

APLICACIONES DE LA TELEDETECCIÓN Y SIG AL CONTROL Y CUANTIFICACIÓN DE LAS EXTRACCIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA

Santiago CASTAÑO FERNÁNDEZ*

(*) Director de la Sección de Teledetección e Hidrogeología. Centro Regional de Estudios del Agua. Instituto de Desarrollo Regional. Universidad de Castilla-La Mancha
02071 ALBACETE

RESUMEN

La combinación de las técnicas de Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica permiten el desarrollo de una metodología operativa para cuantificar, con un coste relativamente bajo, las extracciones de agua subterránea para riego agrícolas.

El sistema se basa en la obtención de una clasificación de cultivos mediante el análisis multitemporal de imágenes del satélite LANDSAT sensor TM. Seguidamente estos datos se integran en un Sistema de Información Geográfica y se cruzan con los valores de necesidades de riego por cultivo, calculados en base al conocimiento diario de las precipitaciones y de la evapotranspiración, lo cual permite conocer la distribución espacial y temporal de los consumos hídricos para uso agrícola. Conociendo las superficies regadas con aguas superficiales y los aportes de las mismas, se extraen directamente los volúmenes de aguas subterráneas empleados.

Estos trabajos se desarrollan en el marco del proyecto de la U.E. (DG XII): Application of Space Techniques to the Integrated Management of a River Basin Water Resources (ENV4-CT96-0366) y del proyecto del Programa Nacional de Recursos Hídricos (CICYT): Diseño de un sistema de gestión integral del acuífero 08.29 (Mancha Oriental) como elemento de apoyo en la toma de decisiones sobre el aprovechamiento óptimo de sus recursos. (HID-96-1373)

Palabras Clave: *Hidrogeología, Teledetección, S.I.G., Castilla - La Mancha.*

INTRODUCCIÓN

El mayor consumo de agua que se realiza en el mundo es, sin duda, el destinado a usos agrícolas. En el caso de España, el Anteproyecto de Ley del Plan Hidrológico Nacional (29-09-

1992), así como el informe del MOPT para el Consejo Nacional del Agua (03-11-1992) estiman que la agricultura absorbe un 80% del consumo total de agua de nuestro país. En los territorios del arco mediterráneo, con un clima seco y templado y unas precipitaciones muy localizadas temporalmente, las extracciones para regadío constituyen una de las principales salidas de muchos acuíferos. En Castilla-La Mancha se ha producido en los últimos años la transformación de extensas superficies de cultivos de secano a cultivos de regadío basándose casi exclusivamente en la explotación de aguas subterráneas. El incremento de extracciones, intensificado a partir de la década de los 80, unido a la severa sequía padecida en los últimos años, ha motivado un descenso continuado de los niveles piezométricos en los diferentes sistemas acuíferos de La Mancha, con importantes consecuencias medioambientales, como la desecación de varios tramos del río Júcar en los veranos de 1995 y 1996.

La evaluación de estas extracciones es compleja y dificultosa, puesto que la regla general es la inexistencia de contadores en los pozos o incluso la proliferación de pozos no inventariados. En los casos en los que la sobreexplotación del acuífero provoca conflictos entre la administración y los usuarios el problema se agrava. No obstante, su cuantificación es sumamente importante, por no decir imprescindible, para los planificadores, los técnicos e incluso los usuarios de las aguas subterráneas; interesa no sólo conocer la cuantía, sino también la distribución espacial de las captaciones y de los retornos de riego.

Las técnicas de teledetección posibilitan la cartografía de los diferentes cultivos de forma rápida y a un coste reducido, y cuando existe una cartografía de cultivos, con un conocimiento preciso de las prácticas agrícolas en la región, se puede realizar la evaluación de los volúmenes que se aplican para regadío y la distribución espacial de consumos y retornos, tanto en términos cuantitativos como cualitativos.

Desde la Universidad de Castilla-La Mancha, y aplicado concretamente a los Sistemas Hidrogeológicos 04.04 y 08.29, se está trabajando en la puesta a punto de un sistema de gestión que ayude tanto a los usuarios, regantes en su gran mayoría, como a los políticos responsables de la gestión hidráulica en la toma de decisiones que afecta a su aprovechamiento.

Estos trabajos se desarrollan en el marco del proyecto de la U.E. (DG XII): Application of Space Techniques to the Integrated Management of a River Basin Water Resources (ASTIMWR) (ENV4-CT96-0366) para el caso del acuífero de La Mancha Occidental y del proyecto del Programa Nacional de Recursos Hídricos (CICYT): Diseño de un sistema de gestión integral del acuífero 08.29 (Mancha Oriental) como elemento de apoyo en la toma de decisiones sobre el aprovechamiento óptimo de sus recursos. (GESMO) (HID-96-1373). En este trabajo tomaré como ejemplo de aplicación de la metodología diseñada el acuífero 08.29, en el que se da una circunstancia fundamental: la coordinación y organización de los regantes y usuarios para participar en la gestión y autocontrol de los recursos.

EL ACUÍFERO DE LA MANCHA ORIENTAL

La Unidad Hidrogeológica 08.29 (Mancha Oriental), se sitúa en el extremo oriental de la llanura manchega con una extensión de unos 8.500 km². El subsistema de Albacete ocupa una

extensión de 7.650 km², dos tercios de los cuales pertenecen a la provincia que le da nombre. Topográficamente, más de la mitad de su superficie es una extensa planicie desarrollada sobre materiales terciarios con una altitud media de 700 m. Esta llanura está bordeada por suaves relieves que, paralelamente a la tectónica, van aumentando su complejidad hacia el exterior de la zona. Hidrográficamente, el sistema pertenece a la cuenca del Júcar y su afluente el Cabriel, que lo atraviesan por su parte norte. La comarca está atravesada por el Acueducto Tajo-Segura, y en ella se encuentran los embalses de Alarcón y Contreras, elementos básicos en la regulación del río Júcar.

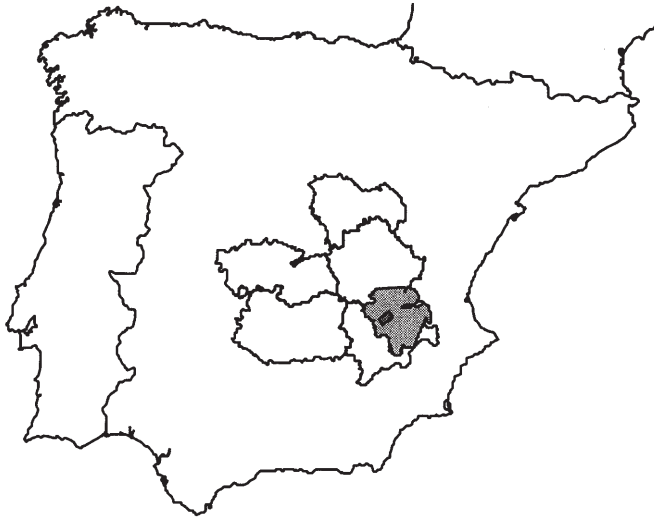


Fig. 1: Localización del sistema hidrogeológico Mancha Oriental.

Está limitado al norte por el paralelo aproximado de los embalses de Alarcón y Contreras, límite abierto a través del cual se estima una recarga de 80 hm³/año. Al Noroeste por la divisoria hidrogeológica de aguas Júcar-Guadiana. Al este y sudeste le ofrecen límite los afloramientos diapíricos impermeables del Triásico; al sur, la divisoria hidrográfica Júcar-Segura, con la problemática de las pequeñas cuencas endorreicas, como la de Pétrola. Por último, al oeste limita con la subunidad Jardín-Lezuza (08.30), de 1.200 km² y que descarga en él a través de los ríos Jardín, Lezuza y Quéjola.

La diversa problemática de algunos de estos límites, su significado o entidad a la hora de abordar planteamientos de gestión conjunta de las aguas, ha hecho que se hayan manejado entidades superficiales muy diversas a lo largo de los años por las diferentes administraciones: Acuífero 18, Sistema Hidrogeológico de Albacete o Acuífero de la Mancha Oriental por citar algunas. En el caso de este trabajo (proyecto GESMO) el límite utilizado es el del Sistema Hidrogeológico de Albacete (IGME, 1980) por ser la superficie sobre la cual se coordina la Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental (en adelante JCRMO), organismo que desde hace años se ha comprometido con el autocontrol de los usuarios para una correcta gestión

de los recursos.

Hidrogeológicamente el sistema 08.29 se puede considerar como un acuífero multicapa formado por la superposición de varias unidades acuíferas de naturaleza diversa (IGME, 1982):

La Formación CHORRO, un acuífero profundo, confinado en su mayor parte y constituido por dolomías y calizas (frecuentemente carstificadas) del Jurásico (parcialmente Dogger), con una potencia media de 250-350 metros y máxima de 400 m. Sus características hidráulicas son buenas, con trasmisividades medias desde 100 a 500 m²/h, que localmente pueden ser mucho mayores. La Formación Contreras lo separa del infrayacente acuífero Colleras, de mucha menor entidad, pero que permite hablar de una formación conjunta CHORRO - COLLERAS.

Suprayacente se encuentra el acuífero confinado Cretácico (Formación BENEJAMA), de edad Turonense - Senonense y una litología de dolomías y calizas, a veces carstificadas. Su potencia oscila entre los 50-150 metros y sus características hidráulicas son semejantes o algo inferiores al anterior.

Por último, el acuífero Mioceno; éste es un acuífero libre que se desarrolla sobre calizas lacustres de edad Pontiense y unos 150 metros de potencia máxima, con valores de transmisividad desde 50 a 300 m²/h.

El Sistema es drenado por los ríos Júcar y Cabriel, y recargado por infiltración de los ríos Jardín, Lezuza y Quéjola, así como de los flujos intermitentes del Valdemembra y del arroyo de Ledaña, e incluso en algún tramo y en alguna situación climática, por el propio Júcar. Las relaciones entre ríos y acuífero, si bien han sido abordadas por varios estudios (mereciendo especial mención el elaborado por el MOPU en 1988), aún no son bien conocidas.

Los estudios realizados hasta la fecha han puesto de manifiesto la existencia de una serie de problemas, consecuencia de la compleja tectónica que afecta a los materiales que constituyen el Acuífero. Estos problemas se pueden concretar en:

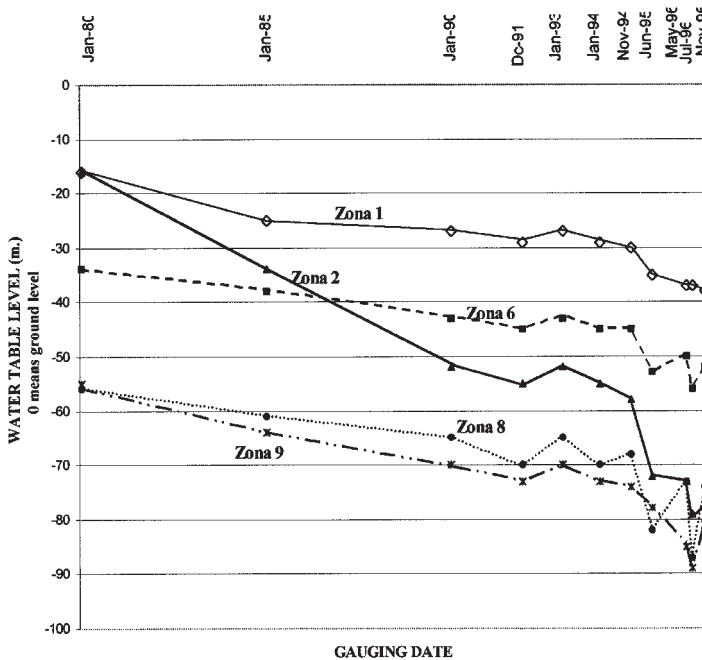
- A) Un desconocimiento de la geometría del acuífero, tanto horizontal como vertical, así como de las relaciones entre sus diferentes partes.
- B) Un deficiente conocimiento del sistema de flujo de las aguas subterráneas, su calidad química, y la disponibilidad del recurso.

Sobre el Sistema Hidrogeológico de Albacete se ha elaborado un modelo matemático de flujo subterráneo en 1975 dentro del “Estudio hidrogeológico de la zona oriental de La Mancha (Albacete). Segunda parte” (MOPU, 1975); se trata de un modelo diferencias finitas usando el programa Trescott del U.S. Geological Service. El objetivo de este modelo era mejorar el conocimiento regional de la evolución de los niveles del acuífero y las relaciones de éste con los caudales descargados por el Júcar; en consecuencia, está calibrado para ajustarse a la variación de drenaje del Júcar y a la evolución de la superficie piezométrica derivada del mismo. La última calibración del modelo ha sido realizada hasta 1991-92.

En la actualidad, el acuífero soporta cerca de 100.000 ha (datos de la JCRMO) de regadíos que

son la base socioeconómica de la región, además de satisfacer las necesidades de una población de más de 275.000 personas. Las cifras manejadas actualmente (sin que existan estudios que permitan su validación), sitúan la extracción anual, para estos dos usos, en unos 425 hm³ (402 hm³ para el regadío y 23 hm³ para el abastecimiento urbano). La importancia de las extracciones para regadíos reside en que constituyen el mayor volumen de agua puesto en juego en la explotación del acuífero. Según datos del I.G.M.E. (1980), en 1980, para el abastecimiento de 243.000 habitantes y el regadío de 37.500 has. se utilizaban 235 hm³/año, de los cuales el 77% (180 hm³) procedía de aguas subterráneas. De estos 180 hm³, el 88 % (160 hm³), se destinaba a cultivos en regadío. La Dirección General de Obras Hidráulicas del MOPU indica, en un informe de 1988 (MOPU, 1988), que para el período 1985-1986, de un total de 323 hm³ extraídos, se dedicaron 300 hm³ al regadío, lo que supone el 92,8 % del total.

Desde 1975 el Instituto Tecnológico Geominero de España viene realizando un proceso de supervisión de la evolución de los niveles piezométricos en el sistema. Con sus datos (ITGE, 1995, DIPUTACIÓN DE ALBACETE, 1997) hemos elaborado el diagrama de la *figura 2*, en la cual se



representa la evolución de los niveles para algunas subzonas del sistema acuífero.

Fig. 2. Evolución de los niveles piezométricos del acuífero.

En este diagrama se puede ver que existe un comportamiento cuantitativamente diferente de unas subzonas a otras, con la característica común de un descenso continuado, que en valor promedio es de 1,1 m/año. En algunas, especialmente en la margen derecha del Júcar, al sur de Albacete, el descenso ha sido mucho más intenso, llegando a 3 m/año. Estos descensos de los niveles piezométricos, además de los lógicos incrementos en los costes de bombeo y de reprofundización de pozos, han llegado a provocar afecciones al Júcar, que llegó a secarse en varios de sus tramos. Todo ello plantea la urgente necesidad de adecuar el ritmo de extracciones a

los recursos sostenibles, ya que en otro caso el camino conduce, de continuar la actual dependencia de la agricultura respecto de las aguas subterráneas, a una sobreexplotación. Un primer paso en la dirección indicada se ha empezado a dar al establecer la JCRMO planes de explotación del acuífero que limitan los volúmenes a extraer por explotación agrícola, lo que supone una primera regulación.

METODOLOGÍA

Metodológicamente la teledetección está fundada en el análisis del espectro electromagnético y consiste en un conjunto de técnicas que permiten detectar a distancia las variaciones en la emisión, reflexión y absorción de las ondas electromagnéticas por los constituyentes de la superficie terrestre. Por ello, la Teledetección no nos permite ver o determinar directamente el volumen de agua que un agricultor extrae del subsuelo. Lo que sí nos permite, con gran precisión y rapidez, es conocer los tipos de cultivos que existen y sus extensiones; incluso si se riegan mucho o poco. Es decir, fijar un aspecto básico de los estudios hídricos: el conocimiento de las superficies cultivadas de una región. En el caso que nos ocupa, al tratarse de superficies relativamente extensas, la Teledetección constituye una herramienta de gran utilidad (MORAN et al., 1997; GONZALEZ-ALONSO y CUEVAS, 1997) como fuente de información agrícola (MONTESINOS, 1990).

Actualmente el sensor más útil para este tipo de estudios es el Tematic Mapper (TM), montado sobre plataforma LANDSAT. El uso de la teledetección y concretamente del análisis de los datos de este sensor para el estudio, clasificación y seguimiento de los cultivos de regadío está ampliamente documentado en la bibliografía. En nuestro caso lo hemos utilizado en diferentes investigaciones con excelentes resultados (CASTAÑO et al. 1995, 1997; MONTESINOS et al. 1997; QUINTANILLA et al. 1997.) Radiométricamente presenta una resolución espectral de 7 bandas y una resolución espacial de 30 m de lado para 6 de las bandas y de 120 m para el canal térmico (banda 6). Su resolución geométrica (30m) es suficiente para estudios agrícolas e hídricos, en superficies relativamente extensas y con el tamaño medio de parcelas que existe en La Mancha. A este respecto, sus características son idóneas para la cuantificación a escalas de 1:100.000 (en ciertos casos hemos conseguido buenos resultados a escalas 1:50.000). Es, además, el más adecuado en una relación de coste-calidad-precisión de los resultados.

Es el otro elemento de la ecuación el que nos permite aproximarnos a la cuantificación de los volúmenes de agua: un Sistema de Información Geográfica. Los S.I.G., registran la información de la localización, forma y atributos de las entidades geográficas, pero incluyen además la capacidad de analizar las relaciones topológicas entre estas entidades. Esta cualidad es la que hace de los S.I.G. una herramienta capaz de analizar y manipular datos como apoyo para la toma de decisiones en la gestión del medio físico. En nuestro caso es una herramienta informática mediante la cual podamos integrar y cruzar los miles o millones de datos sobre cultivos obtenidos por Teledetección con las necesidades hídricas de dichos cultivos, los valores de precipitación, evapotranspiración, aportes de aguas superficiales, sistemas de riego, etc. para configurar una estructura de datos que refleja con gran similitud la realidad. La teledetección se ve potenciada al integrarla en un S.I.G. (ALARIC, 1994; MENENTI et al. 1996), y el conjunto se configura como una herramienta idónea para la toma de decisiones que conduzcan a la mejor gestión de los recursos hídricos

disponibles (BRADLEY, 1993; GOODCHILD, 1993).

Metodología desarrollada

Como hemos comentado en apartados anteriores, en la zona que tratamos la mayor cantidad de agua utilizada se aplica a satisfacer las demandas agrícolas, es decir, a permitir cultivos en regadío. Es siempre un elemento conflictivo el intentar controlar los volúmenes de agua extraída, sobre todo cuando un elevado porcentaje de los sondeos para extracción se encuentran sin legalizar; por ello es necesario aplicar métodos de control indirecto, como el conocimiento y cuantificación de los cultivos en regadío, para derivar los volúmenes hídricos necesarios para su desarrollo. Desde hace varios años, este grupo de investigación trabaja en el desarrollo de una metodología operativa que permita, con un margen de error aceptable, la cuantificación de las extracciones de aguas subterráneas a partir de la identificación y discriminación de los cultivos en regadío de la zona. Conociendo además las necesidades hídricas de cada cultivo, se puede realizar una aproximación a la cuantificación del volumen de agua que se ha empleado en los mismos. Existen, no obstante, dos correcciones que hay que introducir en el cálculo:

- A) En primer lugar, si existen cultivos regados con aguas superficiales, esta cuantificación debe ser corregida de los volúmenes empleados, obteniendo una primera aproximación a los volúmenes de agua extraídos.
- B) En segundo lugar, en el proceso es necesario tener en cuenta los valores de precipitación y evapotranspiración existentes en la zona en ese período. En este sentido, el Servicio de Asesoramiento de Riegos de Albacete (SAR) elabora diariamente e informa a los regantes de las necesidades de riego para los diferentes cultivos, mediante un cálculo en el que intervienen los datos climatológicos medidos en estaciones automatizadas y la evapotranspiración existente (calculada según la fórmula de Penman modificada) (LÓPEZ y LÓPEZ, 1993), por lo que los datos acumulados de consumos hídricos anuales por cultivos ya están, en buena medida, corregidos de estos dos parámetros, aunque no descartamos la conveniencia de una segunda corrección.

El método desarrollado nos permite conocer no solo los volúmenes globales extraídos, sino también la distribución espacial de las extracciones y el ritmo de extracción en cada zona. Obviamente, estas estimaciones de extracciones de agua en base a los cultivos, además de ser un dato imprescindible para una correcta gestión de la zona, pueden ser utilizadas en la modelización hidrogeológica del acuífero (MAIDMENT, 1993), permitiendo establecer su balance hídrico. Es importante destacar que todo el sistema se basa en una premisa: los agricultores de la zona optimizan (por su propio interés y beneficio), el uso del agua subterránea extraída. En este sentido la Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental, el Instituto Técnico Agronómico Provincial de Albacete y el Departamento de Producción Vegetal de la Escuela Superior de Ingenieros Agrónomos de Albacete llevan años empleados en desarrollar y aplicar sistemas de riego que optimicen la gestión del agua.

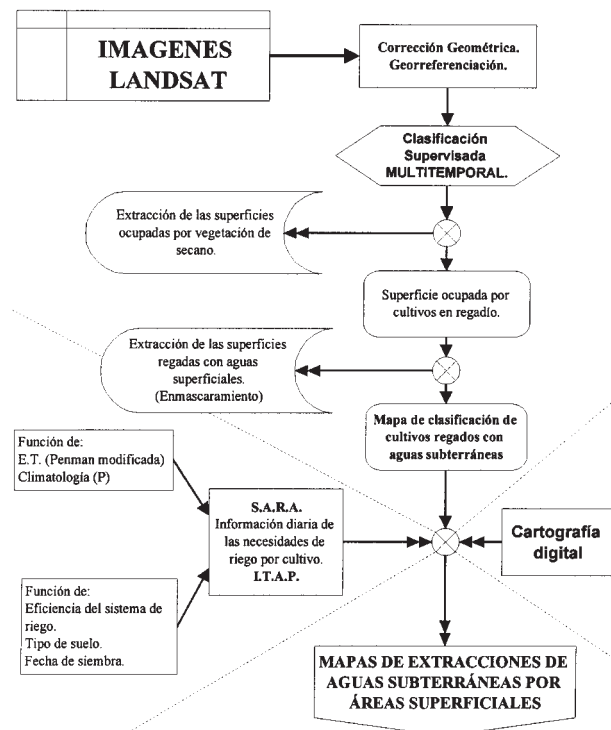
Las etapas del método elaborado son las siguientes:

- A) Adquisición de escenas Landsat TM multitemporales (de las fechas adecuadas a los

desarrollos fenológicos de los cultivos de la región) que cubran el área de estudio. La variable calidad de las imágenes, motivada por el diferente estado de la atmósfera y la cobertura nubosa nos obliga a una previa revisión y selección de las mismas, así como a una serie de correcciones posteriores para su homogeneización.

- B) Corrección geométrica y georreferenciación, es decir, corrección de las distorsiones geométricas de la imagen y asignación de coordenadas geográficas a cada punto de la misma. La corrección geométrica se realiza aplicando polinomios de segundo grado completos; se asignan un mínimo de 100 puntos de control para cada imagen, admitiendo un error medio cuadrático inferior a 1 píxel. La interpolación se lleva a cabo por el método del vecino más próximo o mediante convolución cúbica, dependiendo de los posteriores usos de la imagen.

- C) El siguiente paso es la clasificación de los cultivos. El procedimiento desarrollado (CALERA et al. 1998) es el de clasificación supervisada multitemporal combinando algoritmos de máxima probabilidad y criterios de decisión en árbol (FRIEDL and BRODLEY, 1997). Estos se basan en los diferentes ritmos de crecimiento y desarrollo fenológico de los cultivos, que se reflejan en el Índice de Vegetación Normalizado NDVI, de amplio uso en técnicas de teledetección (GILABERT, 1996). El programa utilizado para los tratamientos digitales ha sido ILWIS (Integrated Land and Water Information



Sistem).

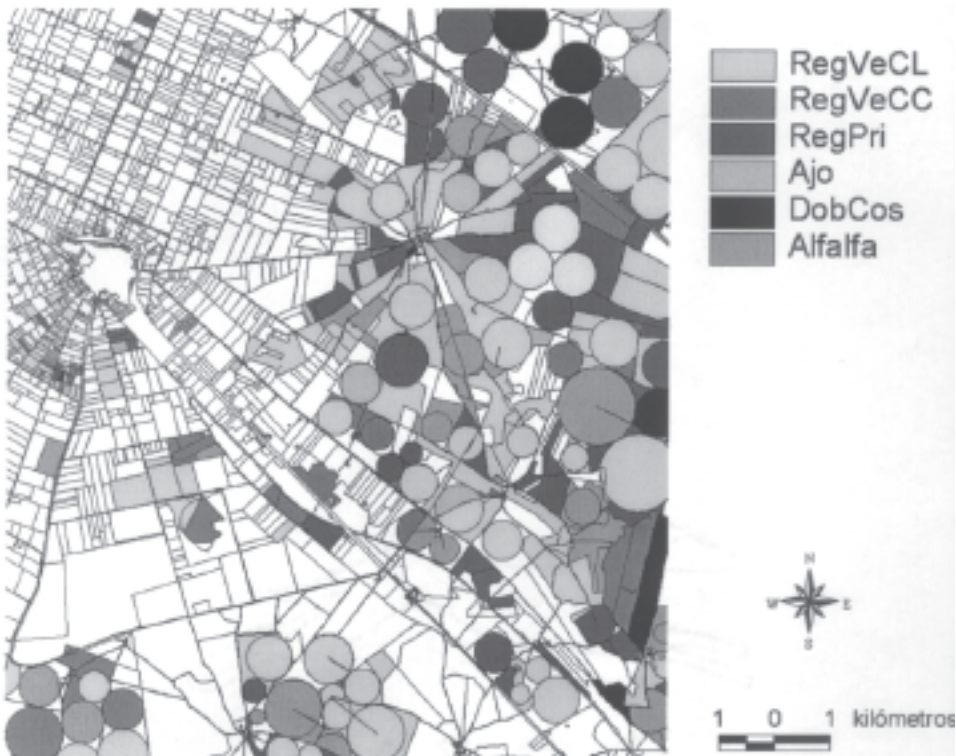
En esta etapa es imprescindible un exhaustivo conocimiento del terreno y de los momentos claves del desarrollo fenológico de los cultivos de la zona; conocimiento que impida cometer errores en el momento de la definición de las clases.

Fig. 3. Diagrama de flujo de las etapas de la metodología desarrollada.

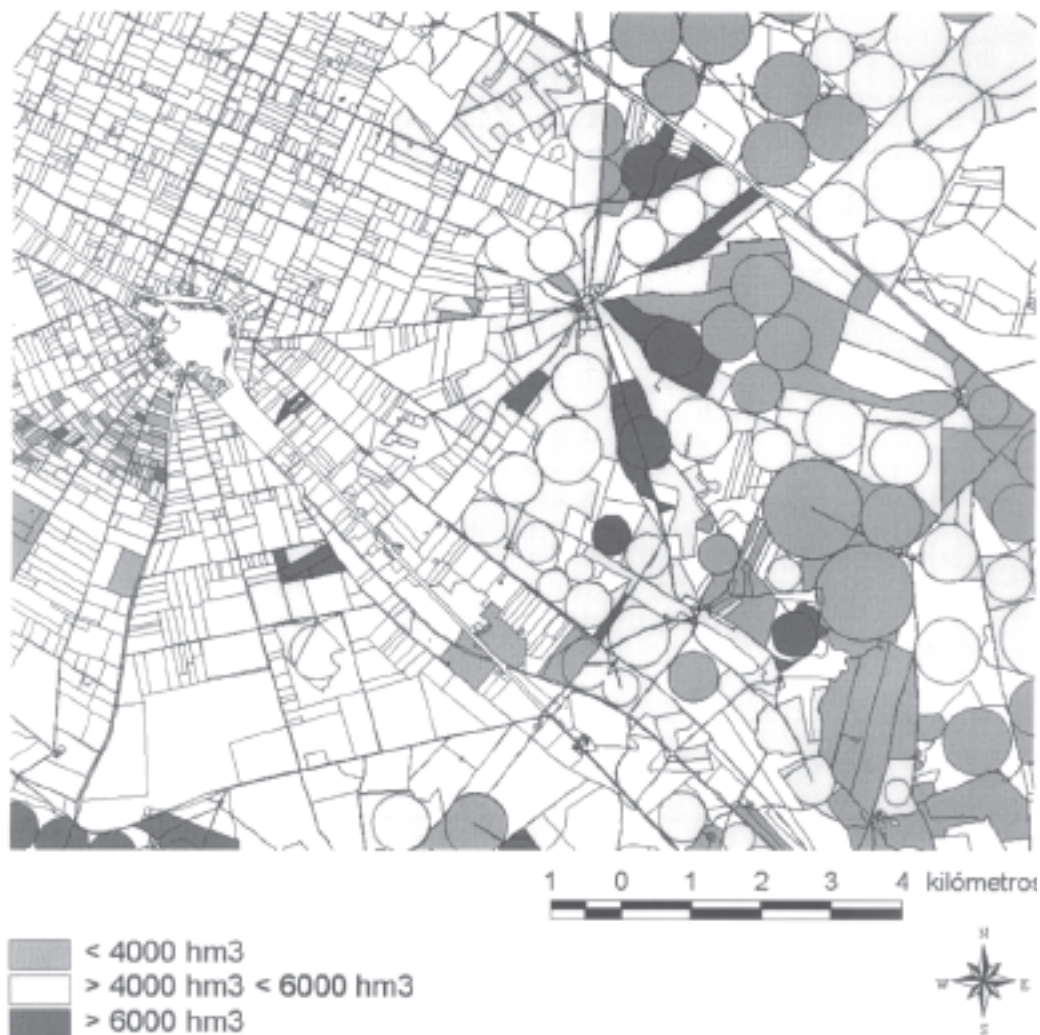
En estos momentos la metodología desarrollada y puesta a punto en la Sección (CALERA et al. in lit.) nos permite, utilizando tres imágenes por año (primavera y verano) la clasificación de los cultivos herbáceos de regadío agrupándolos en las siguientes clases:

- Cultivo de regadío de primavera (cebadas, trigo, ajos, veza, ...)
- Cultivo de regadío de verano de baja dotación (cebollas, girasol, hortícolas,...)
- Cultivos de regadío de verano de alta dotación (maíz, remolacha,..)
- Cultivos de regadío no estacionales (alfalfa, ..).
- Dobles cosechas.

En la *figura 4* se puede observar el mapa de clasificación de cultivos de regadío, obtenido mediante este método para el año agrícola de 1997 en la zona occidental del acuífero, donde se concentran la inmensa mayoría de los regadíos. La imagen clasificada se ha verificado con datos de las inspecciones llevadas a cabo por la Junta Central de Regantes.



En un primer análisis sobre 106 parcelas, han sido correctamente clasificadas, según las clases anteriormente mencionadas, un 85%. Un 12% de las mismas han sido clasificadas



como clases similares (confusiones entre regadío de verano de baja dotación, regadío de primavera y dobles cosechas), y sólo un 3% de parcelas (aquellas de pequeño tamaño), identificadas en los trabajos de campo como regadío, han sido incorrectamente asignadas como secano o viceversa.

Fig. 4. Detalle del mapa de clasificación de cultivos de la zona de Barrax, obtenido por teledetección para 1997. Sobre el mapa se ha superpuesto el catastro de rústica digital.

Fig. 5. Parcelas clasificadas según el consumo medio por explotación:

- (a) explotaciones con un consumo medio inferior a 4000 m³/ha;
- (b) explotaciones que se encuentran entre 4000 y 6000 m³/ha;
- (c) explotaciones que tienen un consumo superior a 6000 m³/ha.

D) La imagen clasificada obtenida en formato ráster, se integra en un S.I.G., desarrollado sobre

ARCVIEW. La capa base de georreferenciación es el catastro de rústica, sobre el que se establecen todas las relaciones espaciales subsiguientes. El código de identificación catastral es el campo que permite correlacionar todas las capas, con lo que se puede trabajar con atributos de nivel de parcela o subparcela, como: titular administrativo, superficie, sistema de riego, eficiencia del sistema, evolución multianual de cultivos, estimación de consumos, procedencia de las extracciones,... etc. Las características de este S.I.G. se han determinado en colaboración con la JCRMO para precisar el diseño del sistema más adecuado a las necesidades de los usuarios. El sistema integra y procesa información espacial y temporal de diferentes fuentes: inventarios de cultivos, sistemas de riego, titulares de explotaciones agrícolas, procedencia del agua... , basándose en teledetección, trabajo de campo o en expedientes administrativos. Su empleo permite visualizar la información en mapas, lo que la hace más manejable y asequible para personal no especializado.

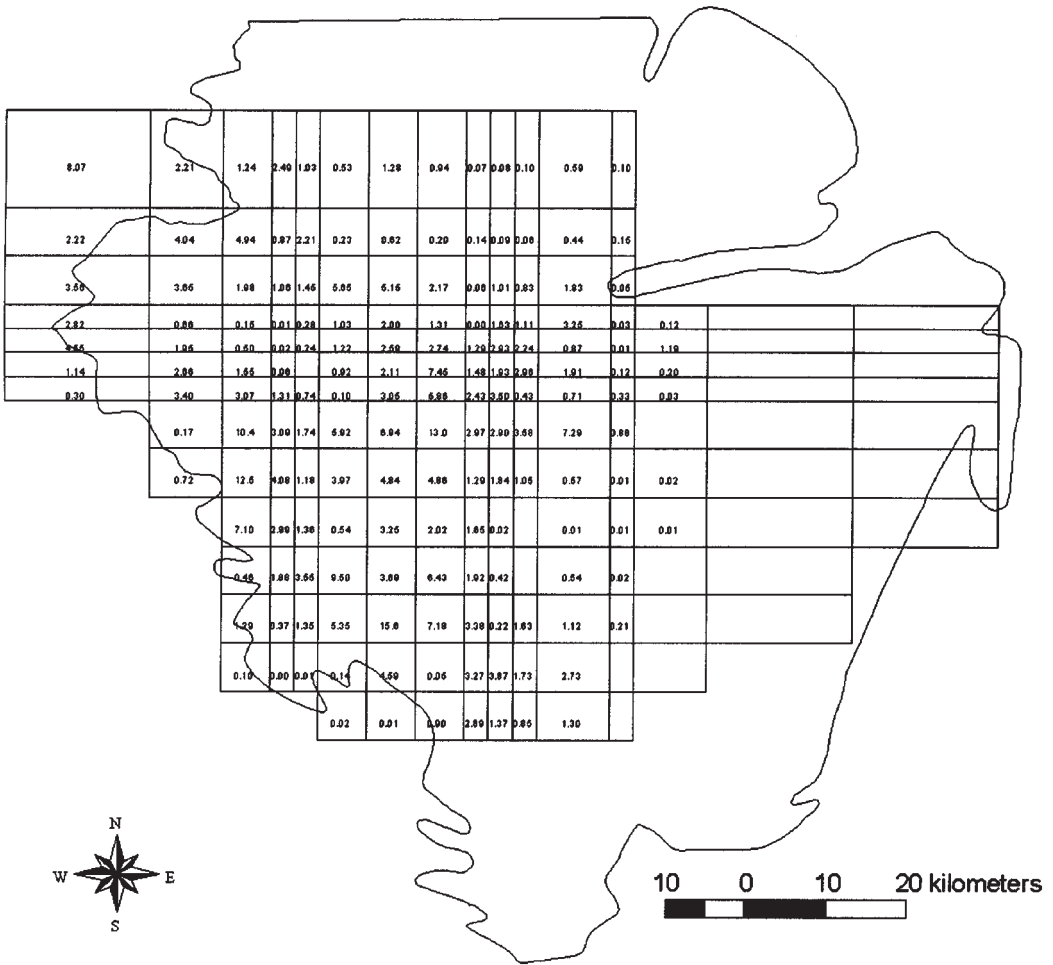
Este proceso de implementación de información se está aplicando de forma intensiva sobre una zona piloto de 40.000 ha de superficie (de las que aproximadamente 14.000 ha son de regadío), seleccionada dentro del proyecto GESMO como representativa del acuífero (MARTIN DE SANTA OLALLA, 1997).

F) El resultado final de todo el proceso, mediante la introducción de cualquier otro tipo de cartografía digital, es la generación de mapas temáticos que especifican la distribución cuantitativa y cualitativa, así como la evolución temporal, de las extracciones de aguas subterráneas, agrupándolas en las unidades superficiales que deseemos.

La herramienta informática final permite:

- Efectuar el análisis por explotaciones administrativas, estimando el consumo medio o global de éstas; aspecto importante a la hora de realizar el control y seguimiento del plan de explotación que anualmente se fija para el acuífero.
- Estimar las extracciones para una zona delimitada espacialmente (un término municipal, la retícula de una malla o las subzonas hidráulicas), dato básico para una modelización hidrogeológica. Sirva como ejemplo el análisis espacial que hemos realizado, siguiendo el proceso aquí expuesto, de las extracciones para cada una de las retículas de la malla que se utiliza en el modelo hidrogeológico del acuífero (*fig. 6*).

La inyección en el S.I.G. de tablas referentes a consumos por unidad de superficie y cultivo, así como de eficiencia en el aprovechamiento del agua, asociadas a los diferentes sistemas de riego y a su manejo, permite estimar las necesidades de agua por parcela; estimación a partir de la cual se establecen funciones de análisis. De esta forma pueden ser tenidas en cuenta las innovaciones tecnológicas que, bien en los cultivos o en los sistemas de riego, conduzcan a un menor consumo por unidad de superficie.

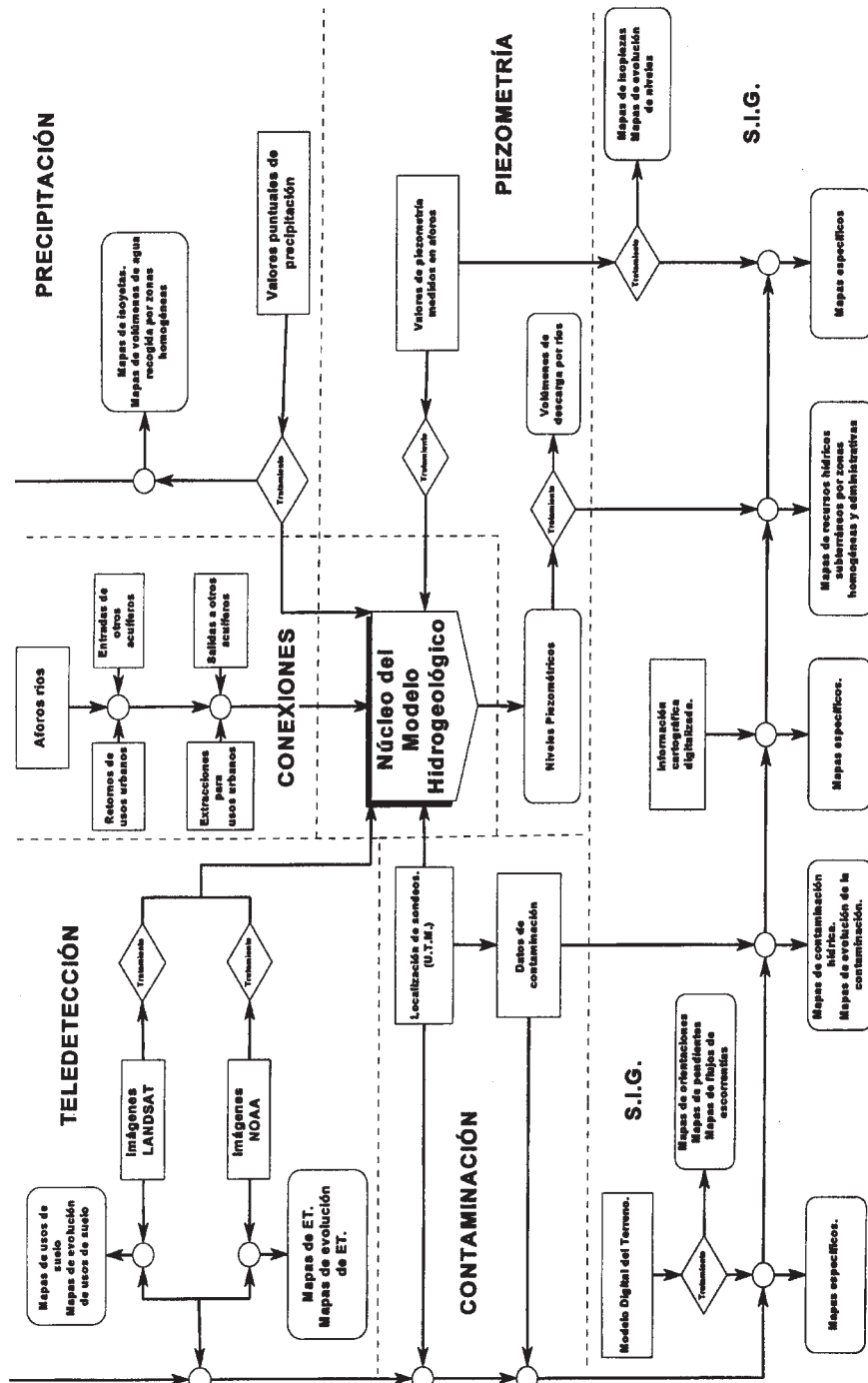


El cruce de los consumos por parcela con datos sobre la procedencia del agua, facilitaría el cálculo de las extracciones en el punto en que están situados los pozos, lo que, unido a las características de éstos, permitiría aproximarnos al conocimiento de las extracciones en relación con cada sondeo o grupos de sondeos, dato también de interés a la hora de considerar el funcionamiento hidrogeológico del acuífero. Desafortunadamente, este último análisis choca con la dificultad de conocer la localización real de todos los sondeos existentes.

Fig. 6. Estimación de las extracciones en hm³ para los cultivos en regadío existentes en 1996, obtenidos mediante teledetección, en cada retícula de la malla. En las retículas en blanco no se dispone de datos.

El futuro: Sistema de Información Hidrológica

Actualmente se continúa el desarrollo de estas líneas de trabajo, mediante la profundización en el conocimiento de los parámetros de los acuíferos que posibiliten la puesta en funcionamiento



de un Sistema de Información Hidrológico (S.I.H.) que permita modelizar el funcionamiento y la

gestión de todos los recursos hídricos de un acuífero

Este S.I.H. se estructura sobre un núcleo constituido por el modelo de funcionamiento hidrogeológico, y alrededor de él se habilitan diversas herramientas y algoritmos específicos de S.I.G. que permitirán obtener resultados zonificados aptos para su aplicación a la gestión de los recursos.

Fig. 7. Diagrama de flujo del Sistema de Información Hidrológico (S.I.H.).

CONCLUSIONES

El desarrollo de los proyectos y estudios citados nos ha permitido constatar las siguientes realidades, cara a una futura gestión integrada de los recursos hídricos de los acuíferos de Castilla-La Mancha:

1. En zonas como La Mancha, en las que su desarrollo está basado o ligado íntimamente a una explotación global de los acuíferos, se hace imprescindible la cuantificación de las extracciones de los mismos, que llegan a representar el 90% de los recursos hídricos de la zona.
2. Cualquier método que aborde la gestión racional de las aguas subterráneas debe de contar con los usuarios de las mismas. Las características de este recurso hacen imprescindible su participación para poder tener un mínimo de control o conocimiento de las extracciones.
3. Es necesario ampliar el conocimiento geológico (s.s.) e hidrogeológico de los acuíferos. Desconocemos en gran medida la geometría de los mismos y los valores reales de parámetros fundamentales, como permeabilidad o transmisividad. Este desconocimiento y falta de estudios hace que se manejen normalmente datos y cuantificaciones que no tienen más fundamento que la costumbre de su uso.

La metodología elaborada de cuantificación indirecta de las extracciones mediante Teledetección se configura como un magnífica herramienta dentro de un sistema de cuantificación mixto, en el que el tratamiento conjunto en un S.I.H. de los datos obtenidos a partir del consumo energético, balances hídricos, contadores y caudalímetros como elementos de testificación, contraste y control de los datos de teledetección permiten aproximarse a valores reales, independientemente del sistema de riego que en cada caso se aplique.

Esta metodología presenta importantes mejoras sobre los métodos tradicionalmente utilizados:

- I. Posibilita estudios de años anteriores, pues las imágenes de satélite están almacenadas y disponibles en cualquier momento, planteamiento inabordable desde cualquier otro método
- II. Es un método substancialmente más económico que cualquiera de los tradicionalmente utilizados mediante de toma de datos de campo.
- III. Es un método rápido. Una vez ajustado el proceso se pueden estar introduciendo en un modelo hidrogeológico datos parciales casi en tiempo real (depende de los plazos necesarios para la adquisición de las imágenes de satélite) y datos totales al final de

la campaña agrícola.

- IV. En zonas extensas, es un método más preciso que cualquiera de los habituales en lo referente a la cuantificación de las superficies ocupadas por los diferentes cultivos, siempre y cuando se disponga de datos de campo que permitan validar y corregir los resultados.
- V. En cuanto a la valoración de las extracciones de aguas subterráneas, el método es una aproximación a los valores reales, pero tanto más cercana a los mismos cuanto más asumido se tenga por parte de los usuarios el uso y la optimización de sistemas de riego eficientes, que no desperdicien agua. Esta es una situación real en el caso de los regantes de este acuífero, pero que quizás no sea aplicable sin otros elementos de ajuste en otras partes de España donde la filosofía del uso del agua por parte de los regantes no sea la misma.
- VI. Ante la ausencia o la inviabilidad de métodos alternativos, éste es un método (con todos los elementos de corrección que se deseen) siempre factible de aplicar. No obstante, como ya he indicado anteriormente, no es conveniente aplicarlo aislado, como único sistema de cuantificación, sino que debe ser apoyado, corregido, contrastado con datos de campo (inventarios, parcelas experimentales, contadores, etc. etc.).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALARIC, V. (1994): Realizing the Potential of Remote Sensing and GIS in Ecosystem Management Planning, and Policymaking. In: *Remote Sensing and GIS in Ecosystem Management*, V. Alaric (Editor), Islands Press, Washington, pp 346-352
- BRADLEY, R.I. (1993): *Geophysical information systems for agricultural decision support*. Agricultural Engineering, 48: 102-105.
- CALERA, A.; MEDRANO, J.; VELA, A. & CASTAÑO, S. (1998): *GIS Tool Applied to the Sustainable Management of Hydric Resources. Application to the Aquifer System 08-29*. Agri. Water Management. (Submitted).
- CASTAÑO, S.; GARCÍA, J.; QUINTANILLA, A. (1995): *Cuantificación y evolución temporal de la Superficie Regada en la Cuenca del Río Segura mediante técnicas de Teledetección*. Informe restringido. Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Consejería de Agricultura.
- CASTAÑO, S.; VELA, a. & FERNÁNDEZ, M. (1997): Control of irrigated lands and its relation with water table evolution: A survey on the system 08-29. *Workshop on the use of water in sustainable agriculture*. Actas del Workshop pp. 33-34. U.C.L.M. Albacete, 2-4 June 1997.
- DIPUTACIÓN DE ALBACETE, Servicio de Energía y Medio Ambiente. (1997): *Evolución de los niveles piezométricos en el sistema acuífero 08-29 de la Mancha Oriental* (unpubl.) 60 pp
- FRIEDL, M.A. & BRODLEY, C.E. (1997): *Decision tree classification of land cover from remotely sensed data*. Remote Sens. Environ., 61:399-409.
- GILBERT, M.A.; GANDÍA, S. & MELIÁ, J. (1996): *Analyses of spectral-byophysical relationships for a*

corn canopy. Remote Sens. Environ.,55:11-20.

- GONZALEZ-ALONSO F. & CUEVAS, J.M. (1997): *Remote sensing and agricultural statistics: crop area estimation in north-eastern Spain through diachronic Landsat TM and ground sample data*. Int. J. Remote Sensing, 1997, vol. 18, no 2, 467-470.
- GOODCHILD, (1993): The state of GIS. for enviromental problem-solving. In: *Environmental Modeling with GIS*. M.F. Goodchild, B.O. Parks, L.T. Steyaert (Editors). Oxford University Press. pp. 8-15.
- IGME, (1980): *El sistema hidrogeológico de Albacete. (Mancha Oriental): sus recursos en aguas subterráneas, utilización actual y posibilidades futuras*. 87 pp. Servicio de publicaciones. Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- IGME, (1982): *Proyecto de investigación de las infraestructuras hidrogeológicas en el sistema 18 y zonas adyacentes de la provincia de Cuenca*. Tomo I. (Informe no publicado).
- ITGE, (1995): *Evolución piezométrica de la unidad hidrogeológica 08-29 Mancha Oriental, en el periodo 1975- 1995* (Informe no publicado) 62 pp.
- LÓPEZ, P. y LÓPEZ, H. (1993): Servicio de asesoramiento de riegos. In: *Agronomía del Riego*, Ed. Mundi Prensa, Madrid.
- MAIDMENT, D.R. (1993): GIS and hidrological modeling. In: *Environmental Modeling with GIS*. M. F. Goodchild, B.O. Parks, L.T. Steyaert (Editors), Oxfor University Press, pp 8-15.
- MARTIN DE SANTA OLALLA, F.; BRASA, A.; FABEIRO, C.; FERNÁNDEZ, D. & LOPEZ, H. (1997): *Integrated management system of an aquifer in Castilla La Mancha, Spain. The role of Irrigation Advisory Service of Albacete*. Agric. Water Management. (Submitted)
- MENENTI, M.; AZZALI, S. & D'URSO, G. (1996): Remote Sensing, GIS and Hidrological Modelling for Irrigation Management. In: *Sustainability of Irrigated Agriculture* L.S. Pereira; R.A. Feddes; J.R. Gilley and B. Lesaffre (Editors), Kluwer Academic Publishers, Dordrech, pp 453-472
- MONTESINOS, (1990): *Cuantificación de la extracción de aguas subterráneas mediante proceso digital de imágenes Landsat TM. Aplicación al acuífero de la Llanura Manchega*. Tesis de licenciatura. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid.
- MONTESINOS, S.; DE STEFANO, L.; CASTAÑO, S.; NAVARRO, A.; QUINTANILLA, A.; VELA, A.; ARAGÓN. J.R. y LUNA, E. (1997): Aplicación de técnicas de observación de la Tierra a la gestión de los recursos hídricos de una cuenca (ASTIMWR). In: *Teledetección aplicada a la gestión de recursos naturales y Medio litoral marino*. Hernandez, C. y Arias, J.E. Eds. Santiago de Compostela. pp. 361-364.
- MOPU, Servicio Geológico (1975): Estudio hidrogeológico de la zona oriental de La Mancha (Albacete). Segunda parte. (Informe no publicado).
- MOPU, Servicio Geológico. (1988): Estudio de la explotación de aguas subterráneas en el acuífero de La Mancha Oriental y su influencia sobre los caudales del río Júcar. (Informe no publicado).
- MORAN, M.S.; INOUE, Y. & BARNES, E.M.(1997): *Opportunities and limitations for image-based remote sensing in precision crop management*. Remote Sens. Environm., 61. pp. 319-346
- QUINTANILLA, A.; CASTAÑO, S.; GARCÍA, 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. In: *Teledetección, Usos y aplicaciones*. pp. 39-46. Casanova J.L. y Justo, J.S. Eds.

Secretariado de Publicaciones. Univ. de Valladolid. Serie CIENCIAS, Valladolid.