

Caso Práctico

Aplicaciones Operativas de la Teledetección en la Planificación y Gestión del Medio Hídrico ***Operational Applications of Remote Sensing in Water Resources Management***

S. Montesinos y M. Bea
smontesinos@geosys.es

Geosys, Sector Foresta 23, locales 7 y 8. 28760 Tres Cantos (Madrid). www.geosys.es

Recibido y aceptado Mayo de 2008

RESUMEN

Las especiales características de la teledetección espacial (resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica) la convierten en una potente, dinámica y objetiva fuente de datos para la planificación y gestión de recursos hídricos.

Aunque son muchas las aplicaciones que podemos encontrar en la bibliografía relativas al uso de la teledetección en relación al agua, aquí sólo vamos a presentar aquellas que tienen un mayor componente operativo y se están convirtiendo en una herramienta habitual en las administraciones públicas que gestionan el agua.

En la actualidad, las imágenes de satélite son una fuente de información para la implementación de la Directiva Marco del Agua o para el cumplimiento de la vigente Ley de Aguas en: reconocimiento de aprovechamientos en regadío con aguas subterráneas, cuantificación de superficies en regadío, control del régimen de explotación en acuíferos sobreexplotados, inundaciones y sequías.

PALABRAS CLAVE: teledetección, recursos hídricos, planificación hidrológica, superficies en regadío, inundaciones, sequías.

ABSTRACT

The remote sensing special features (spatial, temporal, spectral and radiometric resolution) convert it in a powerful, dynamic and objective data source for the water resources planification and management.

Although it's possible to find in the bibliography many applications about remote sensing in relation to water resources, now only is going to present those of them that have a larger operative component. Actually, remote sensing is starting to be an usual tool for water management at the public administration.

Nowadays, satellite images are an information source for the implementation of the Water Framework Directive or for the fulfillment of the current Water Act: recognition of groundwater irrigation rights, quantification of irrigated areas, control of the exploitation regime in over-exploited aquifers, floods and droughts.

KEYWORDS: remote sensing, water resources, water management, irrigated areas, floods, droughts.

INTRODUCCIÓN

“El agua es un recurso natural escaso, indispensable para la vida y para el ejercicio de la inmensa mayoría de las actividades económicas; es irremplazable, no ampliable por la mera voluntad del

hombre, irregular en su forma de presentarse en el tiempo y en el espacio, fácilmente vulnerable y susceptible de usos sucesivos” (Preámbulo de la Ley 28/1985, de 2 de agosto, de Aguas).

La conservación de este valioso recurso exige, de la administración pública del agua, una planificación

hidrológica previa y una eficaz gestión del mismo.

“La planificación hidrológica tendrá por objetivos generales conseguir el buen estado ecológico del dominio público hidráulico y la satisfacción de las demandas de agua, el equilibrio y armonización del desarrollo regional y sectorial, incrementando las disponibilidades del recurso, protegiendo su calidad, economizando su empleo y racionalizando sus usos en armonía con el medio ambiente y los demás recursos naturales” (Art. 40 del Texto Refundido de la Ley de Aguas, T.R.L.A.).

Las especiales características de la teledetección espacial (resolución espacial, temporal, espectral y radiométrica) la convierten en una potente, dinámica y objetiva fuente de datos para la planificación y gestión de recursos hídricos.

Aunque son muchas las aplicaciones que podemos encontrar en la bibliografía relativas al uso de la teledetección en relación al agua, aquí sólo vamos a presentar aquellas que tienen un mayor componente operativo y se están convirtiendo en una herramienta habitual en las administraciones públicas que gestionan el agua.

ENGMAN *et al.* (1991) proporcionan una relación estructurada de aplicaciones de la teledetección en hidrología: cálculo de precipitaciones, cuantificación de recursos nivales, evapotranspiración, cálculo de escorrentía, humedad del suelo, exploración de aguas subterráneas y calidad del agua. La mayoría de estas aplicaciones pueden ser utilizadas de manera puntual, pero en la actualidad carecen de un componente operativo en términos de necesidad por parte de un usuario, eficiencia temporal y relación información / coste.

RECONOCIMIENTO DE APROVECHAMIENTOS CON AGUAS SUBTERRÁNEAS

El Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas (T.R.L.A.) establece que: *“constituyen el dominio público hidráulico del Estado, con las salvedades expresamente establecidas en esta Ley, las aguas continentales, tanto las superficiales como las subterráneas renovables con independencia del tiempo de renovación”* (Art. 2. a).

El T.R.L.A. establece en sus Disposiciones Transitorias 2ª y 3ª que en el plazo de tres años, a partir de su entrada en vigor, los titulares de algún derecho, conforme a la legislación que deroga la Ley 29/1985

de Aguas, sobre las aguas privadas procedentes de manantiales, pozos o galerías en explotación, podrán acreditar el mismo, así como el régimen de utilización del recurso, ante el Organismo de cuenca, para su inscripción en el Registro de Aguas como aprovechamiento temporal de aguas privadas.

Además, la Disposición Transitoria 4.2 establece que: *“Todos los aprovechamientos de aguas calificadas como privadas por la legislación anterior a la Ley 29/1985, de 2 de agosto de Aguas, se declararán por sus titulares legítimos ante el Organismo de cuenca... El Organismo de cuenca, previo conocimiento de sus características y aforo, los incluirá en el Catálogo de aprovechamientos de aguas privadas de la cuenca”*.

Todavía hoy, casi 25 años más tarde, se están resolviendo los expedientes que se generaron por las peticiones de los titulares de pozos. Conocer de una manera objetiva, lo que se regaba antes de la puesta en marcha de la Ley 29/1985, de Aguas, el 1 de enero de 1986, resulta una labor imposible utilizando técnicas convencionales (fotografía aérea existente, estadísticas agrarias, encuestas en las Cámaras Agrarias,...). Por ello, las Confederaciones Hidrográficas utilizan la información generada a partir de los datos suministrados por sensores remotos instalados a bordo de plataformas espaciales. Estos datos digitales, convenientemente tratados, permiten generar *“imágenes”* que identifican las superficies en regadío en el momento de paso del satélite, proporcionando argumentos objetivos válidos para el reconocimiento de los aprovechamientos en regadío (figura 1).

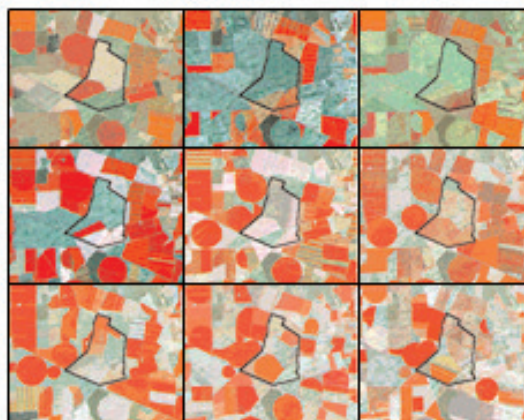


Figura 1. Seguimiento multitemporal, a partir de imágenes Landsat, de un aprovechamiento para determinar la superficie realmente regada a la entrada en vigor de la Ley de Aguas.

Un elemento muy importante a tener en cuenta, es que las imágenes de satélite tienen carácter de "prueba", tanto en un procedimiento contencioso-administrativo, como en un proceso judicial. En términos generales, los datos de teledetección pueden ser considerados como medio de prueba en el ámbito de la prueba documental, pericial o de reconocimiento judicial.

La metodología utilizada debe quedar reducida a aquellos procedimientos que no introduzcan indeterminaciones o probabilidades, por lo que la clasificación multispectral, análisis de componentes principales e incluso el cálculo de los índices de vegetación no deben ser utilizados más allá de meros elementos auxiliares, que faciliten la interpretación del dato objetivo aportado por teledetección.

El Tribunal Superior de Justicia de Castilla la Mancha, en su sentencia 376, de 11 de mayo de 1998, consideró documentos a efectos probatorios las imágenes obtenidas a partir de sensores remotos instalados en un satélite (MONTESINOS *et al.*, 1999a):

"...la Administración ha aportado en período probatorio la prueba atinente a las imágenes del satélite de las cuales resulta como en la parcela de la actora no se ha apreciado ningún riego durante los años 1983 a 1989, lo cual contrasta con la claridad con que se observa un pivot (circulo en rojo) en una parcela distinta a la de la actora. Sin que por último se haya aportado por la parte recurrente ningún principio de prueba convincente y objetivamente relevante para constatar la preexistencia del aprovechamiento..."

FALLAMOS: Que desestimando el Recurso Contencioso-Administrativo interpuesto contra el silencio de la Confederación Hidrográfica del Guadiana, denegatorio de inscripción en el Catálogo de Aguas Privadas, debemos declarar y declaramos ajustadas a Derecho las resoluciones impugnadas, manteniendo las mismas en su contenido... Contra la presente resolución no cabe recurso ordinario alguno."

Para los profesionales y especialistas en teledetección, más importante si cabe, que las imágenes de satélite sean consideradas como una prueba documental, es el hecho de que pueden ser consideradas como una prueba pericial.

La Ley 1/2000, de Enjuiciamiento Civil establece las reglas por las que se debe regir el peritaje:

"Cuando sean necesarios conocimientos científicos para valorar hechos, las partes podrán aportar el dictamen de peritos...(Art.335.1)"

"Los dictámenes se formularán por escrito, acompañados, en su caso, de los demás documentos, ins-

trumentos o materiales adecuados para exponer el parecer del perito... Podrán acompañarse los documentos que se estimen adecuados para su más acertada valoración (art. 336.2)".

"Aportados los dictámenes, las partes habrán de manifestar si desean que los peritos comparezcan en la vista del juicio verbal, expresando si deberán exponer el dictamen o responder a preguntas.... (Art.337.2)"

Finalmente, el Tribunal valorará los dictámenes periciales según las reglas de la sana crítica.

CUANTIFICACIÓN DE SUPERFICIES EN REGADÍO

La evaluación de la evolución de la demanda de agua en el tiempo es uno de los aspectos que produce mayores desviaciones y errores en el proceso habitual de restitución del régimen natural de las series de aportaciones.

El estudio de la evolución de la demanda agraria es uno de los aspectos más significativos, debido no sólo al peso específico que representa dentro de la demanda global de una cuenca, sino también a la dificultad que presenta su estimación por técnicas convencionales. En España, la demanda agraria supone en torno al 85 % de la demanda total del recurso.

Dentro del tratamiento digital de las imágenes de satélite podemos abordar varias metodologías operativas, para la cuantificación de las superficies en regadío detectadas por teledetección, basadas en la clasificación multispectral o en el cálculo de Índices espectrales.

A la hora de determinar la metodología a utilizar, deben tenerse en cuenta las siguientes consideraciones:

- *Desarrollo vegetativo de los cultivos existentes en la cuenca.* El análisis del desarrollo vegetativo de los cultivos existentes permite determinar las fechas de imágenes de satélite, necesarias y suficientes, que se deben adquirir para identificar dichos cultivos. Por ejemplo, en la cuenca del Segura son necesarias al menos 4 fechas, a lo largo del año, para discriminar todas las culturas agrícolas presentes en la cuenca, mientras que en el Ebro, con dos es suficiente.
- *La heterogeneidad de la cuenca.* Esta característica condiciona significativamente el desarrollo vegetativo de los cultivos y por tanto, la heterogeneidad de las clases espectrales que se pueden discriminar.

- *El grado de parcelación de la cuenca.* Un elevado grado de parcelación condiciona la existencia de píxeles de borde (mezcla de 2 o más clases espectrales), lo que hace que las parcelas no tengan una distribución unimodal y dificulte la extracción de información mediante clasificadores multiespectrales.
- *Tamaño de la cuenca.* Esta característica va a condicionar el tipo de imágenes de satélite que vamos a adquirir, en términos de coste económico y escala de trabajo. En general, en España, sensores del tipo TM (*Thematic Mapper*) de Landsat serían los más idóneos por los objetivos que se persiguen y por la escala de trabajo (a escala de Planificación Hidrológica).

Como si de un modelo matemático se tratara, la estimación de superficies de regadío mediante teledetección en una cuenca hidrográfica presenta unas “*condiciones de contorno*” que deben ser tenidas en cuenta a la hora de interpretar los resultados obtenidos:

- *Escala de trabajo.* Los resultados se obtienen a partir de una fuente de datos (imagen TM de Landsat) con un tamaño de píxel de 30 metros, lo que desde un punto de vista métrico equivale a una escala 1:150.000.
- *La estimación de la superficie en regadío se realiza a partir del análisis multitemporal y multiespectral de imágenes.* Así, un cultivo herbáceo, será captado por el sensor, tanto en cuanto haya alcanzado un desarrollo vegetativo, que permita que cubra el suelo y por lo tanto la señal captada sea la de la vegetación y no la del suelo o mezcla de ambas. En un cultivo leñoso, la situación es similar y cítricos muy jóvenes, con una masa foliar pequeña, no podrán ser identificados, ya que el sensor va a captar una señal mayoritariamente de suelo y no de vegetación. En la viña, especialmente la plantada en vaso, la situación es todavía más delicada, ya que hay que esperar que la vid tenga hoja y que los sarmientos de la planta cubran el suelo, para que la señal sea la propia de vegetación y no la del suelo.

En la actualidad, se están elaborando distintos mapas de usos de suelo a partir de imágenes de satélite (Mapa de Usos y Aprovechamientos, CORINE Land Cover o SIOSE) que definen una clase “regadío” que no es representativa de la demanda hídrica de una cuenca.

Para evitar errores en la interpretación de las cifras que se obtienen de este tipo de estudios, hay que tener en cuenta que términos como, - regadío, área

regada o superficie en regadío -, habitualmente se usan indistintamente, pero tienen significados muy diferentes.

“*Regadío*” se define como un terreno fertilizado por el riego. Sin embargo, cuando se representa como un uso del suelo, se trata de una clase de uso que se representa, gráficamente, como una envolvente o polígono (en la jerga GIS), donde la clase dominante son cultivos en regadío (figura 2), pero donde pueden existir otras clases que por su poca abundancia o pequeño tamaño (depende de la escala de trabajo), no son representadas.

Los resultados relativos al regadío, obtenidos por este tipo de estudios, deben matizarse si se tiene en cuenta la diferente densidad de los perímetros clasificados como regadío en cada uno de los años considerados (POZO, 1999).

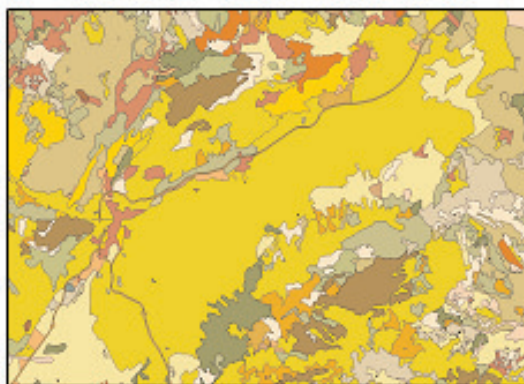


Figura 2. Representación gráfica del regadío como una clase primordial de uso del suelo.

El “*área regada*” correspondería a los terrenos que se están regando en un momento determinado (figura 3). Así, el área regada en primavera es distinta al área regada en verano, ya que encontramos cultivos distintos, con ciclos vegetativos distintos y culturas agrícolas distintas.

En la figura 3 se puede ver cómo dentro de la clase de uso del suelo “*regadío*”, no todo se encuentra cultivado en un momento determinado. En este caso, son las parcelas que se encuentran en regadío en el verano de 2004.

El concepto “*superficie en regadío*” correspondería a los terrenos realmente regados en un periodo de tiempo (figura 4). Desde un punto de vista matemático, lo podemos definir como el sumatorio de áreas regadas. Así, si caracterizamos una zona y podemos

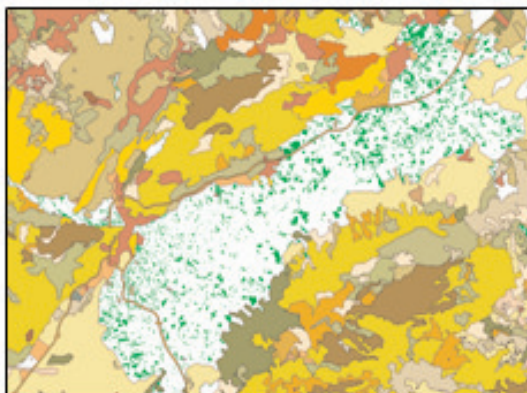


Figura 3. Representación gráfica del área regada en el verano de 2004

identificar los cultivos a lo largo de un año, la unión de todas las parcelas que aparecen cultivadas, nos da la superficie en regadío para ese periodo (en este caso un año). Si bien, el periodo de tiempo considerado para calcular la superficie en regadío puede ser un año, varios años (entre 1984 y la actualidad, por ejemplo) o un momento determinado a lo largo de un periodo de tiempo (por ejemplo, la superficie en regadío cultivada en verano, entre 1984 y el momento actual).

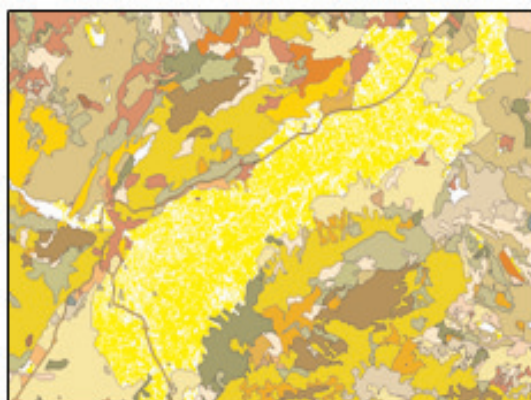


Figura 4. Superficie en regadío en el año 2004, calculada a partir de las áreas regadas identificadas en marzo, abril, junio, agosto y octubre del año 2004.

Por último, “*Superficie regable*” sería toda aquella superficie que tiene potencialidad para ser regada. Como se puede ver en las figuras, a la hora de cuantificar la “*superficie en regadío*”, la clase de uso “*regadío*”, supone un incremento en ocasiones muy importante sobre la situación real, mientras que el “*área regada*” no es sino una parte de la “*superficie en regadío*” existente.

En el ejemplo anterior, la envolvente que representa la clase de uso “*regadío*” son 20.787 hectáreas, mientras que el área regada en el verano de 2004, son 5.520 hectáreas y la superficie en regadío en el año natural 2004, son 17.118 hectáreas.

El uso combinado de estas imágenes de alta resolución (tipo Landsat o DMC) con otras de muy alta resolución (tipo SPOT VHR, IKONOS o QuickBird), nos permite cuantificar cultivos leñosos como la viña, olivos o frutales y mediante técnicas de análisis multicriterio podemos determinar si se encuentran en secano o en regadío (figura 5).

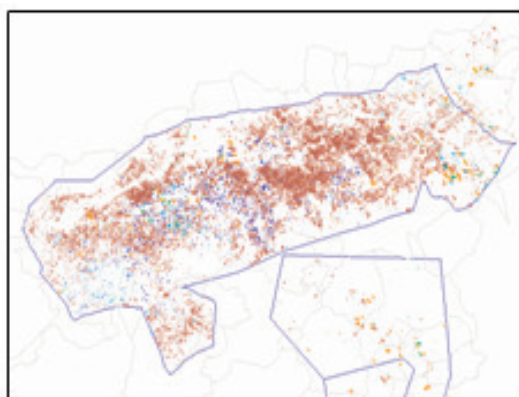


Figura 5. Mapa de cultivos en regadío existentes en los acuíferos de la Mancha occidental en el año 2007. En marrón, la viña en regadío detectada mediante técnicas de análisis multicriterio a partir de datos SPOT de muy alta resolución (2,5 metros).

A partir de los datos de superficies o de cultivos en regadío, el planificador puede obtener escenarios de consumo de agua aplicando dotaciones en m³ por hectárea de cultivo y año.

SEGUIMIENTO DEL RÉGIMEN DE EXPLOTACIÓN EN ACUÍFEROS

En el año 1987 se planteó el problema del conocimiento de las extracciones de aguas subterráneas para riego en los acuíferos de La Mancha (oriental y occidental). Se trataba de conocer extracciones importantes que justificasen la disminución drástica de las salidas al Júcar en su curso medio o el secado del Guadiana en las proximidades de las Tablas de Daimiel. Por primera vez, en nuestro país y en Europa, hace ahora 20 años, se utilizaron las técnicas de teledetección aplicadas a la hidrología y los usos del agua. La metodología, resultados, aplicaciones y sugerencias de aquel estudio se recogieron en el Bole-

tín “Informaciones y Estudios” nº 51 del extinto Servicio Geológico (MONTESINOS, 1990).

Posteriormente, las imágenes de satélite se han utilizado en otras aplicaciones, como el seguimiento de las extracciones en el Campo de Montiel y las afecciones a las Lagunas de Ruidera, el seguimiento de la evolución de las Tablas de Daimiel y las lagunas de la cuenca del río Cigüela en la provincia de Toledo, siempre con resultados excelentes y bajo coste (LÓPEZ-CAMACHO, 1999).

En la cuenca del Guadiana, la grave situación alcanzada en los acuíferos de la Llanura Manchega a final de los años ochenta, en la que los recursos hídricos extraídos llegaron a ser el doble de los renovables medios, obligó, en febrero de 1987, a la declaración provisional de sobreexplotación del acuífero de La Mancha Occidental (Unidad Hidrogeológica 04.04) y, en abril de 1988, por Real Decreto, se declaró provisionalmente sobreexplotado el acuífero de Campo de Montiel (U.H. 04.06).

“El organismo de cuenca competente, oído el Consejo del Agua, podrá declarar que los recursos hídricos subterráneos de una zona están sobreexplotados o en riesgo de estarlo.

En estas zonas el organismo de cuenca, de oficio o a propuesta de la comunidad de usuarios u órgano que la sustituya, conforme al apartado 2 del artículo 87, aprobará, en el plazo máximo de dos años desde la declaración, un plan de ordenación para la recuperación del acuífero o unidad hidrogeológica. Hasta la aprobación del plan, el organismo de cuenca podrá establecer las limitaciones de extracción que sean necesarias como medida preventiva y cautelar. El referido plan ordenará el régimen de extracciones para lograr una explotación racional de los recursos y podrá establecer la sustitución de las captaciones individuales preexistentes por captaciones comunitarias, transformándose, en su caso, los títulos individuales con sus derechos inherentes, en uno colectivo que deberá ajustarse a lo dispuesto en el plan de ordenación” Art. 56.1 del T.R.L.A.

Durante los primeros años, el seguimiento del control del régimen de explotación se realizó a partir de fotografías aéreas en color y campañas de campo que utilizaban como documento de referencia dichas fotografías.

Desde el año 1997, se están utilizando técnicas de Teledetección que permiten realizar la estimación del volumen extraído tanto en el conjunto del acuífero como en cada uno de los aprovechamientos en regadío inscritos.

Los volúmenes estimados de extracción para cada

aprovechamiento en regadío se calculan integrando en el marco de un Sistema de Información Geográfica, el mapa de cultivos en regadío (obtenido por teledetección), la delimitación de los aprovechamientos en regadío y las bases de datos correspondientes a la superficie inscrita en cada expediente de riego, la tabla de dotaciones medias de los distintos tipos de cultivos y los intervalos de limitación de riego según la superficie inscrita que permite el Régimen de Explotación.

La información generada permite comparar los volúmenes de extracción permitidos con los volúmenes de extracción estimados para cada uno de los aprovechamientos en regadío y para el total del acuífero, controlándose de manera eficaz y global el cumplimiento del Régimen de Explotación.

La Comisaría de Aguas de la Confederación Hidrográfica del Guadiana ha adoptado las técnicas de teledetección espacial para la estimación de los caudales extraídos con destino a riego, dentro del perímetro de sobreexplotación de sus acuíferos, con objeto de controlar el cumplimiento del Régimen de Explotación. Además, se han empezado a utilizar estas mismas técnicas para la detección, en tiempo real, de los regadíos con aguas subterráneas que no cuentan con concesión administrativa (figura 6), con objeto de tener un mejor conocimiento de las extracciones, que favorezca una mejor gestión de los recursos hídricos subterráneos (MONTESINOS, 2003).

INUNDACIONES

Las inundaciones son causadas por precipitaciones continuas durante varios días, o por lluvias intensas en un corto espacio de tiempo y pueden agravarse por la fusión de nieves, rotura de presas y algunas actividades humanas (tala de bosques, urbanizaciones,...)

Las inundaciones son una de las catástrofes naturales que mayor número de víctimas producen en el mundo. En el siglo XX unas 3,2 millones de personas han muerto por este motivo, lo que es más de la mitad de los fallecidos por desastres naturales en el mundo en ese periodo. En España son un grave problema social y económico, sobre todo en la zona mediterránea y en el Norte.

La teledetección espacial es una herramienta operativa para conocer las superficies realmente inundadas en una crecida y su diacronía, especialmente cuando se puede contar con imágenes de varias fechas después de la crecida. Aunque este aspecto es

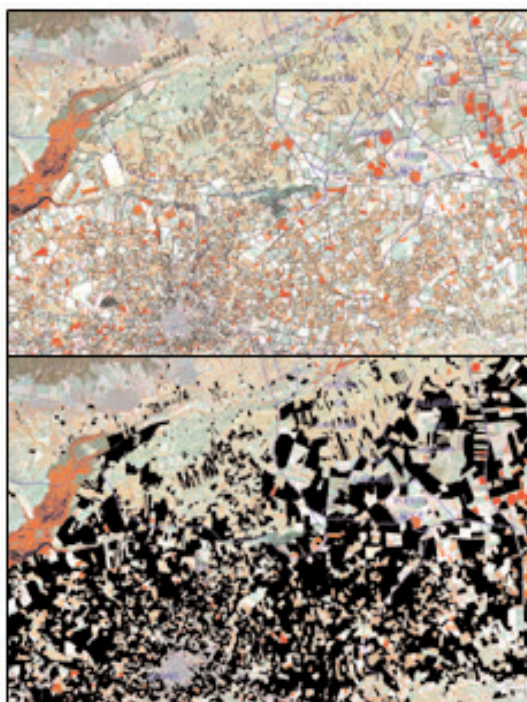


Figura 6. Metodología para la detección de extracciones de agua subterránea sin concesión administrativa. La imagen de la parte superior corresponde a una composición en color de las bandas TM4-5-3 del satélite Landsat 5, y en la parte inferior, se han superpuesto los límites de las explotaciones inscritas. Las parcelas que aparecen en rojo son parcelas que se encuentran regando sin concesión administrativa.

crítico, la utilización de varios satélites (Landsat, DMC, SPOT, IRS, ERS,...) suele permitir contar con varias observaciones de la zona.

Los datos aportados por las técnicas de teledetección unidos a los hidrogramas de la avenida, permiten establecer relaciones de gran interés entre el caudal circulante y la superficie que se va a inundar.

En febrero de 2003, se produjo una avenida en el Ebro y sus principales afluentes en cabecera, producto de la acción combinada de unas importantes precipitaciones (en forma de nieve, en amplios sectores montañosos de la cabecera del Ebro) y una subsiguiente y rápida fusión –provocada por la entrada de vientos cálidos y húmedos de componente SO de la cubierta nival, que incrementó notablemente el caudal de numerosos afluentes en la cuenca semialta del Ebro, especialmente por su margen izquierda (LOSADA *et al*, 2004).

Todos los dispositivos de previsión y alerta funcionaron correctamente, minimizándose el riesgo de pérdidas en vidas humanas y daños materiales, y el

Sistema Automático de Información Hidrológica de la Confederación Hidrográfica del Ebro gestionó el episodio de avenida y proporcionó, en todo momento, información de la evolución del mismo en tiempo real, que pudo consultarse públicamente a través de su página Web.

Utilizando los satélites Landsat y SPOT 2 y 5, la avenida pudo registrarse en 4 fechas, inmediatamente después del evento. Para la estimación de la superficie total anegada por la crecida a través de técnicas de teledetección (figura 7), se siguieron dos diferentes aproximaciones metodológicas que se complementan entre sí:

- Determinación de superficies cubiertas por lámina de agua.
- Estimación de zonas que han podido estar cubiertas por aguas de avenida y que presentan, mayor grado de humedad (figura 8).



Figura 7. Diacronía de la avenida del Ebro en febrero de 2003.

La información generada es utilizada tanto por Protección Civil en sus planes de actuación, como por la Oficina de Planificación Hidrológica de la cuenca del Ebro para la validación de los modelos teóricos de precipitación-escorrentía que se utilizan para caracterizar los periodos de recurrencia de las avenidas.

Un elemento importante que se une a las características propias de la teledetección (resolución temporal, espacial, espectral y radiométrica), es la existencia de un archivo de imágenes (especialmente Landsat TM y en menor grado, SPOT) que se extiende durante los últimos 20-25 años. En este periodo es fácil encontrar eventos de avenidas singulares con periodos de recurrencia de hasta 50



Figura 8. Discriminación entre áreas con alto contenido en humedad (en tonos oscuros) y áreas no afectadas por la crecida

años. Este archivo de imágenes nos permite conocer las superficies inundadas en un evento determinado, proporcionando una fuente de información de gran valor, no sólo para Protección Civil o para la validación de los modelos, sino también para la recuperación del Dominio Público Hidráulico.

SEQUIÁS

Las sequías son el resultado de la combinación de factores meteorológicos, físicos y humanos. La primera causa de cualquier sequía es un déficit de lluvia y en particular, el tiempo, distribución e intensidad de esta deficiencia en relación al almacenamiento, demanda y uso del agua (ESTRELA *et al* 2001).

La sequía es un período de tiempo anormalmente seco, que persiste lo suficiente como para producir un desequilibrio hidrológico en el territorio. Normalmente, queda reflejada por niveles de precipitación inferiores a la media. La sequía tiene efectos adversos en la ecología y en actividades humanas como la agricultura y la recarga hídrica.

Existen diferentes tipos de satélite para el seguimiento de la sequía:

- Los satélites meteorológicos, como METEOSAT, son utilizados en predicción.
- NOAA/AVHRR; IRS/WiFS, SPOT/Vegetation se usan para el seguimiento y alerta temprana (ámbito nacional).
- MODIS y MERIS son utilizados para el seguimiento de la sequía (ámbito nacional).

- Landsat, DMC, IRS o SPOT se utilizan, en el marco de Sistemas de Información Geográfica, como fuente de datos en Sistemas de Gestión de Sequías.

Los 3 primeros son utilizados sobre todo por Agencias e Institutos meteorológicos, mientras que los últimos, con una mayor resolución espacial, son utilizados en la Planificación Hidrológica.

Existen dos tipos de metodologías para determinar la sequía utilizando imágenes de satélite. Una de ellas está basada en la teoría de la Inercia Térmica Aparente (*ATI, Apparent Termal Inertia*), utilizando la banda térmica del sensor y la otra, en los Índices de Vegetación.

La vegetación bajo condiciones de sequía se encuentra en una situación de “*stress*”, en la que las condiciones de la hoja cambian sustancialmente. Estos cambios permiten realizar un seguimiento de la sequía ya que se ven reflejados en una respuesta espectral distinta a la que tendría ese mismo cultivo en condiciones hídricas normales (figura 9).



Figura 9. Clasificación en distintos grados de afectación de la sequía en cultivos de cítricos en la Región de Murcia

Por otro lado, el seguimiento, mediante teledetección, de las áreas regadas en cada momento a lo largo del año hidrológico, permite realizar una gestión eficiente de la demanda de agua “*casi*” en tiempo real, optimizando el volumen de agua embalsado.

CONCLUSIONES

El concepto de aplicación operativa de la teledetección en la Planificación y Gestión de recursos hídricos, viene ligado a la existencia de una necesidad real por parte de un usuario, en la implementación de

la legislación vigente (Directiva Marco del Agua, Ley de Aguas, Reglamento del Dominio Público Hidráulico,...). Además, la teledetección debe proporcionar una eficiencia temporal y una relación positiva entre información generada y coste económico, frente a otras técnicas convencionales (ortofotografía, estadísticas y campañas de campo).

De las muchas aplicaciones que existen en el uso de la teledetección en hidrología, sólo unas pocas pueden ser consideradas operativas. Sin embargo, todo esto está cambiando rápidamente con la aparición de nuevos satélites, con modelos de adquisición que permiten acceder a los datos en horas, manteniendo resoluciones espaciales en torno a los 20-30 metros, y que pueden ser complementados localmente con datos multiespectrales de muy alta resolución provenientes de aviones y satélites (SPOT, QuickBird, IKONOS, KOMPSAT...).

Además, el desarrollo de la geoinformación en España, con fuentes de datos como el SIGPAC o SIOSE, son un complemento ideal para la extracción de la información dinámica que nos proporcionan los datos de satélite.

Las principales características que avalan la técnica de teledetección en la Planificación y gestión de recursos hídricos son:

- *Objetividad.* Los datos suministrados son imágenes digitales (representación de un objeto mediante una matriz numérica bidimensional) obtenidas por agencias espaciales internacionales (ESA, NASA, etc...) y son accesibles comercialmente por cualquier ciudadano.
- *Continuidad de los datos.* Los datos aportados por los satélites no son datos extrapolados o interpolados a partir de observaciones puntuales, como ocurre con las técnicas estadísticas, sino que son una discretización del espacio continuo observado, en unidades que se denominan píxel (de la contracción inglesa: *picture element* o elemento de la imagen) y que generan una imagen digital.
- *Periodicidad de las observaciones.* Debido a los modelos orbitales de los satélites, éstos sobrevuelan la misma zona cada cortos periodos de tiempo, por lo que nos permiten obtener observaciones periódicas de una zona. La potencialidad de la técnica se traduce en que con los satélites actuales en órbita, la serie Landsat aporta una observación sobre una zona concreta cada 16 días o lo que es lo mismo, unas 22 observaciones al año o 440 observaciones en los últimos 20 años. Los satélites de la serie SPOT, lo hacen cada 26 días

o 14 veces al año o 280 veces en los últimos 20 años. Quizá esta característica sea más evidente si lo comparamos con la ortofoto digital disponible para el territorio español, donde, para los últimos 20 años contamos, de modo general, con ortofoto del año 1987 (vuelo interministerial), 1997 (SIG Oleícola) y 2001-2002 y 2006 (SIG-PAC).

- *Multiespectralidad de la observación.* Los sensores a bordo de los satélites captan los datos no sólo en la región del espectro visible (que es la que capta el ojo humano o la fotografía aérea), sino también en las regiones espectrales del infrarrojo, lo que nos permite “ver” cosas invisibles para el ojo humano.
- *Observación multiescala.* Con los satélites actualmente en órbita, pueden abordarse estudios desde escalas 1:150.000 (a partir de imágenes con 30 metros de resolución espacial, para un error máximo tolerable de 0,2 mm); a escalas 1:3.000 (a partir de imágenes QuickBird con 60 centímetros de resolución espacial).
- *Bajo coste de adquisición de los datos.* Los precios de adquisición de imágenes de satélite varían de una misión (Landsat, SPOT, QuickBird...) a otra, e incluso de si se trata de una imagen actual o de hace 10 años, pero oscilan desde los 23 €/Km² de QuickBird, a los 2,00 €/Km² para una imagen SPOT programada con 2,5 metros de resolución espacial, a los 0,05 €/Km² de una imagen Landsat actual, con 7 bandas espectrales y 30 metros de resolución espacial. En la actualidad, el Plan Nacional de Teledetección, coordinado por el Instituto Geográfico Nacional del Ministerio de Fomento, trabaja para que las Administraciones Públicas accedan gratuitamente a gran parte de estas fuentes de datos desde satélite.

AGRADECIMIENTOS

Sin unos usuarios con unas necesidades identificadas y abiertos a la innovación, las aplicaciones operativas de la teledetección difícilmente serían posibles. Por eso, nuestro agradecimiento a: Víctor Arqued, Jefe de la OPH del Duero; a Samuel Moraleda, César Morugán y Emilio Luna, de la Comisaría de Aguas del Guadiana; a Manuel Omedas y Pepe Losada, de la OPH del Ebro; a Mario Urrea y Francisco Almagro, de la OPH del Segura; a Manuel Erena del IMIDA y a Alfredo Barón y Concha González Casasnovas, de la Conselleria de Medi Am-

bient del Govern de les Illes Balears

REFERENCIAS

- ENGMAN, E.T. y GURNEY, R.J.. (1991).- Remote Sensing in Hidrology. *Chapman and Hall. Remote Sensing Applications. Cambridge. 225 pp.*
- ESTRELA, T.; MENÉNDEZ, M.; DIMAS, M.; MARCUELLO, C.; REES, G.; COLE, G.; WEBER, K.; GRATH, J.; LEONARD, J.; BERING, N.; FEHÉR, J. Y CONSULT, V. (2001).- Sustainable water use in Europe. Extreme hydrological events: floods and droughts. *Environmental issue report, n° 21. EEA. Copenhagen.*
- LOPEZ-CAMACHO, B. (1999) – El control indirecto de las extracciones de agua subterránea. *En BALLESTER, A.; FERNÁNDEZ, J. A. Y LÓPEZ GETA, J. A. (1999): Medida y Evaluación de las extracciones de agua subterránea. ITGE. Madrid. pp:247-252. ISBN: 84-7840-361-2*
- LOSADA, J. A.; MONTESINOS, S.; OMEDAS, M.; GARCÍA VERA, M. A. y GALVÁN, R. (2004).- Cartografía de las inundaciones del Ebro en Febrero de 2003: Trabajos de Fotointerpretación, Teledetección y Análisis SIG en el GIS-Ebro. *XI Congreso de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección, Murcia.*
- MONTESINOS, S. (1990).- Teledetección: su utilización en la cuantificación y seguimiento de recursos hidráulicos aplicados al regadío. *Informaciones y Estudios n° 51, MOPU (ed), 106 pp.*
- MONTESINOS, S.; MANZANO, R.; DE STEFANO, L.; LUNA, E. Y ARAGÓN, JR. (1999a).- Reconocimiento de aprovechamientos en regadío con aguas subterráneas: discusión, metodología y marco legal. *Revista de Teledetección n° 12 pp. 39-42*
- MONTESINOS, S.; MANZANO, R.; DE STEFANO, L.; LUNA, E. Y ARAGÓN, JR. (1999b).- Control mediante teledetección del régimen de extracciones de aguas subterráneas en acuíferos sobreexplotados. *En CASTAÑO, S. Y QUINTANILLA, A. Eds (1999). Teledetección. Avances y Aplicaciones. Diputación de Albacete. Albacete. pp: 123-126.*
- MONTESINOS, S. BEA, M. y BENÍTEZ, A. (2003): “Application of Remote Sensing techniques for the groundwater extractions management in Mancha Occidental aquifer”, VI Inter-Regional Conference on Environment - Water, Albacete, 2003, pp 151.
- POZO DE CASTRO, M. (1999) – Los usos del suelo en la gestión de los recursos hídricos mediante sistemas de teledetección. *En BALLESTER, A.; FERNÁNDEZ, J.A. Y LÓPEZ GETA, J.A. (1999): Medida y Evaluación de las extracciones de agua subterránea. ITGE. Madrid. pp:105-124. ISBN: 84-7840-361-2*