtención del índice se han utilizado los valores de las radiancias, obtenidos a partir de los valores digitales registrados en las imágenes corregidas y remuestreadas por el método del vecino más próximo y los coeficientes de calibración suministrados con las imágenes (para la imagen SPOT se han utilizado los coeficientes de calibración absolutos). Este procedimiento es válido para comparaciones en términos relativos y cualitativos, como es el caso. Si se persiguiera una interpretación física de los valores del NDVI, deberían utilizarse los valores de las reflectancias en cada una de las bandas y no los valores digitales registrados, lo que requeriría efectuar determinadas correcciones adicionales de tipo radiométrico, debido al fenómeno de dispersión atmosférica, que no afecta por igual a las distintas longitudes de onda. Sin embargo, la utilización del índice NDVI con propósitos de índole cuantitativa presenta limitaciones, por lo que, dadas las características del estudio, se optó por no seguir esta vía.

Adicionalmente se han efectuado pruebas para la estimación cualitativa y cuantitativa de la biomasa existente sobre la superficie, a partir de un indicador obtenido por segmentación de los Índices de vegetación en cinco clases. Los resultados obtenidos del tratamiento del orden del 15% de las escenas disponibles no permitieron extraer conclusiones que mejorasen las derivadas de los resultados de la fase de fotointerpretación.

Fotointerpretación

El objetivo de esta fase es delimitar el contorno de aquellas superficies que presentan una ocupación homogénea, de acuerdo a la clasificación de usos del suelo adoptada. Dicha determinación se materializa en una cobertura de ámbito nacional para cada año estudiado. En realidad las coberturas obtenidas son dos, la elaborada únicamente a partir de imágenes de verano y la obtenida en la fase de ampliación, que debe considerarse de mayor precisión al incorporar, en las zonas de España ya señaladas, la interpretación de las imágenes de primavera y otoño.

Tanto por el volumen de trabajo asociado como por los resultados finales esperables, la fase de fotointerpretación constituye claramente uno de los núcleos fundamentales del trabajo. Como ya se ha indicado, si bien inicialmente se consideró la posibilidad de seguir técnicas de interpretación asistida, finalmente se optó por acometer íntegramente la realización de esta fase de fotointerpretación mediante técnicas de inspección visual, en aras de una mayor fiabilidad de los resultados, a pesar de los mayores y más específicos requerimientos de personal que comportaba.

Puede comprenderse fácilmente que un aspecto crítico de esta metodología es el constituido por la homogeneidad de los integrantes de los equipos, en lo que respecta tanto a las rutinas de trabajo como, muy especialmente, a la aplicación de criterios de interpretación de usos que, idealmente, debería ser objetiva y uniforme. Con este fin, a lo largo de todo el desarrollo de esta fase, las tareas de coordinación y puesta en común se realizaron de forma sistemática y periódica, de modo más intenso en las etapas preliminares, prestándose especial atención a los criterios de identificación de las categorías más conflictivas.

El documento de trabajo utilizado como base para la interpretación por los operadores se obtuvo mediante la reproducción en papel fotográfico de alta calidad de la imagen, procedente de la colección de imágenes corregidas y georreferenciadas por convolución cúbica. Como unidad de trabajo se utiliza la hoja 1:100.000, de acuerdo a la distribución y características de la serie de la cartografía oficial correspondiente a esta escala, es decir, los marcos de las hojas son coincidentes con los de las hojas de esta serie, siendo idéntico el resto de características (escala, proyección, huso, esferoide, etc) según se ha descrito en la etapa de georreferenciación de las imágenes. Se mantiene un cierto solape entre hojas adyacentes, de forma que pueda realizarse a posteriori un proceso de enlace entre ellas.

Para la producción de la imagen se utilizan las bandas 4, 5 y 3, cuya combinación resultó, de entre las estudiadas, la más adecuada para la interpretación de usos, sin perjuicio de que, adicionalmente y cuando fue necesario para apoyar la identificación de áreas problemáticas, se utilizaran realces locales de contraste, bien en pantalla o en salidas auxiliares en papel.

Sobre esta hoja base se coloca un acetato sobre el que el operador de fotointerpretación delimita las áreas o parcelas que, de acuerdo a la leyenda, muestran un uso homogéneo identificable con ella. Con objeto de facilitar los trabajos de digitalización de las hojas, se delinearon las parcelas correspondientes a los tres años sobre el mismo acetato, comenzando por 1984. Este procedimiento, si bien produce una mayor fragmentación, tiene la ventaja de permitir corroborar o contrastar ocupaciones entre aniversarios sucesivos. Finalizado el proceso, cada parcela tiene asociados los tres códigos de uso del suelo correspondientes a los tres años analizados. Algunos criterios cartográficos de aplicación en esta fase fueron los siguientes:

- la mínima unidad cartografiada se fijó en 25 hectáreas, lo que supone un área de 5x5 mm a escala 1:100.000 o un círculo de menos de 6 mm de diámetro;
- la delimitación de elementos lineales tales como infraestructuras de transporte, de regadíos, hidrografía, etc., no fue realizada salvo que superaran una anchura de 100 metros;
- la delimitación de áreas de regadío disperso, especialmente en zonas de tamaño de parcela pequeño, se realizó mediante la envolvente del área y cualificando la densidad mediante una sobrecarga en el código de uso correspondiente para distinguir densidades altas, medias y bajas, según que los polígonos regados cubrieran más del 75%, entre el 50% y el 75%, o en torno al 50% de la superficie del área, respectivamente.

Cabe mencionar el uso intensivo que durante esta fase se hizo de la documentación cartográfica auxiliar, aunque debe señalarse que esta documentación auxiliar sirvió sólo como apoyo a la identificación de usos y nunca para la delimitación de áreas ni como verdad-terreno, para lo que se utilizó exclusivamente la información recopilada por los trabajos de campo.

El control de la bondad de la fotointerpretación mediante contraste por otro fotointérprete de una selección de la hoja, se realizó para el 100% de las hojas. El contraste de las ocupaciones interpretadas con la verdad-terreno obtenida del trabajo de campo, afectó en torno al 10% de las hojas de forma aleatoria y a la práctica totalidad de las hojas en las que se presentaron problemas de identificación.

La digitalización del acetato se realizó, por la propia elaboración de éste, de forma simultánea para los tres años analizados, digitalizándose los polígonos correspondientes a las parcelas delineadas y asociando al mismo los códigos de identificación de uso para los tres años. Los resultados de la digitalización se convierten a formato ARC/INFO, generándose coberturas independientes para cada hoja. Las coberturas tienen topología de polígonos, utilizando el marco de la hoja para cerrar polígonos. La tolerancia admitida en la continuidad de los arcos a través de hojas contiguas se fijó en 1 mm (100 metros en el terreno).

RESULTADOS

Los resultados del trabajo se componen básicamente de cinco bloques de información, además de una breve memoria de síntesis donde están recogidos los aspectos técnicos más relevantes. Todos ellos se presentan en formato digital y soporte CD-ROM. La razón de haber optado por este formato, con preferencia sobre el papel, radica tanto en las posibilidades que ofrece para ser integrado en el Sistema de Información Geográfica disponible como en su versatilidad, ya que permite múltiples tipos de salida gráfica en formato papel, adaptable a cualquier escala (recomendable inferiores a 1:100.000) y cualquier zona que requiera ser estudiada. En concreto, el material obtenido es el siguiente:

Imágenes originales (125 CD ROM). Salvo una de las imágenes que procede del satélite SPOT, el resto de las imágenes originales corresponden al satélite Landsat . Cada una de las imágenes está integrada por las siete bandas captadas por el sensor TM.

Imágenes corregidas. Según se señaló en el apartado de la descripción de la metodología, se dispone de las imágenes corregidas por el método de convolución cúbica (149 CD ROM) y de las corregidas por el método del vecino más próximo (144 CD ROM).

Índices de vegetación (160 CD ROM). Esta colección esta constituida por las coberturas correspondientes a este índice obtenidas a partir de las imágenes corregidas por el método del vecino más próximo.

Mosaico (15 CD ROM). Cobertura completa del territorio nacional, dividida en 292 hojas que siguen la distribución de la serie cartográfica a escala 1:100.000. Este mosaico se obtiene a partir de la colección de imágenes corregidas por el método de convolución cúbica correspondientes al año 1995.

Usos del suelo. Este bloque constituye el verdadero resultado final del trabajo, puesto que supone la culminación de todas las etapas anteriores. La clasificación de los usos del suelo en cada uno de los aniversarios seleccionados (1984, 91 y 95) se ha obtenido en dos versiones: la primera de ellas resulta de la explotación de una sola fecha para cada uno de los años mencionados; la segunda resulta de incorporar las escenas adicionales incluidas en la ampliación del trabajo, esto es, imágenes de primavera y otoño en el Suroeste y Levante españoles para los años 1991 y 1995. En el Anexo se presentan, a nivel nacional, los resultados estadísticos finales de esta segunda versión, relativos a la ocupación general del suelo, recogiendo también, dentro de la clase Regadío, su desagregación según densidades.

En relación con los resultados obtenidos para el total nacional, las principales observaciones que cabría formular serían, en síntesis, las siguientes:

1. La superficie ocupada por la Agricultura es la que registra una más alta participación, en concreto casi un 55% sobre el total. De esta cifra, aproximadamente la mitad esta dedicada a Tierras de Labor en Secano y casi un 11% de la misma a los Cultivos de Regadío. El resto, es decir, en torno al 39% de todas las Áreas Agrícolas, son Praderas y Pastizales, Sistemas Agroforestales o bien otras Áreas Agrícolas con Vegetación Natural.

La superficie de esta clase de uso se mantuvo prácticamente estable durante el periodo 1984-95, si bien alguno de sus componentes experimentaron notables oscilaciones: el regadío creció entre 1984 y 1991 y decreció los años siguientes, presentando una tasa final positiva cercana al 4%. El secano tuvo un comportamiento de signo inverso al regadío en los mismos subperiodos, aunque con valores muchos más suaves, decreciendo casi un 1,5% en total.

No obstante, los resultados relativos al regadío caben ser matizados si se tiene en cuenta la diferente densidad de los perímetros clasificados como regadío en cada uno de los aniversarios. Hay que señalar que en la fase de fotointerpretación se distinguió entre densidad alta ((a) polígonos regados en más de un 75% de su superficie), densidad baja ((b) polígonos regados en torno al 50% de su superficie) y densidad media ((c) entre el 50% y el 75%). Así, incorporando estos datos, se obtiene que la variación de la superficie regada realmente en el periodo 91-84 resulta ser de un 10,1%, coincidente básicamente con la obtenida sin tener en cuenta el efecto de las densidades (10,59%). Sin embargo, no sucede lo mismo con el

periodo siguiente, el 95-91, puesto que la variación experimentada pasa a ser de casi un -9% (antes, un -5,73%). En conjunto, para el periodo 95-84, parece observarse una estabilización prácticamente total ya que resulta un crecimiento del 0,3% (antes, del 4,25%). Obviamente, se registra una variada casuística entre las diferentes cuencas hidrográficas.

Estos resultados muestran que, al menos en los últimos años, el descenso de la superficie regada ha sido bastante más fuerte de lo que reflejan las cifras "brutas". Este hecho cabe ser atribuido a diversos factores, pero todo parece indicar que se debe principalmente a la escasez de agua provocada por la sequía que sufrió nuestro país en dicho periodo.

Por cultivos, y a nivel nacional merece la pena destacar el estancamiento/disminución de la superficie dedicada a los cultivos herbáceos (fuertes disminuciones en las Cuencas de Guadalquivir, Guadiana I; incrementos en Duero, Ebro y, sorprendentemente, en Júcar y Segura). La superficie dedicada a arrozales decreció de forma muy notable, especialmente en los últimos años, si bien se mantuvo en las zonas que presentan una vocación tradicional hacia esta orientación productiva (Júcar y Bajo Ebro). Por contra, los cultivos bajo plástico tuvieron un incremento general espectacular, especialmente localizado en Guadalquivir, Guadiana II, Segura y Sur (cuantitativamente la más importante). En cuanto a los cultivos permanentes, se observa un crecimiento de casi el 10% (fortísimo aumento en Guadiana, doble que la media nacional en Segura, del orden de la media en Júcar y Ebro y gran descenso en el Guadalquivir). Complementariamente a lo expuesto, la asociación de cultivos englobados en la clase denominada Mosaico de cultivos herbáceos y permanentes registran un incremento en torno al 25%, localizándose fundamentalmente en Guadiana y Segura.

2. La clase de ocupación que sigue en importancia, por superficie ocupada, a la agricultura es la incluida bajo el epígrafe denominado Bosque y Vegetación Natural, con un 41% del total. Esta cantidad se reparte casi a partes iguales entre Matorrales y matorrales arbolados y Bosques (frondosas, coníferas y mixtos).

Durante el periodo analizado, esta clase tuvo un comportamiento, aunque muy suave, constantemente decreciente, puesto que al final cede en torno a un 0,9% de su superficie. Este descenso se centra más en las subclases de bosques que en las de matorrales.

3. Los Espacios con Escasa Vegetación (roquedos y otros) suponen en torno al 2,5% del total nacional. Lo más destacable de su evolución a lo largo del periodo 1984-95 es que registra la segunda variación más fuerte de todos los cinco grandes usos, concretamente una expansión de casi el 14%, cifra nada desdeñable.
4. Las Superficies Artificiales (zonas urbanas, industriales y de servicios; zonas verdes, campos de golf y urbanizaciones; áreas de extracción minera) tan sólo alcanzan el 1,1% del total nacional, si bien muestran un aumento significativo en la década, ya que la finalizan con una extensión que es un 16% superior a aquella con que la inician.
5. Finalmente, en lo que se refiere a los Cursos y Láminas de Agua (un 0,64% del total nacional), los resultados muestran una significativa evolución negativa, disminuyendo aproximadamente un 10% en el periodo analizado (1984-95). Este descenso se localiza prácticamente en su totalidad en los últimos años (1991-95) y especialmente en la subclase Lagos y Lagunas Naturales Interiores, lo que, entre otras cuestiones, es ciertamente revelador

de la intensidad del ciclo de sequía sufrido por nuestro país durante el citado subperiodo y su posible impacto sobre los ecosistemas acuáticos.

CONSIDERACIONES FINALES

Estos son a grandes rasgos los resultados más inmediatos que ha arrojado el proyecto de teledetección descrito en los apartados anteriores. Debe señalarse nuevamente que dichos resultados no son sino el fruto de una primera explotación de la información, y que están en fase de elaboración diagnósticos específicos a nivel de ámbitos espaciales más reducidos, como consecuencia del cruce de la misma con otras fuentes estadísticas complementarias.

Desde el punto de vista del usuario final, que es el que básicamente ha animado el contenido de esta ponencia, cabría finalmente recoger algunas consideraciones a la luz de esta experiencia.

La teledetección parece mostrarse como una herramienta técnica de gran utilidad para la planificación y gestión de los recursos naturales en diversos sectores, no sólo a nivel de los Órganos Centrales de la Administración, que no disponen con frecuencia sobre el terreno de una red extensa de toma de datos que cubra toda la superficie nacional, sino también a nivel de Entes territoriales de menor amplitud espacial. Evidentemente, cuanto mayor y más exhaustivo sea el trabajo de campo, más completos serán los resultados y mayor será su fiabilidad. Sin embargo, a mi juicio este aspecto, aún siendo totalmente deseable, produce un importante aumento de los costes del proyecto y le resta agilidad en el tratamiento y explotación de la información, neutralizando en gran parte las ventajas naturales que ofrece la teledetección.

En todo caso, conviene recalcar que esta técnica es sólo una más de las disponibles en el campo de la investigación básica, que debe ser complementada con otras fuentes de información alternativas disponibles. Constituye así mismo un procedimiento valioso para elaborar indicadores que permitan la detección temprana de procesos o fenómenos y, en definitiva, llamen la atención sobre problemas cuya posible existencia exige ser contrastada de inmediato a escala más reducida.

Por último, y como consecuencia de los párrafos anteriores, es importante mencionar el gran aumento que se produce en la potencialidad de la teledetección cuando ésta se integra en un sistema de Información Geográfica, habida cuenta de las enormes posibilidades que ello comporta.