

AGUA

TECNOLOGIA DEL

CAPTACIÓN, TRATAMIENTO, DISTRIBUCIÓN Y DEPURACIÓN DEL AGUA Y SU IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

AÑO XXIV - NUM. 305 - FEBRERO 2009 - I.S.S.N.: 211/8173

En este número:

Tratamiento por ósmosis inversa de las aguas subterráneas del Prat de Llobregat para consumo humano
Página 22

Ensuciamiento de membranas de ósmosis inversa por coloides. Estudio de la interacción entre la superficie de las membranas y las partículas coloidales
Página 32

Nanofiltración como tratamiento terciario en las depuradoras de aguas residuales urbanas. Comparación con la ósmosis inversa
Página 42

Regeneración de aguas grises mediante Biorreactores de Membrana, BRM, para su reutilización
Página 49

Algunas propuestas de actuación para la gestión de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén
Página 55

La gestión de las aguas subterráneas
Página 60

DEISA, UNA REFERENCIA GLOBAL EN INGENIERÍA DE AGUAS

INGENIERÍA DE AGUAS | GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES |
GESTIÓN DE AGUAS INDUSTRIALES



ÓSMOSIS INVERSA



DEPURACIÓN DE AGUAS URBANAS



TRATAMIENTO DE EFLUENTES INDUSTRIALES



deisa

DEISA
Edificio COMSA MEDIOAMBIENTE
Avda. de Roma, 25-27, E- 08029 BARCELONA - ESPAÑA
Tel. +34 934 286 800 / Fax +34 934 286 851
E-mail: deisa@deisa.es

GRUPOCOMSA
Desde 1891

www.comsa.com
www.deisa.es

Resumen

La Directiva Marco del Agua supone una gran mejora para la gestión y protección de los acuíferos en España, estableciendo la necesidad de realizar estudios para controlar las extracciones, contaminación y calidad a través de redes piezométricas y su relación con el entorno. El agua subterránea es más eficiente y barata que la superficial procedente de embalses y canales (a pesar de estar muy subvencionada) en España se aplica para regar el 30% de la superficie de riego (unos 3,5 millones de ha) con un crecimiento espectacular en los últimos 30 años, especialmente en zonas áridas o semiáridas. Supone el 20% del agua aplicada al riego.

Palabras clave:

Directiva marco del agua, aguas subterráneas, gestión, calidad/contaminación

Abstract**Groundwater management**

The Water Framework Directive is set to make a big improvement in the management and protection of aquifers in Spain by laying down the need to carry out studies to monitor extractions, pollution and quality through piezometric networks and their relationship with the environment. The use of groundwater is cheaper and more efficient than surface water from reservoirs and canals (in spite of the latter's being heavily subsidised). In Spain it is employed in watering 30% of the irrigated surface area (about 3.5 million hectares) and its use has grown spectacularly in the last 30 years, especially in arid and semi-arid regions. It accounts for 20% of the water used for irrigation.

Keywords:

Water Framework Directive, groundwater, management, quality/pollution

La gestión de las aguas subterráneas

(Primera parte)

Por **Andrés Sahuquillo**^{1,4}, profesor emérito; **Emilio Custodio**^{2,4}, profesor; **M. Ramón Llamas**^{3,4}, profesor emérito

¹Universidad Politécnica de Valencia

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Camino de Vera, s/n
46071 Valencia
Tel.: 963 877 058
Correo-e: asahuq@hma.upv.es

²Universitat Politècnica de Catalunya

Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica
Calle Jordi Girona, 1-3
08034 Barceñopoma
Tel.: 934 016 919
Correo-e: emilio.custodio@upc.edu

³Universidad Complutense de Madrid

Facultad de Ciencias Geológicas - Departamento de Geodinámica
28040 Madrid
Tel: 913 944 848
Fax: 913 944 845
Correo-e: mrlamas@geo.ucm.es
Skype: mrlamas
Internet: http://rac.es/2/2_ficha.asp?id=119&idN3=6&idN4=40

⁴Real Academia de Ciencias Matemáticas, Físicas y Naturales de España

Calle Valverde, 22
28040 Madrid
Tel: 917 014 230 / 231
Fax: 917 014 232 / 233
Correo-e: secretaria@rac.es
Internet: www.rac.es

1. Introducción

La aprobación de la Directiva Marco del Agua, DMA 2000, y de la 'directiva hija' de Aguas Subterráneas, DAS 2006, va a suponer un impulso muy importante y beneficioso para la gestión y protección de los acuíferos en España. La necesidad de conocerlos mejor va a requerir la realización de nuevos estudios e inventarios con mucha más profundidad y detalle que los realizados hasta ahora,

mejorar notablemente la red de observación de la cantidad y calidad, y aumentar de forma importante el número de profesionales con formación hidrogeológica en la administración hidráulica nacional, en las comunidades autónomas y en otras instituciones relacionadas con la gestión hídrica y la protección medioambiental.

El objetivo fundamental de la DMA, expuesto en su artículo 1, es conseguir un buen estado ecológico

de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas para 2015. En el artículo 4 se definen los objetivos medioambientales que en relación con las aguas subterráneas establece que los estados miembros habrán de aplicar las medidas necesarias para evitar o limitar la entrada de contaminantes y evitar el deterioro del estado de todas las masas de agua.

La orientación de la DMA es fundamentalmente ecológica y ambiental, aunque dedica un párrafo importante a los aspectos cuantitativos, que son los que preocupan más en los países mediterráneos más secos: 'garantizar el suministro suficiente de agua superficial o subterránea en buen estado (...)'. También es importante el artículo 9 de la Directiva -Recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua-, que aborda la recuperación de los costes de los servicios relacionados con el agua, incluidos los costes medioambientales y los relativos a los recursos, basada en el análisis económico de acuerdo con las normas que se describen en el Anexo III. Esto puede tener gran importancia para promover una utilización más eficiente de los recursos hídricos.



Molino de viento para elevar aguas subterráneas para uso agrícola.

1.1. El incremento de la explotación de las aguas subterráneas

A lo largo de todo el siglo pasado ha aumentado la utilización de las aguas subterráneas en todo el mundo, tanto para abastecimiento urbano como para el riego, en particular en la segunda mitad del siglo. Algunas de las ciudades más pobladas del mundo se abastecen mayoritariamente con aguas subterráneas. Entre ellas están México, Calcuta, Shangai, Buenos Aires, Dhaka, Manila, Pekín, París y Londres, y más de 4 millones de neoyorquinos se suministran del acuífero que hay bajo

sus pies en Long Island. En los países desarrollados la utilización del agua subterránea para usos urbanos es muy importante, siendo superior al 70% en muchos países de Europa. Es casi el 100% en Dinamarca y supera al 50% en los Estados Unidos. El riego con aguas subterráneas supera el 50% en la mayoría de los estados del Oeste de EEUU. En España se riegan con ellas un millón de hectáreas y suponen del orden del 20% del agua aplicada. En el Sureste de Asia, el norte de China y otros países, entre los que está México, se ha producido un aumento espectacular del riego con aguas subterráneas. (Burke, 2003), en un proceso que se ha denominado como revolución silenciosa (Llamas 2005; Llamas y Martínez Santos 2005; Fornés et al 2005) por haberse realizado por los agricultores pobres de esos países, sin apenas control ni ayuda técnica de las agencias de agua, ni subvenciones del estado o de organismos estatales. El agua subterránea es barata, fácilmente accesible y vital para dos mil millones de personas en todo el mundo. En general el coste real de las aguas subterráneas es mucho menor que el del agua proporcionada por presas y canales, que habitualmente está fuertemente subvencionada en la mayoría de los países, por lo que su precio al consumidor es general-



Surgencia de aguas subterráneas.



Bomba de mano para captar aguas freáticas.

mente menor, aunque no al conjunto de la sociedad. A pesar de ello los agricultores prefieren el agua subterránea. Las razones son que su uso depende exclusivamente del interesado sin necesidad de esperar turnos y, más importante, que el almacenamiento de los acuíferos proporciona una mayor seguridad en época de sequías, utilizando aguas subterráneas o haciéndolo conjuntamente con las superficiales. En Llamas y Martínez Santos (2005), Garrido y Llamas (2007) y Hernández-Mora et al (2007) se dan datos precisos y se analizan los costes del agua subterránea en España.

De este recurso depende el suministro de grandes urbes y zonas rurales, así como el riego de cerca de 130 millones de hectáreas en todo el mundo, tanto de productos agrícolas de gran valor, como es el caso de las áreas mediterráneas españolas, o de productos más básicos en países menos desarrollados. En las últimas décadas se han hecho enormes inversiones en la construcción de pozos, y elementos asociados, que han proporcionado grandes beneficios a sus usuarios y han contribuido a erradicar o mitigar la pobreza en muchas áreas. La disminución del precio del arroz y el grano, que bajó a un tercio y a la mitad respectivamente entre la década de 1960 y la de 1990, ade-

más de a los avances agronómicos se debe a la posibilidad de disponer de agua barata y segura en el Sureste de Asia (Giordano y Villholth, 2007). La India, donde se riegan casi 50 millones de hectáreas con aguas subterráneas, en comparación con los 17 millones de ha que se riegan con aguas superficiales, y se extraen más de 200 km³ de agua al año, ha pasado a ser un exportador importante de alimentos (Dains y Pawar 1987; Dhawan 1995; Llamas y Martínez Cortina 2002), y Bangla Desh ha conseguido recientemente su autoabastecimiento de productos agrarios, aunque en este último país los avances en cuanto al abastecimiento de agua poblacional y rural están contrapesados por el grave problema del contenido en arsénico del agua subterránea, que afecta a casi veinte millones de personas.

Los acuíferos, al tener un almacenamiento de agua muy grande en relación con sus recursos medios anuales, son poco vulnerables a los efectos de las sequías y su explotación puede mantenerse e incluso aumentar si fuera preciso en periodos secos. Deb Roy y Shah (2003) y Shah, (2005) atribuyen a esta seguridad el que los regantes de La India se hayan animado a realizar nuevas inversiones que han incrementado la eficiencia y rentabilidad de sus explotaciones. Este desarrollo se ha realizado sin ayudas económicas oficiales, excepto la subvención al precio de la energía en algunos gobiernos regionales en la India.

En contraste con lo expuesto, las agencias de agua gubernamentales de casi todos los países secos se han preocupado casi exclusivamente de la planificación, mantenimiento y control de las aguas superficiales, sin apenas preocuparse de las subterráneas. Esta actitud es lo que se denominó en 1972 como hidroesquizofrenia por Nace (Llamas 1975), y es común en muchas de las regiones áridas y semiáridas, incluso de algunas de las que se consideran habitualmente como las más avanzadas. Esa inhibición gubernamental

ha dado lugar a problemas de gestión en la utilización de los acuíferos, por lo general presentados al gran público de forma exagerada. El resultado es que en amplios sectores de la sociedad predomina la impresión de que las aguas subterráneas son un recurso muy frágil. 'Todo pozo termina por secarse o salinizarse' es uno de los falsos paradigmas mundialmente difundidos (Custodio, 2002). A veces estos problemas se han exagerado por grupos sin experiencia hidrogeológica o con intereses profesionales y económicos, o de poder, y han contribuido a crear 'hidromitos' de nefastas consecuencias (Custodio y Llamas, 1997), entre los cuales recientemente se ha añadido al falso símil de que el agua subterránea es como un pilar de arena, un recurso frágil propenso al colapso (Postel, 1999).

En dos libros recientes, Llamas y Custodio (2003), Sahuquillo et al (2005b), y en un número monográfico reciente del *Hydrogeology Journal* (HJ, 2006), se presentan más de 40 casos que muestran la gran importancia que tiene el uso intensivo de las aguas subterráneas en muchos países para la erradicación de la pobreza y para elevar el nivel de vida. Representan una ayuda crucial para conseguir los objetivos de la Declaración del Milenio de las Naciones Unidas contra la pobreza, de reducir a la mitad la proporción en el número de personas sin acceso a agua potable o con problemas de malnutrición.

1.2. Utilización intensiva de aguas subterráneas: problemas ambientales y económicos

El agua subterránea tiene un importante papel en la naturaleza y sustenta muchos de los servicios que se derivan de su manifestación en manantiales, ríos, lagos, humedales y áreas de freatofitas (Younger 2007; Custodio 2001, 2005b). También es esencial en muchas situaciones para atender las necesidades de agua de la humanidad de forma segura, ba-

rata y fiable, para usos urbanos, industriales y de riego. Es un recurso limitado y también vulnerable que debe ser gestionado para mantener los objetivos y tener controlados los efectos que se derivan de la explotación de los acuíferos. Si no hay un control efectivo y los acuíferos se utilizan anárquicamente pueden aparecer problemas serios. En acuíferos grandes o medianos los efectos tardan en manifestarse, a veces varias décadas, como consecuencia de la inercia que le proporcionan los grandes volúmenes de agua almacenados en los mismos. Si no se han previsto, toman por sorpresa a los responsables de la gestión de los recursos hidráulicos. En muchas ocasiones resultan inesperados aunque se hayan anunciado con antelación. Hay que inculcar en los responsables de la toma de decisiones, planificadores y responsables de la administración hidráulica, usuarios, juristas y educadores que la respuesta de los acuíferos a las acciones físicas de bombeos o recargas a las que se somete a los acuíferos es lenta (Custodio et al 2005). Y también es preciso que estos grupos entiendan que todavía es más lenta la respuesta ante las medidas para mitigar los problemas de contaminación y el elevado coste que suponen en la mayoría de los casos (Custodio 2007). Una explotación consciente tiene que tener en cuenta este hecho y la necesidad de realizar un control adecuado de la evolución de niveles, flujo y calidad química del agua subterránea (Llamas y Martínez-Santos 2005).

Los bombeos de los acuíferos disminuyen los niveles de agua en los mismos y también los flujos de los ríos o manantiales a través de los que se produce su descarga, alcanzándose un equilibrio al cabo de cierto tiempo si los bombeos se mantienen constantes. Estos efectos se producen con cierto retraso, que es tanto mayor cuanto mayor es el acuífero. La extracción de volúmenes importantes de agua subterránea proporciona beneficios sociales importantes, pero puede modificar



Pozo con decoración renacentista.

el ciclo hidrológico al disminuir los niveles del agua y la aportación subterránea a los ríos, manantiales y humedales, reducir la evaporación en zonas con niveles freáticos próximos a la superficie del terreno o incluso cambiar las relaciones río-acuífero. Las afecciones pueden ser intensas y en ocasiones no deseables para el Medio Ambiente y también para los propios usuarios del agua. El descenso de niveles afecta al que lo produce y también al conjunto de los usuarios que bombean del mismo acuífero, aumentando los costes de explotación al tener que bombear el agua de mayor profundidad y en algunos casos tener que abandonar o sustituir algunos pozos. La disminución de caudales fluviales es una externalidad que afecta a los

usuarios de aguas abajo, pudiendo afectar a los ecosistemas acuáticos o humedales relacionados con el acuífero. Hay ríos que han pasado de ser ganadores a perdedores e incluso a ser efímeros, circulando exclusivamente cuando se produce una escorrentía superficial suficientemente importante para que no se infiltre por entero en los cauces. El descenso de niveles puede producir el deterioro de la calidad del agua del acuífero por intrusión de agua del mar, o por la entrada de aguas subterráneas salinas o de calidad química deficiente. En muchos acuíferos en los que los descensos de niveles han sido importantes se han ocasionado subsidencias del terreno de hasta más de 9 metros, que han dado lugar a daños importantes



Perforación de un pozo en una zona deltaica.

en estructuras lineales de comunicación, canales o edificios, y también a los mismos pozos que explotan el acuífero, y propicia una mayor inundabilidad del territorio afectado. Son paradigmáticos los casos del Valle Central de California, Ciudad de México y otras ciudades de ese país, Tokyo y Bangkok.

Para un uso racional y sostenible de un acuífero hay que conocer sus propiedades físicas, las relaciones con el agua superficial, los mecanismos de recarga y descarga, y como reaccionan los niveles y las aportaciones subterráneas de los acuíferos a los ríos ante los bombeos a los que están sometidos. Los efectos de la explotación del acuífero pueden anticiparse con mayor o menor precisión con modelos de simulación adecuados, basados en un buen modelo conceptual. Una gestión responsable precisa de una red de observación adecuada a las características de cada acuífero y a la explotación a la que están sometidos. Esta red debe proporcionar información sobre niveles y calidad química del agua y, en su caso, sobre la influencia del régimen de explotación sobre el flujo y calidad del agua de los manantiales y ríos, y sobre los humedales y áreas de freatofitas con los que está relacionado el acuífero. Los modelos deben ser actualizados

o recalibrados cuando se produzcan desviaciones sobre los resultados de las simulaciones iniciales o cuando se mejore el conocimiento hidrogeológico de los acuíferos. En los casos en los que se haya producido una explotación incontrolada que haya dado lugar a efectos indeseables o poco satisfactorios conviene utilizar toda la información posible para poder reproducir el comportamiento de los efectos de la explotación en modelos de simulación de flujo y/o transporte de solutos, y también el efecto de las diversas alternativas que se propongan para paliar los efectos negativos.

Los efectos negativos del desarrollo de las aguas subterráneas pueden no aparecer hasta pasado mucho tiempo, años o décadas. Esto presenta varios problemas. Uno es el de asignación de los efectos a ciertos bombeos y la valoración económica y cuantitativa de esos efectos. La asunción de externalidades no tiene porque implicar la no consideración de las aguas subterráneas como fuente segura y efectiva de agua. Lo que procede es evaluar los beneficios y efectos negativos de las distintas alternativas de suministro de agua, y de las medidas correctoras necesarias, pero sin que ello suponga postergarlas para preferir otras fuentes hídricas que con frecuencia son menos eficientes y económicas.

Los problemas de sobreexplotación o contaminación de las aguas subterráneas tienden a ser agrandados y generalizados en ciertos ambientes (Collin y Margat 1993; Custodio 2002; Hernández-Mora et al 2001). Cuando se enfatizan los efectos negativos los planificadores y responsables de la toma de decisiones, que en general no son expertos, pueden dejar de considerar las aguas subterráneas como un recurso fiable y pasan a ser admitidas alternativas más caras y menos aceptables ambientalmente. El desarrollo incontrolado de las aguas subterráneas puede producir costes que hay que tener en cuenta al valorar los aspectos

económicos y ambientales. Para minimizarlos se necesitan instituciones que sean capaces de realizar un control adecuado de los niveles y del comportamiento del acuífero, de las extracciones y de la protección de la calidad del agua con la participación de los usuarios e interesados. También hay que considerar los efectos ambientales, aunque su protección y salvaguardia se contraponga al interés de los usuarios del acuífero. En casi todos los casos los usuarios de aguas subterráneas aplican el principio de la recuperación total de costes directos, al pagar desde el capital hasta los costes de operación y mantenimiento, sin estar subvencionados con dinero público, salvo en algunos casos en los

Una gestión responsable precisa de una red de observación adecuada a las características de cada acuífero

que se subvenciona la energía del bombeo. No suele ser este el caso de las aguas superficiales, que suelen estar fuertemente subvencionadas en el caso de uso para riego. Sin embargo, en la mayoría de los casos ni los usuarios de aguas superficiales ni los de las subterráneas pagan los costes indirectos (externalidades) que ocasionan, que son soportados por la sociedad (Garrido y Llamas, 2007; Hernández-Mora et al 2003). Los problemas de drenaje y salinización de suelos y aguas producidos por el riego con aguas superficiales pueden ocasionar efectos ambientales y económicos importantes que casi siempre están relacionados con un uso excesivo de las mismas. Son muy corrientes en los países áridos o semiáridos de todo el mundo:

Egipto, Pakistán, India, California, México, y también lo son en España. Algunas veces se han resuelto o mitigado estos problemas con la explotación de las aguas subterráneas para hacer descender el nivel freático (Sahuquillo y Lluria, 2003).

Una amenaza importante para la sostenibilidad de los acuíferos es el deterioro de la calidad del agua. El problema más extendido es el de los fertilizantes y los agroquímicos aplicados en áreas de cultivo, regados o no, y también donde hay explotaciones ganaderas intensivas y extensivas, o los problemas creados por los herbicidas aplicados a lo largo de vías de comunicación. El contenido de los nitratos supera los 50 mg/L (valor máximo admisible en agua de bebida) en zonas muy amplias.

También está muy extendida la presencia de insecticidas y plaguicidas y en algunos

casos estos contaminantes llegan a los ríos con el drenaje de las aguas subterráneas. La contaminación puntual por otros productos tóxicos puede hacer inviable el uso del agua para abastecimiento urbano. Pero en general la contaminación no la produce la utilización de los acuíferos sino que se debe a otras causas derivadas de la actividad antrópica en el territorio, y hay que defenderlos con regulaciones adecuadas. Este es un aspecto muy descuidado en España, como se comenta después.

1.3. Gestión de acuíferos intensamente explotados

La gestión de los acuíferos que están sometidos a explotación intensa es un problema difícil y complejo. Cuando los usuarios son cientos o miles se tienen que considerar los derechos y prioridades de cada uno. Es preciso comprobar que los volúmenes utilizados son consecuentes con esas prioridades y con las disponibilidades del acuífero, especialmente cuando la explotación alcanza o supera los recursos utilizables del acuífero y se están produciendo afecciones no tolerables a niveles del agua subterránea, caudal de los ríos,



Perforación de un pozo en una zona industrial.

humedales y áreas de freatofitas, o a la calidad del agua, como puede suceder en áreas costeras por intrusión marina. Es prácticamente imposible realizar una gestión centralizada y llevar un control de las extracciones. Se requieren instituciones que aseguren el cumplimiento de las reglas y tengan un conocimiento directo y profundo de las diferentes situaciones (Hernández-Mora y Llamas 2001; Schlager y López-Gunn 2006). La gestión debe realizarse a nivel local y tiene que conseguir una aceptabilidad por parte de todos los usuarios. Para llevar a cabo esta gestión se precisa un inventario completo de todas las captaciones y de los derechos existentes, el cual tiene que actualizarse permanentemente, además de realizar un seguimiento adecuado y completo de las extracciones y de los niveles y calidad del agua. Dicha gestión debe ser participativa de todos los usuarios a través de sus representantes, preferiblemente a través de Asociaciones o Comunidades de Usuarios de Agua Subterránea (CUAS), y supone corresponsabilidad. La consecución de estos objetivos es una de las grandes asignaturas pendientes.

2. La situación en España

En España se estima que la utilización de aguas subterráneas se ha incrementado de 2000 hm³/año en 1960 a más de 6500 hm³/año en el año 2000. Con estas aguas se riegan alrededor de un millón de hectáreas,

el 30% de la superficie regada en el país, y es el recurso fundamental para el abastecimiento del 35% de la población, unos 14 millones de habitantes (MMA, 2000). El agua aplicada para regar el 30% toda la superficie es solo el 20% de toda el agua usada para riegos, lo que pone de manifiesto que el riego con aguas subterráneas es significativamente más eficiente que con aguas superficiales (Hernández-Mora et al 2007). También es de destacar que los porcentajes de utilización varían de forma importante entre las regiones, siendo predominantes los riegos con aguas subterráneas en las islas Baleares y Canarias, La Mancha y las cuencas del Júcar y Segura. Solo en la cuenca del Júcar se realiza el 25% del total de los bombeos de aguas subterráneas de España.

La recarga de los acuíferos en España se ha estimado en el Libro Blanco del Agua (MMA, 2000) en unos 30.000 hm³/año, del orden del 30% de los recursos totales de agua que son unos 110.000 hm³/año. Su almacenamiento normalmente supera, en la mayoría de ellos, en uno o dos órdenes de magnitud a su recarga (renovación) media anual. Esto tiene una importancia práctica muy importante en países con sequías frecuentes, pues permite continuar con la misma explotación de los acuíferos, e incluso aumentarla durante periodos secos. En la cuenca del Júcar este aumento de los bombeos durante las



Laguna del parque natural las Tablas de Daimiel, Ciudad Real.

sequías permite superarlas sin menoscabo de la producción agrícola al realizarse por los usuarios, de forma sistemática en muchos casos, la utilización conjunta alternante de las aguas superficiales y las subterráneas, (Sahuquillo 2002, Sahuquillo y Lluria 2003). También en Doñana se continúa con los usos del agua subterránea local, cuando en otras áreas andaluzas la sequía supone fuertes restricciones. Para el abastecimiento de Barcelona, el almacenamiento en los acuíferos del Baix Llobregat, y en menor grado de otros acuíferos, permiten mantener el abastecimiento en sequías.

El papel del agua subterránea en la política del agua en los países miembros de la Unión Europea del sur de Europa ha sido objeto de un informe para cada uno de ellos. Estos informes servirán para la preparación de un informe sobre el papel de las aguas subterráneas en la política hidráulica de estos países. Es una contribución del Consejo Asesor de las Academias de Ciencias Europeas para la Comisión Europea y el Parlamento, EASAC. El informe referente a España (Hernández-Mora et al 2007) da una panorámica de la situación actual, poniendo énfasis en los aspectos económicos e institucionales en un país en el que se hace un uso intensivo de las aguas subterráneas, sobretudo para riego.

Este escrito pone el énfasis en la necesidad, derivada de la implantación y seguimiento de la DMA para la gestión de los acuíferos, de hacer estudios mucho más detallados de los acuíferos que los realizados hasta ahora, y también la necesidad de disponer de personal y financiación suficientes para llevar a cabo y mantener las importantes tareas de toma de datos, control y análisis, y de la publicación de resultados.

A continuación se citan los casos más notables de influencia de la explotación de las aguas subterráneas sobre las aguas superficiales que se han producido en España.

En Castilla-La Mancha los bombeos en los acuíferos de la cuenca del Guadiana han hecho desaparecer las emergencias de los Ojos del Guadiana. Los humedales de las Tablas de Daimiel han desaparecido en la práctica, lo mismo que otros humedales de la zona. Los bombeos de La Mancha Oriental han producido una disminución muy importante de las aportaciones subterráneas al río Júcar aguas abajo del embalse de Alarcón. El Júcar ha pasado a ser perdedor en tramos situados cada vez más aguas abajo. En el acuífero se infiltra cada vez una mayor cantidad de agua regulada en el embalse de Alarcón, lo que afecta de forma importante en los usuarios de aguas abajo de la cuenca. En las cuencas mediterráneas

han desaparecido muchos humedales antes de que se produjera una explotación intensa de las aguas subterráneas. Gran parte de ellos fueron afectados por la construcción de drenajes agrícolas, o por construcciones y obras de infraestructuras. Incluso a principios del siglo XX se dictaron leyes que promovían la desecación de zonas encharcadas para erradicar el paludismo, en vez de primar sus valores ambientales como se hace en la actualidad. Además, los bombeos intensos de los acuíferos pueden haber contribuido a su secado.

Muchos acuíferos del Sureste en las cuencas del Júcar, Segura y Sur tienen bombeos varias veces superiores a su recarga media, lo que viene produciendo un descenso continuado de niveles. Los manantiales, que eran las salidas de esos acuíferos, han desaparecido totalmente hace décadas. No se han producido problemas graves de subsidencia, como en muchos otros sitios del mundo, aunque parece haber sucedido en el delta del Llobregat (Barcelona), contribuyendo en parte al retroceso de la línea de costa, y sucedió en un verano muy seco en Murcia, afectando moderadamente a un conjunto de edificios del centro de la ciudad. Otros efectos indeseables distintos de los del descenso de niveles son los de intrusión marina, desplazamiento de aguas salinas del terreno e inducción de infiltración de aguas superficiales degradadas. Se han agotado algunos acuíferos pequeños que prácticamente han dejado de bombearse y en algún otro el abandono se ha producido por aumentos de salinidad del agua bombeada debido a la presencia de formaciones salinas, cuyas aguas han sido atraídas o se ha aumentado la tasa de lixiviación al incrementarse los flujos.

Hay otros acuíferos, como los de Guadalentín, Ascoy-Sopalmó, Jumiella-Villena, Cingla-Cuchillos, que se están explotando muy por encima de su recarga media anual desde hace unos 30 años. Las simulaciones de modelos de flujo de estos acuíferos indican que es posible continuar con el 80 o el 90% de la explotación anual

entre 15 y 20 años más a unos costes muy inferiores a los de plantas desalinizadoras que, a precios subvencionados, y en contra de lo dispuesto en la DMA, resultaría a un precio por encima de 0.5 euros/m³ en planta (Custodio 2005b), aunque el agua extraída de algunos pozos es salobre y a veces se requiere su tratamiento previo por ósmosis inversa. En los cuatro acuíferos citados se bombean más de 250 hm³/año y han proporcionado en los últimos 25 o 30 años cerca de 7000 hm³ por encima de su recarga anual media, cifras que se superarían bastante si se considerasen todos los acuíferos que actualmente se explotan por encima de su recarga media anual. Una situación similar es la del Campo de Níjar (Almería). En el Campo de Dalías (Almería) se ha podido mantener la explotación hasta ahora a pesar de la intrusión marina existente.

Uno de los objetivos del trasvase del Ebro, que iba a ser pagado esencialmente con dinero público, era recuperar los acuíferos sobreexplotados. La solución alternativa propuesta en el Plan Hidrológico Nacional de 2005 en el fondo no difiere mucho, ya que las desalinizadoras de agua del mar van a ser esencialmente financiadas en la mayoría de los casos con fondos públicos. En otras palabras, se continúa con una política de oferta y no de gestión de la demanda, como ya denunciaron varios expertos del Consejo Nacional del Agua (Sahuquillo et al 2004 y 2005a). De hecho, según el Grupo Ecologista Mediterráneo, ciertas desalinizadoras existentes, como la de Almería, no había entrado prácticamente en funcionamiento en 2004, cuatro años después de terminada. La razón era que el Ayuntamiento de la ciudad seguía comprando agua subterránea mucho más barata.

Según el artículo 4 b) ii) de la DMA, los estados miembros 'habrán de proteger, mejorar, y regenerar todas las masas de aguas subterráneas y garantizarán un equilibrio entre la extracción y la alimentación de dichas aguas con el objeto de alcan-

zar un buen estado de las aguas subterráneas a más tardar quince años después de la entrada en vigor de la presente Directiva, de conformidad con lo dispuesto en el Anejo V, sin perjuicio de la aplicación de las prórogas determinadas de conformidad con el apartado 4 y de la aplicación de los apartados 5, 6 y 7 y no obstante lo dispuesto en el apartado 8, y sin perjuicio de la letra j) del apartado 3 del artículo 11'.

Es evidente que la recuperación del estado inicial de estos acuíferos y/o de los manantiales o pequeños humedales que existían no se podría conseguir hasta dentro de varias décadas y a unos costes muy elevados. No parece razonable tratar de recuperarlos, ni tampoco imponer la obligación de dejar de bombear los acuíferos. Por otra parte parece dudoso que legalmente se pueda obligar a los usuarios de esos acuíferos a abandonar los bombeos. La discusión de este tema sería demasiado larga para los objetivos de este escrito y sólo se pretende llamar la atención sobre estos asuntos.

El número de acuíferos españoles afectados por intrusión marina, 72 en total según López Geta (en Ragone et al 2007), puede deberse a que están incluidos casos en los que la salinidad se debe a la excesiva profundidad o defectuosa localización de las captaciones, o a retornos de riego. Los más importantes y estudiados son los acuíferos de los deltas del Besós y del Llobregat (Iribar et al 1997) y el Campo de Tarragona. Hay muchos otros en los que el problema es local o afecta a zonas pequeñas, y en otros casos no existe intrusión y la salinidad se debe a la existencia de pozos demasiado profundos o con rejillas a varias profundidades. La existencia de problemas se debe con frecuencia a una gestión inadecuada y a la no consideración del carácter tridimensional del flujo del agua subterránea en acuíferos costeros, o a una calificación del origen de la salinidad.

Los vertidos incontrolados industriales y urbanos, la inexistencia de regulaciones adecuadas y rigurosas

de actividades contaminantes y la utilización masiva de fertilizantes y agroquímicos en la agricultura están produciendo la contaminación de los acuíferos. El contenido en nitratos en muchos acuíferos de las zonas regadas supera los 50 mg/L, debido a la fertilización excesiva y al casi nulo cumplimiento de la Directiva de Nitratos (DN, 1991; PN, 1996). No existe una idea clara de la posible gravedad de la contaminación por plaguicidas, de los que sólo se han realizado algunos estudios en sitios muy concretos a pesar de su nocividad y de los clamores de la comunidad hidrogeológica, al menos en los últimos 20 años. Este es uno de los puntos esenciales de la Declaración de Valencia (Valencia Statement, en Sahuquillo et al 2005b). La contaminación por nitratos es uno de los problemas más difíciles de resolver, no sólo en España, sino también en en todo el mundo. La directiva de nitratos ha conseguido unos resultados muy limitados. Además parece del todo utópico pensar que se pueda alcanzar para el año 2015 un buen estado de los acuíferos con contenidos elevados de nitratos. Aunque se consiguiese, la dificultad de convencer u obligar a los agricultores para que adopten normas de buen uso agrícola, que construyan las captaciones de acuerdo con normas adecuadas y que se implanten otras acciones, y el gran volumen de agua subterránea afectado, incluyendo al medio no saturado, hace totalmente inviable su recuperación durante decenios. Hasta ahora no se ha hecho nada más que definir la vulnerabilidad de los acuíferos, pero ni siquiera se ha intentado imponer ningún tipo de restricciones a los regantes, que se resisten a reducir el exceso de fertilizantes que aplican por temor de que repercuta en las cosechas. Aunque se comenzasen a aplicar de forma inmediata acciones decididas, no se conseguirían resultados importantes en el siguiente plazo de seis años del segundo periodo de planificación de la Directiva. (*Lea la segunda parte en el próximo número de TECNOLOGÍA DEL AGUA*).

AGUA

TECNOLOGIA DEL

CAPTACIÓN, TRATAMIENTO, DISTRIBUCIÓN Y DEPURACIÓN DEL AGUA Y SU IMPACTO MEDIOAMBIENTAL

AÑO XXIV - NUM. 306 - MARZO 2009 - I.S.S.N.: 211/8173

En este número:

**Selección
técnico-económica
del sistema de
depuración de aguas
residuales**

Página 22

**Utilización de
humedales
construidos de flujo
superficial en el
tratamiento de aguas
residuales de origen
urbano-industrial**

Página 32

**Efecto del Manganeseo
sobre la actividad
bacteriana en
procesos de fangos
activos**

Página 42

**La gestión de las
aguas subterráneas
(segunda parte)**

Página 54

**La evaporación al
vacío, una tecnología
para la reducción de
residuos y utilización
de agua**

Página 68

**Biofiltración
innovadora para el
tratamiento de aguas
residuales producidas
por poblaciones e
industrias**

Página 76

**Procesos y sistemas:
Eléctrica china supera
las dificultades del
agua salada para
usarla en procesos
industriales**

Página 86

DEPURACIÓN Y REGENERACIÓN DE AGUAS RESIDUALES



OFICINAS
Papa Pius XI, 84-88 bjs.
08208 Sabadell - Barcelona - Spain
Tel. +34 937 279 141 - 902 314 318
Fax +34 937 266 701
biotrit@biotrit.com - www.biotrit.com

FÁBRICA
Avda. Principal 21 E
Pol. Ind. Can Clapers
08181 Setmenat - Barcelona - Spain

S.A.T.
Tel. 937 152 778

BIOTRIT[®]

depuración de aguas

Resumen

La Directiva Marco del Agua supone una gran mejora para la gestión y protección de los acuíferos en España, estableciendo la necesidad de realizar estudios para controlar las extracciones, contaminación y calidad a través de redes piezométricas y su relación con el entorno. El agua subterránea es más eficiente y barata que la superficial procedente de embalses y canales (a pesar de estar muy subvencionada) en España se aplica para regar el 30% de la superficie de riego (unos 3,5 millones de ha) con un crecimiento espectacular en los últimos 30 años, especialmente en zonas áridas o semiáridas. Supone el 20% del agua aplicada al riego

Palabras clave:

Directiva marco del agua, aguas subterráneas, gestión, calidad/contaminación.

Abstract**Groundwater management**

The Water Framework Directive is set to make a big improvement in the management and protection of aquifers in Spain by laying down the need to carry out studies to monitor extractions, pollution and quality through piezometric networks and their relationship with the environment. The use of groundwater is cheaper and more efficient than surface water from reservoirs and canals (in spite of the latter's being heavily subsidised). In Spain it is employed in watering 30% of the irrigated surface area (about 3.5 million hectares) and its use has grown spectacularly in the last 30 years, especially in arid and semi-arid regions. It accounts for 20% of the water used for irrigation.

Keywords:

Water Framework Directive, groundwater, management, quality/pollution.

La gestión de las aguas subterráneas

(Segunda parte)

Por: **Andrés Sahuquillo**^{1,4}, profesor emérito; **Emilio Custodio**^{2,4}, profesor; **M. Ramón Llamas**^{3,4}, profesor emérito

¹Universidad Politécnica de Valencia

Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente
Camino de Vera, s/n
46071 Valencia
Tel.: 963 877 058
Correo-e: asahuq@hma.upv.es

²Universitat Politècnica de Catalunya

Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica
Calle Jordi Girona, 1-3
08034 Barcelona
Tel.: 934 016 919
Correo-e: emilio.custodio@upc.edu

³Universidad Complutense de Madrid

Facultad de Ciencias Geológicas - Departamento de Geodinámica
28040 Madrid
Tel.: 913 944 848
Fax: 913 944 845
Correo-e: mrllamas@geo.ucm.es
Skype: mrllamas
Internet: http://rac.es/2/2_ficha.asp?id=119&idN3=6&idN4=40

⁴Real Academia de Ciencias Matemáticas, Físicas y Naturales de España

Calle Valverde, 22
28040 Madrid
Tel.: 917 014 230 / 231
Fax: 917 014 232 / 233
Correo-e: secretaria@rac.es
Internet: www.rac.es

(Primera parte de este artículo, puntos 1 y 2, publicados en el número 305 de **TECNOLOGÍA DEL AGUA**).

3. Implicaciones del desarrollo de la Directiva Marco

Para implantar la DMA son necesarias dos tipos de acciones: unas de tipo tecnológico, como realización de estudios, análisis y planificación, y otras con un componente más administrativo, legal y de gestión. La

orientación de la DMA es fundamentalmente ecológica y ambiental. Se preocupa mucho menos por los aspectos cuantitativos, que son los que más preocupan en los países mediterráneos más secos, en los que el 80% del uso del agua es esencialmente para riego y el aprovechamiento de muchos acuíferos es muy intenso. Es un asunto de los estados y regiones, siguiendo el principio de subsidiaridad en la solución de problemas (Custodio 2003). Sin embargo los problemas de calidad acaban apareciendo.

En los países mediterráneos será mucho más difícil que en los más húmedos limitar el impacto de los bombeos sobre las aguas superficiales y los humedales y mantener los acuíferos con contenidos de nitrato aceptables. Si se imponen limitaciones de forma muy estricta tendrán que disminuir drásticamente los bombeos de muchos acuíferos, lo que afectará a muchos de los riegos más productivos. La gestión de la cantidad y la calidad en una cuenca de recursos escasos es un reto más difícil que la gestión de las cuencas con mayores disponibilidades hídricas, sobre todo si en las cuencas con más escasez hay que contar con los requerimientos hídricos ecológicos y ambientales. Por otra parte, el hecho de que la gestión de algunos acuíferos requiera el tener que controlar cientos o miles de pozos para riegos tiene otras particularidades y mayores dificultades que la gestión de decenas o cientos de pozos para usos urbanos e industriales en la Europa más húmeda e industrializada. El número de usuarios es una diferencia muy importante respecto a las aguas superficiales, donde el número de interlocutores es en general mucho menor. Las posibles soluciones dependen de que haya instituciones adecuadas y regulaciones que puedan imponerse legal y socialmente a los usuarios. Para poder hacerlo es imprescindible implantar instrumentos participativos y de corresponsabilidad como las asociaciones de usuarios. Son a la vez retos científico-técnicos, administrativo-legales y de gobernabilidad ("gobernanza" según la denominación que se utiliza actualmente en la ciencia política), en los que el medio ambiente debe estar suficientemente representado, tanto gubernamentalmente como a nivel civil.

3.1 El registro y el catálogo de los derechos de agua subterránea en España

La ley de aguas de 1985 declara las aguas subterráneas de dominio público, aunque sólo lo son las cap-

taciones cuyo aprovechamiento fue solicitado después de 1 de enero de 1986. Las anteriores a esa fecha son privadas, bien temporalmente (hasta 2036 o 2038) si han aceptado la oferta de protección administrativa que permite la ley, o a perpetuidad en caso contrario. Las concesiones de agua que se otorgan desde la promulgación de la Ley, así como los aprovechamientos privados preexistentes que se acogieron a la oferta de protección, han de inscribirse en el Registro de Aguas de los Organismos de Cuenca. A los propietarios de aprovechamientos privados que prefirieron continuar con ese régimen se les dio un plazo de tres años para inscribirse en el catálogo de aguas privadas. Pero después de más de veinte años de promulgarse la Ley, y a pesar de haber otorgado moratorias, la situación legal práctica de las aguas subterráneas sólo puede definirse como de caos. No se sabe bien cuantos aprovechamientos hay, y se han realizado miles de perforaciones (quizás la mayoría de ellas) sin permiso ni concesión de los organismos de cuenca, que son los que tienen que aprobarlas. Estos organismos son incapaces de controlarlas y no tienen medios, apoyos, ni directrices adecuadas para hacerlo. También parece que una parte muy importante de propietarios de aguas privadas no se han acogido a la oferta de inscribirse en el registro y tampoco se inscribieron en el catálogo. La tramitación de expedientes va con enorme retraso.

Para intentar resolver esta situación, la Administración puso en marcha en 1995 el programa ARYCA, Actualización de Registros y Catálogos de Aprovechamientos, con una inversión de más de 66 millones de euros. Este programa resultó un fracaso. En 2002 el ministerio de Medio Ambiente comenzó un nuevo proyecto denominado ALBERCA, Actualización de Libros de Registro y Catálogo, con una inversión de unos 153 millones de euros, que probablemente será también insuficiente para resolver



Noria de cántaras.

la situación legal de los aprovechamientos de aguas subterráneas. Esta inversión económica está muy por debajo de los 420 millones de euros estimados por Llamas et al (2001) para la realización de los inventarios de aguas subterráneas públicas y privadas. Para más detalles sobre el problema del registro y catálogo de las aguas subterráneas ver Fornés et al (2005), de donde se han tomado los datos e ideas que se presentan aquí. En esta situación presente no es posible imponer regulaciones, limitar extracciones e implantar las normas de control precisas para la buena gestión del acuífero, y además no crear agravios comparados e indefensiones.

3.2. El déficit de inversiones y personal en estudios de los acuíferos

Tras la promulgación de la Ley de Aguas en 1985 se advierte un descenso de las inversiones públicas en los estudios de aguas subterráneas. En las dos décadas anteriores hubo inversiones importantes por parte del IGME (entonces dependiente del Ministerio de Industria), del Instituto Nacional de Colonización

(luego IRYDA), y también, aunque menos importantes, del Servicio Geológico de Obras Públicas, SGOP, que demostraban que el ministerio de Obras Públicas también tenía cierto interés por las aguas subterráneas. Se realizaron dos proyectos internacionales, el del Guadalquivir con ayuda técnica y económica de la FAO y el de las islas Canarias con el PNUD-UNESCO. También se iniciaron dos cursos de postgrado de Hidrogeología que han tenido una repercusión muy importante no sólo nacional sino internacional, y de los que aún perdura el Curso Internacional de Hidrología Subterránea de Barcelona, que tiene una edición presencial y otra 'a distancia'. Es el Curso de Postgrado más longevo de la universidad española, pues tiene lugar ininterrumpidamente desde 1967. Posteriormente se continuó con estudios que abarcaban todo el país en los que intervinieron bastantes empresas consultoras, y se identificaron los principales acuíferos, que fueron objeto de una caracterización preliminar. Con posterioridad las inversiones del IGME disminuyeron al pasar muchas de las responsabilidades a las Confederaciones Hidrográficas, y el SGOP desapareció como organismo inversor.

A pesar de haberse declarado públicas las aguas subterráneas y de la insistencia de la comunidad hidrogeológica, no se contrataron más que unos pocos hidrogeólogos por parte de algunas de las confederaciones hidrográficas, que en gran parte se tuvieron que dedicar a aspectos más administrativos que técnicos. Tampoco se hicieron inversiones en estudios o desarrollos de aguas subterráneas. La falta de inversiones y personal ha ocasionado que un número muy importante de perforaciones, que hubieran podido proporcionar un caudal inmenso de información hidrogeológica, no se han incluido en los inventarios y bases de datos oficiales. Sin duda el caos legal ocasionado por la incapacidad de poner a punto el Registro

y el Catálogo de perforaciones ha sido también una de las causas de esta carencia.

Ante la falta de estudios sistemáticos los equipos técnicos de algunas empresas desaparecieron o disminuyeron el número de hidrogeólogos. La prueba de que ha habido un déficit importante de estudios hidrogeológicos es la calificación que los hidrogeólogos de la Administración hacen sobre la información existente para hacer las evaluaciones requeridas por la DMA. La tache de insuficiente y fraccionaria, de que son muy escasas las cuencas

Están tomando importancia los estudios para controlar y restaurar contaminaciones de acuíferos

con información sobre insecticidas y plaguicidas, de que es escasa e insuficiente la información disponible sobre contaminación puntual, y de que hay carencias de información sobre el volumen de extracción y sobre las recargas de los acuíferos (MMA 2006).

De la misma forma se expresan los demás miembros de la comunidad hidrogeológica española. No es que haya disminuido el número de egresados de la Universidad con formación adecuada en aguas subterráneas con relación a los que había hace 25 años. En realidad ha aumentado de forma notable el número de departamentos universitarios que enseñan hidrogeología y las necesidades de estudio de empresas y organismos. En el sector privado están tomando importancia los estudios para controlar, reducir y restaurar contaminaciones de acuíferos, aunque en general poco se sabe de los mismos por el carácter confidencial de los informes que se producen, por la negativa de los clientes

a que estos hechos se divulguen y por la reticencia de las empresas a dar a conocer sus métodos. Pero el crecimiento no ha sido en la proporción debida. Actualmente hay dificultades para encontrar suficientes hidrogeólogos con formación adecuada en los temas de gestión y contaminación de acuíferos para hacer frente a las necesidades derivadas de la implantación y desarrollo de la DMA.

En los apartados siguientes se enumeran los aspectos que es necesario estudiar para implantar y llevar a cabo las tareas continuadas que impone la Directiva, que son muy importantes. Hay que decir claramente que las autoridades competentes deben asumir que el cumplimiento de la DMA representa un notable esfuerzo en dotación de medios humanos e inversión. No se pueden dictar leyes o trasponer directivas sin poner los medios para poder desarrollarlas e imponerlas. El no hacerlo significa convertir los textos legales en documentos muertos. Pero esta vez no se podrán obviar las responsabilidades y sanciones que imponga la Comisión Europea.

Es satisfactoria la noticia de que el ministerio de Medio Ambiente y el IGME han firmado un acuerdo para realizar estudios científicos sobre sostenibilidad y protección de aguas subterráneas con un presupuesto de 5,4 millones de euros que se dirigirán a la caracterización adicional de masas de agua subterránea con riesgo de incumplir los objetivos medioambientales, la interrelación entre este agua y los cursos fluviales, las zonas húmedas o los ecosistemas singulares, la elaboración de un mapa piezométrico de España y la utilización de aguas subterráneas en periodos de sequía. Aunque es una cantidad reducida en comparación con las de los programas ARYCA y ALBERCA, representan un primer paso en las inversiones necesarias para el mejor conocimiento y gestión de los acuíferos.

3.3. Estudios y análisis a desarrollar para la implantación de la DMA

Los programas que impone desarrollar la DMA son:

- Definir y caracterizar todas las masas (cuerpos) de agua, entre ellas las subterráneas
- Identificar las presiones sobre las masas de agua que ejerce la actividad humana
- Valorar los impactos ecológicos en el agua de esas masas
- Proteger, mejorar y regenerar todas las masas de agua subterránea y garantizar un equilibrio entre la extracción y la alimentación de dichas aguas con objeto de alcanzar un buen estado cuantitativo y cualitativo
- Proponer las medidas a tomar para recuperar un buen estado antes del año 2015
- Efectuar análisis económicos de las diferentes medidas propuestas
- En el caso de que los costes sean excesivos, proponer a la Comisión Europea una prórroga de 6 o 12 años, o sea, trasladando la recuperación a 2021 ó 2027

Los Estados miembros están obligados a realizar una caracterización inicial de las masas de agua subterránea (ver Anejo II. 2.1, Aguas Subterráneas, de la DMA), que España remitió a la UE en Febrero de 2005 después de una prórroga concedida por las autoridades europeas. Según esta caracterización, del total de las 699 masas de agua subterránea, 259 (38,65%) están en riesgo de incumplir los objetivos medioambientales en 2015, 57 (18,24%) en riesgo nulo y 86 (8,51%) están pendientes de evaluación. De las 259 masas de agua subterránea en riesgo, 89 lo son por razones de cantidad y el resto por contaminación química. De estas últimas 80 lo son por contaminación puntual, 167 por contaminación difusa (esencialmente debido a su alto contenido de nitratos) y 72 por intrusión marina (López Geta, 2007). Hay 167 masas de agua con problemas graves de contaminación difusa debido al



Perforación para captar aguas subterráneas.

elevado contenido en nitratos. Este número aumentará al evaluar las 256 masas con riesgo pendiente de estudio. Es mucho menor el número de acuíferos en los que el riesgo se debe a contaminación puntual por productos químicos, aunque cuando se hagan estudios de mayor detalle el número de acuíferos afectados por esta causa aumentará de forma importante. También parece que los 72 acuíferos afectados por intrusión, incluyen casos en los que la salinidad se debe a la excesiva profundidad o defectuosa construcción o localización de las captaciones, o a otras causas, como se ha citado con anterioridad.

Como se ha comentado anteriormente, los trabajos para la elaboración de la documentación exigida por la DMA confirman la impresión que existe entre los miembros de la comunidad hidrogeológica española de que la información existente en España sobre la mayoría de los aspectos necesarios para hacer las evaluaciones requeridas es insuficiente y fraccionaria, tanto sobre los aspectos hidrogeológicos como sobre las extracciones de agua subterránea (López Geta 2007). También es escasa e insuficiente la información disponible sobre con-

taminación puntual y son muy escasas las cuencas con información sobre insecticidas y plaguicidas. La evaluación de la presión sobre el estado cuantitativo causada por la extracción de agua subterránea se ha visto dificultada por las carencias de información sobre el volumen de extracción y sobre las recargas de los acuíferos. En algunas cuencas se ha seguido el trabajo realizado en la cuenca del Júcar, que se ha tomado como cuenca piloto, pero en cada uno de ellos varía el método de cálculo utilizado para las recargas de los acuíferos y los criterios para la definición de presión significativa (MMA 2006). La vulnerabilidad de los acuíferos solo se ha incorporado a los análisis en algunos casos.

La Agencia Catalana del Agua, ACA, heredera de la Confederación Hidrográfica del Pirineo Oriental (Cuencas Internas de Cataluña), y con competencias propias o compartidas con la Confederación Hidrográfica del Ebro en el resto de Cataluña, se ha dotado de personal para abordar las tareas y aplicar las disposiciones de la DMA. Según Niñerola (2007), del total de 67 masas (cuerpos) de agua identificadas, el 21% están en riesgo de no cumplir los requisitos en 2015 por pro-

blemas de cantidad, y el 51% por problemas de calidad. De éstas, la mitad lo es por exceso de nitratos y la cuarta parte por intrusión marina. Las aguas subterráneas cubren el 18% de la demanda total de agua, que es de 3.100 hm³/año. Cataluña tiene una población de 6,8 millones de habitantes y 59 millones de animales de granja. Hay 12.100 km², de los 31.000 km² totales, vulnerables por deyecciones ganaderas y prácticas agrícolas, con casi un 50% de la superficie vulnerable que ya supera 40 mg/L de nitrato, con tendencia a crecer en buena parte de la superficie. Se han publicado normativas sobre zonas vulnerables. Se han realizado muestreos semestrales y anuales en 2.600 puntos para vigilar la contaminación por plaguicidas, que se manifiesta en numerosas áreas, siendo la atrazina el producto más frecuente, pero no el único. Además existen contaminaciones puntuales en numerosos lugares, el 60% por hidrocarburos y el 25% por disolventes organoclorados, los que se deben rehabilitar.

La ACA dispone actualmente de una red piezométrica de unos 400 puntos, irregularmente distribuidos y no óptima, pero operativa, que se mide mensualmente. La red del Baix Llobregat es la más antigua y densa, y tiene datos desde 1965.

También la ACA tiene en curso procesos de participación de los usuarios de agua, cuya eficacia está aún por conocer. Singularmente, en 1975 se formó la Comunidad de Usuarios de Aguas Subterráneas del Baix Llobregat, CUADLL, antes de la Ley de Aguas de 1985 (Codina, 2004), que se ha mostrado muy eficaz y que hoy cuenta con un equipo técnico propio. Existe recarga artificial en el lecho del río desde 1945, por inyección en pozos desde 1965 y actualmente se trabaja en una barrera costera de inyección de agua para control de la intrusión marina. Otros intentos posteriores de formación de Comunidades de Agua Subterránea, CUAS, han avanzado con dificultades (Galofré 1991), en

parte por la negativa o suspicacia de los usuarios de agua subterránea a ceder parte sus prerrogativas y en parte también a la inercia e inexperience de propia de la Administración del Agua.

Por otra parte parecen muy acertadas dos afirmaciones que se hace en MMA (2006). La primera es que en muchos casos el deterioro de la calidad del agua por intrusión marina procede de una explotación inadecuada; la segunda que dado el procedimiento seguido para evaluar el riesgo relacionado con las presiones el resultado se debe considerar únicamente como orientativo.

Es muy escasa la información disponible sobre contaminación por insecticidas y plaguicidas

Una vez realizado el análisis inicial de las características, los Estados miembros han de hacer una caracterización adicional, actualmente está en proceso de realización en España, de las masas o grupos de masas de agua subterránea que presenten riesgo de no alcanzar los objetivos de la DMA (Anejo II. 2.2), con el objeto de evaluarlas con mayor exactitud y, si procede, recabar información sobre:

- Las características geológicas del acuífero, incluidas la extensión y tipo de unidades geológicas
- Las características hidrogeológicas de la masa de agua subterránea, incluidas la permeabilidad, la porosidad y el confinamiento
- Las características de los depósitos superficiales y terrenos en la zona de captación a partir de la cual la masa de agua subterránea recibe su alimentación, incluidos el grosor, la porosidad, la permeabilidad y las propiedades absorbentes de los depósitos y suelos

• Las características de la estratificación de agua subterránea dentro del acuífero

• El inventario de los sistemas de superficie asociados, incluidos los ecosistemas terrestres y las masas de agua superficial con los que esté conectada dinámicamente la masa de agua subterránea

• Las direcciones y tasas de intercambio de flujos entre la masa de agua subterránea y los sistemas de superficie asociados

• El cálculo de la tasa media anual de recarga global a largo plazo, con datos suficientes

• Las características de la composición química de las aguas subterráneas, especificando las aportaciones de la actividad humana

Entre las exigencias de caracterización están incluidos los exámenes de la incidencia de la actividad humana en las aguas subterráneas, incluido el uso del suelo en la zona de recarga y las extracciones de los acuíferos. Son aspectos que habrá que cuantificar. También habrá que analizar la incidencia de los cambios en los niveles de las aguas subterráneas en las aguas superficiales y ecosistemas terrestres asociados y en la regulación hidrológica, y la incidencia de la contaminación en la calidad de las aguas subterráneas.

En algunos ríos se han detectado contenidos altos de nitratos y en otros de insecticidas, que provienen de los acuíferos, y en ocasiones perturba su utilización para usos urbanos. A pesar de su importancia parece que no se ha incluido información de este tipo en la remitida a la CE, probablemente porque en los organismos de cuenca no hay personal suficiente para analizar los datos con espíritu crítico, experiencia y programas para hacerlo.

Es importante la consideración de lo que la Directiva denomina "recursos disponibles de aguas subterráneas". En el artículo 2, Definiciones se dice: 27) "Recursos disponibles de aguas subterráneas": el valor medio interanual de la tasa de recarga total de la masa de agua sub-

terránea, menos el flujo interanual medio requerido para conseguir los objetivos de calidad ecológica para el agua superficial asociada según las especificaciones del artículo 4, para evitar cualquier disminución significativa en el estado ecológico de tales aguas, y cualquier daño significativo a los ecosistemas terrestres asociados; y en el artículo 4 b) ii): (...) los estados miembros habrán de proteger, mejorar y regenerar todas las masas de agua subterránea y garantizarán un equilibrio entre la extracción y la alimentación de dichas aguas con objeto de alcanzar un buen estado de las aguas subterráneas a más tardar quince años después de la entrada en vigor de la presente Directiva, de conformidad con lo dispuesto en el anexo V, sin perjuicio de la aplicación de las prórrogas determinadas (...).

La interpretación de los recursos de agua disponibles en los acuíferos puede diferir ampliamente según se utilicen distintos métodos y también según los equipos que lo evalúen, tanto al determinar la recarga media de la masa de agua como el flujo requerido para conseguir los objetivos ecológicos. Los modelos utilizados para determinar la recarga de los acuíferos—Simpa, Balan u otros—deberían validarse con la información hidrológica e hidrogeológica disponible y en todo caso se debe indicar con claridad el grado de incertidumbre de las estimaciones (Lerner et al., 1990; Custodio et al., 1997). Un primer intento se ha hecho a partir del balance de cloruros en el suelo (Alcalá y Custodio, 2007). Los autores piensan que en España se conoce aceptablemente bien la tasa de recarga media a los acuíferos y sus características globales, sobre todo en algunos casos en los que se han realizado estudios detallados por diversos métodos. Pero en opinión de muchos especialistas hay todavía una tarea importantísima que desarrollar en el conocimiento e investigación más detallada de los acuíferos, en especial de los sometidos a extracciones

intensas, y para abordar los problemas de calidad y contaminación y las interacciones con las aguas superficiales y ecosistemas. Esta tarea está parada o muy ralentizada desde hace al menos unos veinte años, lo que se ha denunciado desde la Universidad y asociaciones profesionales. La sola enumeración que se hace en este apartado y en los siguientes de las tareas que impone la DMA servirían por sí solas para refrendar esta afirmación.

3.4. Tareas adicionales

El artículo 11 de la Directiva impone una serie de 'medidas básicas', que son los requisitos mínimos que deberán cumplirse para poder alcanzar los objetivos medioambientales que establece el artículo 4, y una serie de 'medidas complementarias' cuando sea necesario. Entre las básicas están las medidas derivadas de otras directivas ya aprobadas: para las aguas subterráneas la Directiva sobre Nitratos (DN, 1991) y su incorporación a la legislación estatal (PN, 1996). Otras dependen de lo exigido en otros artículos:

- Según el Artículo 7 los Estados miembros especificarán dentro de cada demarcación hidrográfica todas las masas de agua utilizadas para la captación de agua destinada al consumo humano que proporcionen un promedio de más de 10 m³ diarios o que abastezcan a más de cincuenta personas, y todas las masas de agua destinadas a tal uso en el futuro que tengan que proporcionar un promedio de más de 100 m³ diarios, las cuales tendrán que cumplir las normas de calidad establecidas a nivel comunitario. Es una tarea relativamente importante en algunas cuencas
- Los Estados miembros podrán establecer perímetros de protección para esas masas de agua. El establecimiento de perímetros de protección ha planteado problemas al poner objeciones los usuarios de los terrenos en los que se imponen limitaciones a algunas actividades. Como tantas cosas en los asuntos

de agua, los temas más espinosos y difíciles de resolver son los sociopolíticos más que los puramente técnicos

- Según el Artículo 8 se ha de hacer un seguimiento del estado de las aguas subterráneas que incluirá el estado químico y cuantitativo. Los programas en relación con estas tareas deberían de haber estado operativos en seis años contados a partir de la aprobación de la directiva, esto es, en 2006. Para ello hay que definir, operar y mantener las redes de observación, piezométricas y de calidad. Medidas de control de captación de aguas subterráneas con inclusión de los registros de autorización y autorización previa. En los acuíferos explotados intensamente es muy importante conocer con precisión temporal y espacial los bombeos para valorar la situación de los acuíferos y poder introducir estos datos en los modelos de simulación si fuera preciso

- Control de vertidos de fuente puntual que puedan causar contaminación y su autorización previa
- Prohibición de vertidos directos a las aguas subterráneas

Todo lo anterior impone la necesidad de hacer estudios mucho más detallados, que en algunos casos tienen que incluir modelos de flujo y/o transporte. El proyecto de redes piezométricas y de calidad necesita un conocimiento mínimo del acuífero, siendo consciente de las incertidumbres y las necesidades de ir las superando. Lo mismo cabe decir sobre la importancia de conocer el orden de magnitud de las extracciones existentes y cuales son los problemas del acuífero, para poder ir mejorando su conocimiento y siguiendo sus oscilaciones. Actualmente se está terminando la perforación de la primera fase de la red piezométrica y está programada la segunda.

El establecimiento de perímetros de protección choca no sólo con la oposición de los afectados, si no con la legislación de ámbito territorial, que no integra los diferentes intereses. Se han declarado diversos

perímetros de protección, con éxito moderado o muy escaso. Sin embargo estos polígonos de protección son efectivos para las aguas minerales ya que se apoyan en la Ley de Minas, y no en la de Aguas.

Debería promulgarse por el MI-MAM, u otros departamentos ministeriales, y por las Comunidades Autónomas, una normativa adecuada para las actividades que pueden producir contaminaciones puntuales o distribuidas en los acuíferos y, en su caso, regular los permisos y las redes de observación o instrumentos de control a instalar para asegurar que las medidas adoptadas para proteger al acuífero en el que se produzca la actividad potencialmente peligrosa. La autorización, el control y seguimiento, así como el análisis de los informes periódicos de control que puedan requerirse a los peticionarios de captaciones o autorizaciones de vertido, son cada vez más apremiantes e ineludibles por la cantidad de actividades que pueden tener influencia sobre el suelo y las aguas subterráneas. La necesidad de protección de las aguas subterráneas, tanto por su papel ecológico como por ser una fuente agua dulce, es cada vez más urgente. Una vez más hay que decir que la descontaminación de los acuíferos es una tarea lenta y cara, cuando no prácticamente imposible para algunos contaminantes y situaciones.

Es mejor, más barato y más seguro proteger los acuíferos que limpiarlos. Procurar esta defensa es algo en lo que viene insistiendo la comunidad hidrogeológica desde hace más de veinte años (Sahuquillo, 1999, Samper et al., 1999). Se espera que esta llamada tenga mejor acogida que las anteriores.

Una relación que no pretende ser exhaustiva de las actividades que habría que regular con el fin de proteger los acuíferos de la contaminación se refiere a:

- Tanques enterrados de productos químicos.
- Estaciones de servicio.

- Vertederos de residuos sólidos urbanos.
- Vertederos de productos tóxicos.
- Vertidos de fangos de depuradoras
- Vertido de residuos mineros.
- Vertidos en superficie de sólidos y líquidos.
- Almacenamiento y manejo de productos tóxicos.
- Inyección profunda de residuos.
- Aplicación y manejo de insecticidas y plaguicidas.
- Construcción de pozos.
- Sellado y abandono de pozos.

Pocas de las redes piezométricas existentes en España se han diseñado hidrogeológicamente, aunque las Confederaciones Hidrográficas ya han iniciado su establecimiento, pero sin estudios previos detallados, aunque a veces con la asesoría del IGME. Con frecuencia se miden pozos existentes. Entre 1965 y 1972 se diseñó y construyó la red piezométrica del Valle Bajo y Delta del Llobregat, con sondeos a varias profundidades en cada emplazamiento. Ha sido muy eficaz aunque presenta problemas de construcción (la tecnología ha evolucionado) y de envejecimiento. Se trata de unos 100 piezómetros en unos 40 puntos. Se han sustituido algunos y hay otros nuevos.

Entre 1992 y 1995 se diseñó y construyó una red piezométrica para el Área de Doñana, por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, asesorada por el Grupo de Agua Subterránea de la Universidad Politécnica de Cataluña, y según modo el operativo concebido por el Servicio Geológico de Obras Públicas, el cual construyó buena parte de los emplazamientos multitubo en un medio de arenas no sin dificultades (Custodio y Palancar, 1995). Esta red se ha ido continuando con la colaboración del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Gracias a esta red se ha podido establecer el flujo tridimensional del sistema acuífero y se han podido realizar estudios sobre el fondo químico del agua subterránea (Manzano et al 2003, 2007).

El fracaso de la gestión actual de las aguas subterráneas se debe en buena parte al desinterés de los planificadores hidráulicos y de los políticos, y a la falta de previsión en la creación de plantillas para hidrogeólogos en las cuencas y de financiación de estudios con la profundidad y rigor necesarios, además del relativo fracaso –con sólo algunas excepciones– en la creación de Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas, CUAS, lo que exige convencer a los usuarios de las ventajas de poner en común parte de sus derechos, y de adquirir participación real y corresponsabilidad en la gestión, y también obligar a los estamentos de la administración del agua de que ellos también deben aprender esa gestión colectiva, olvidando pretéritas situaciones de poder (López-Gunn 2007; López-Gunn y Martínez Cortina 2006).

Todas ellas están incluidas en el artículo 11.3.j de la Directiva Marco del Agua. En algunos acuíferos se debería exigir el aislamiento de la parte superior de los pozos para evitar la infiltración de vertidos, aguas residuales, agroquímicos y otros productos que pueden deteriorar la calidad química del agua subterránea. Una medida análoga es la de evitar en algunos casos la conexión hidráulica de acuíferos a través de la captación. El sellado de pozos abandonados debería ser siempre obligatorio. En algunos casos el sellado de los niveles acuíferos superiores con concentraciones elevadas de nitratos ha producido una mejora importante en la calidad del agua bombeada que ha hecho posible su utilización para consumo humano. Parece conveniente investigar esta posibilidad en muchos acuíferos y en su caso imponer esa práctica para algunos acuíferos en los Planes de Gestión de Cuencas.

Es particularmente importante conocer con suficiente detalle la posible existencia de contaminación por agroquímicos y poner en práctica unas normas estrictas de aplicación, variables según la toxi-

cidad y movilidad de los productos implicados. Existen experiencias que pueden y deben ser adaptadas a nuestro país.

Sería conveniente facilitar el acceso a los inventarios de perforaciones, tanto piezométricos como de calidad de las aguas subterráneas, y también de los estudios realizados. En este sentido es muy de alabar la actitud del IGME de ir haciendo accesibles los datos de las perforaciones más importantes así como de los informes, que pueden obtenerse directamente de la web. Para Andalucía la situación es de notable avance. Los datos piezométricos y de calidad sólo están actualizados en los puntos de la red piezométrica de algunos organismos de cuenca desde que dejó de medirlos el IGME. En las Cuencas Internas de Cataluña (antes Pirineo Oriental) la red piezométrica empezó en 1965 y se fue extendiendo. En Doñana se tiene una red diseñada específicamente, operativa desde 1995.

4. Conclusiones

Para poder cumplir las exigencias de la Directiva Marco del Agua se necesitan estudios más detallados de los acuíferos a la vez que controlar las extracciones de los mismos y seguir su comportamiento a través de redes piezométricas y de calidad. También obliga a regular actividades para evitar o limitar la entrada de contaminantes en las aguas subterráneas y evitar su deterioro y el de las aguas superficiales y los ecosistemas acuáticos y terrestres relacionados con ellas aplicando normas estrictas. Con el principio de recuperación total de costes de los servicios de agua se intenta mejorar la eficiencia económica de las inversiones en los servicios de agua.

El incremento de la utilización de aguas subterráneas en España ha producido en algunos acuíferos efectos negativos de importantes descensos de niveles, disminución de los caudales de los ríos y afección a algunos humedales emblemáticos y ecosistemas asociados. En



Máquina para perforar el subsuelo.

algunos acuíferos se ha producido degradación de la calidad del agua por diversas causas. En acuíferos costeros la intrusión de agua de mar debida en algunas ocasiones a una explotación no planeada ni controlada, puede ser importante. En algunos casos los descensos piezométricos o el aumento de la salinidad del agua ha hecho que su explotación haya desaparecido o se haya reducido mucho, en particular en los de tamaño más reducido. Pero esto no obsta para poder afirmar que esos acuíferos han proporcionado en los últimos 25 ó 30 años cantidades de agua muy importantes por encima

de su recarga media anual. Y los que aún se siguen explotando pueden seguir haciéndolo durante los próximos años, aunque con intensidad algo inferior, pero sin agotar las aguas subterráneas del acuífero.

La asunción de los efectos negativos, principalmente ecológicos, debidos a la explotación intensa de las aguas subterráneas no tiene porque implicar que no se consideren como fuente segura y económica de agua, aunque la continuidad en la explotación requerirá solicitar las correspondientes exenciones a la Comisión Europea, de acuerdo con lo ya previsto en la DMA. Existe

tecnología adecuada para predecir y valorar los efectos hídricos de la explotación de los acuíferos a través de modelos de flujo y transporte, que ya se manejan rutinariamente, con los que se pueden hacer previsiones, que se deben corregir y actualizar periódicamente. También deben hacerse análisis ambientales, económicos y sociales para tomar de forma compartida y transparente las decisiones más adecuadas. Este modo de operar también es de aplicación a los acuíferos sometidos a explotación intensa o con problemas de contaminación o intrusión marina.

El aumento del contenido en nitratos de las aguas subterráneas está creando problemas crecientes para el abastecimiento de poblaciones. En algunas regiones han tenido que abandonarse muchas de las captaciones, que han tenido que ser sustituidas por otras más alejadas o por aguas superficiales, con el incremento de coste consiguiente. Como el contenido de nitratos sigue aumentando el número de poblaciones afectadas crece y en algunos casos las soluciones que se barajan son caras y difíciles. A pesar de estos problemas ni siquiera se ha intentado imponer restricciones a la utilización excesiva de fertilizantes dada la resistencia de los regantes a aceptar esa reducción. Parece necesario abordar con decisión este tema desde diferentes frentes: tratando de convencer a los agricultores, tanto de secano como de regadío, de la ineficacia y coste de aplicar cantidades excesivas de fertilizantes, obligándoles a reducir las cantidades aplicadas, imponiendo normas estrictas de construcción de pozos, o estudiando los procesos de transporte de nitratos en el suelo, zona saturada y captaciones con el fin de conocer mejor los procesos de eliminación y desnitrificación de los fertilizantes para promover las actuaciones más adecuadas. Se deben promover y financiar investigaciones y estudios sobre este tema. También es preocupante la carencia

de estudios y análisis sistemáticos sobre un tema íntimamente ligado al anterior, el de los insecticidas y plaguicidas donde la carencia de estudios y determinaciones de la situación de los acuíferos es preocupante.

Debería corregirse el parón en las inversiones sobre las aguas subterráneas, tanto en estudios como en personal, para evitar que aumente el retraso existente. No hay que olvidar que el Gobierno de España puede recibir fuertes sanciones económicas de la UE si no cumple las exigencias periódicas de información y programas que impone la DMA.

Por último, en el aspecto de or-

El establecimiento de perímetros de protección no sólo choca con la legislación territorial

ganización y normativo se sugiere que se considere la necesidad de modificar los objetivos y la composición de los organismos de cuenca para que se transformen plenamente en organismos de gestión de los recursos hídricos teniendo en cuenta de forma prioritaria los aspectos ambientales y de calidad, conjuntamente con los de cantidad. En la gestión debe incluirse como esencial la participación de los usuarios y los afectados por los problemas del agua. En el aspecto normativo debiera comenzarse ya a considerar la aplicación y redacción de las normas para la protección de las aguas subterráneas de las actividades potencialmente contaminantes a las que se hace referencia en el escrito.

5. Bibliografía

Alcalá, F.J., Custodio, E. (2007) Recharge by rainfall to Spanish

aquifers through chloride mass balance in the soil. En: Groundwater and Ecosystems. Proc. XXXV IAH Congress. Lisbon. (eds. L. Ribeiro, A. Chambel y M.T. Condesso de Melo). CD.

Burke, J.J. (2003) Groundwater for irrigation: productivity gains and the need to manage hydro-environmental risk. En: M.R. Llamas and E. Custodio (eds.), Intensive Use of Groundwater. Challenges and opportunities. Balkema Publishers. Lisse, the Netherlands: 59-92.

Codina, J. (2004) Las aguas subterráneas: una visión social. El caso de la Comunidad del Delta del Llobregat. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales (España). Madrid, 98(2): 323-329.

Collin, J.J., Margat, J. (1993) Overexploitation of water resources: overreaction or an economic reality? Hydroplus, 36: 26-37.

Custodio, E. (2001) Effects of groundwater development on the environment. Boletín Geológico y Minero, Madrid, 111(6): 107-120.

Custodio, E. (2002) Aquifer overexploitation, what does it mean? Hydrogeology Journal, 10(2): 254-277.

Custodio, E. (2003) Task of Euro-Geosurveys under the subsidiarity principle. Geologisches Jahrbuch (Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe), Hannover. Reihe G, 10: 216-244.

Custodio, E. (2005a) The potential for desalination Technologies in meeting the water crisis: comments. Water Crisis: Myth or Reality?. Eds. P.P. Rogers, M.R. Llamas, L. Martínez-Cortina. Taylor & Francis / Balkema, Londres: 323-331.

Custodio, E. (2005b) Groundwater as a key water resource. Libro Homenaje al Profesor D. Rafael Fernández Rubio. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid: 68-78.

Custodio, E. (2007) Groundwater protection and contamination. The Global Importance of Groundwater

in the 21st Century. Proc. Intern. Symp. on Groundwater Sustainability (Ed. S. Ragone, A. de la Hera, N. Hernández-Mora). National Ground Water Association Press, Westerville, OH: Sect 4: 219-231.

Custodio, E., Palancar, M. (1995) Las aguas subterráneas en Doñana. Revista de Obras Públicas. Madrid. 142 (3340): 31-53.

Custodio, E., Llamas, M.R. (1997) Consideraciones sobre la génesis y evolución de ciertos "hidromitos" en España. En Defensa de la Libertad: Homenaje a Víctor Mendoza Oliván. Instituto de Estudios Económicos. Madrid: 167-179.

Custodio, E., Llamas, M.R., Samper, J. (eds.) (1997) La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Asociación Internacional de Hidrología Subterránea-Grupo Español/Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

Custodio, E., Kretsinger, V., Llamas, M.R. (2005) Intensive development of groundwater: concept, facts and suggestions. Water Policy, 7: 151-162.

Dains, S.R., Pawar, J.R. (1987) Economic return to irrigation in India. SDR Research Group Inc. for the U.S. Agency for International Development. New Delhi, India.

DAS (2006) Directiva del Agua Subterránea, Directiva 2006/118/EC sobre protección del agua subterránea contra la polución y el deterioro. Comisión Europea, Bruselas.

Deb Roy, A., Shah, T. (2003) Socio-ecology of groundwater irrigation in India. Navigating in Rough Waters (ed. R.E. McGinn). American Water Works Association. Denver, Colorado, USA: 41-64.

Dhawan, B.D. 1995. Groundwater depletion, land degradation and irrigated agriculture in India. Commonwealth Publisher. New Delhi, India.

DMA, 2000. Directiva Marco del Agua, Directiva 2000/60/CE para establecer un marco comunitario para la actuación en política de agua. Comisión Europea. Bruselas.

DN, 1991. Directiva 91/676/CEE, de 12 de diciembre, relativa a la protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos utilizados en agricultura. Com. Econ. Europea. Bruselas.

Fornés, J.M., de la Hera, A., Llamas, M.R. 2005. The silent revolution in groundwater intensive use and its influence in Spain. Water Policy, 7(3): 253-268.

Galofré, A. (1991) Las comunidades de usuarios de aguas subterráneas: experiencias en la gestión y control de los recursos hidráulicos en Cataluña. Hidrogeología, Estado Actual y Prospectiva. CIHS/CIMNE. Barcelona: 337-357.

Garrido, A., Llamas, M.R. (eds.). 2007. Water policy in Spain. Water Resources for the Future, Washington DC. (en prensa).

Garrido, A., Martínez-Santos, P., Llamas, M.R. 2006. Groundwater irrigation and its implications for

EFICACES Y RENTABLES



Por su gran capacidad, el **filtro automático BOLL-SELF CLEAN tipo 6.18**, es líder en tratamientos de agua de proceso, residuales y refrigeración. Su fiabilidad y exclusivo sistema de funcionamiento bipolar marcan el estándar de calidad y prestaciones en filtración de agua.



BOLLFILTER Protection Systems

Calidad significa Fiabilidad

Bollfilter España S.L.

Polígono Industrial Cami Ral • Paseo del Ferrocarril 339

3ª planta, 2ª puerta • 08860 Castelldefels

Tel: +34 93 634 26 80 • Fax: +34 93 665 22 79

Mail: info@bollfilter.es

water policy in semiarid countries: The Spanish experience. *Hydrogeology Journal*, 14(3): 340–349.

Giordano, M., Villholth, K.G. (eds.) (2007) The agricultural groundwater revolution: opportunities and threats to development. CAB International, Wallingford, UK.

Hernández-Mora, N., Llamas, M.R. (eds.) (2001) La economía del agua subterránea y su gestión colectiva. Fundación Marcelino Botín. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.

Hernández-Mora, N., Llamas, M.R., Martínez Cortina, L. (2001) Misconceptions in aquifer over-exploitation: implications for water policy in Southern Spain. In

Agricultural Use of Groundwater: Towards Integration between Agricultural Policy and Water Resources Management (ed. C. Bori). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 107–125.

Hernández-Mora, N., Martínez Cortina, L., Fornés, J. (2003) Intensive groundwater use in Spain. Intensive Use of Groundwater. Challenges and opportunities (eds.

M.R. Llamas, E. Custodio). Balkema Publishers. Lisse, The Netherlands: 387–414.

Hernández-Mora, N., Martínez Cortina, L., Llamas, M.R., Custodio, E. (2007)

Groundwater issues in southwestern EU member states: Spain country report. European Academies of Sciences Advisory Council (EA-SAC). Fundación Areces. Madrid.

HJ (2006) Social and economic aspects of groundwater governance. Thematic Issue, *Hydrogeology Journal*, 14(3).

Iribar, V., Carrera, J., Custodio, E., Medina, A. (1997) Inverse modelling of seawater intrusion in the Llobregat delta deep aquifer. *Journal of Hydrology*, 198: 226–244.

Lerner, D.N., Issar, A.S., Simmers, I. (1990) Groundwater recharge. *International Association of Hydrogeologists, International Contributions to Hydrogeology*, 8. Heisse, Hannover.

Llamas, M.R. (1975) Non-economic motivations in ground water use: hydroschizophrenia. *Ground Water*, 13(3): 296–300.

Llamas, M.R. (2005) La revolución silenciosa de uso intensivo del agua subterránea y los conflictos hídricos en España. En: Libro Homenaje al Profesor D. Rafael Fernández Rubio. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid: 79–86.

Llamas, M.R., Fornés, J.M., Hernández-Mora, N. y Martínez Cortina, L. (2001) Aguas subterráneas: retos y oportunidades. MundiPrensa y Fundación Marcelino Botín, Madrid.

Llamas, M.R., Martínez Cortina, L. (2002) Groundwater irrigation and poverty alleviation. *Proc. IWRA Regional Symposium: Water for Human Survival*, New Delhi, Central Board for Irrigation and Power, 2: 134–143.

Llamas, M.R., Custodio, E. (2003) Intensive use of groundwater: challenges and opportunities. Balkema, Lisse.

Llamas, M.R., Martínez-Santos (2005) Intensive groundwater use: silent revolution and potential source of social conflicts. *J. Water Resources Planning and Management*: 337–341.

Lopez Geta, J.A. (2007) Estado actual de la implementación de las Directivas en España. Las Aguas Subterráneas en España ante las Directivas Europeas: Retos y Perspectivas. Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Español. (Santiago de Compostela 7–9 noviembre 2007)

López-Gunn, E. 2007. Groundwater management in Spain: Self-regulation as an alternative for the future? En: The Global Importance of Groundwater in the 21 Century (ed. S. Ragone). The National Ground Water Association Press, Westerville, Ohio: 351–357.

López-Gunn, E., Martínez-Cortina, L. (2006) Is self-regulation a myth?: Case study on Spanish groundwater user associations and the role of higher-level authori-

ties. *Hydrogeology Journal*, 14(3): 361–375.

Manzano, M., Custodio, E., Nieto, P. (2003) El fondo natural de la calidad del agua subterránea: implicaciones para la aplicación de la Directiva Marco del Agua en Europa. *Tecnología del Agua*, 241: 38–47.

Manzano, M., Custodio, E., Iglesias, M., Lozano, E. (2007) Groundwater baseline composition and geochemical controls in the Doñana aquifer system (SW Spain). *The Natural Baseline Quality of Groundwater* (eds. W.M. Edmunds & P. Shand). Blackwell Publ., Oxford. Chap. 10: 216–232.

MMA (2000) Libro blanco del agua en España. Secretaría de Estado de Aguas y Costas, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid: 1–637.

MMA (2006) Síntesis de la información remitida por España para dar cumplimiento a los Artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua, en materia de aguas subterráneas. Madrid: 187

Niñerola, J.M. (2007) Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en Cataluña. Las Aguas Subterráneas en España ante las Directivas Europeas: Retos y Perspectivas. Asociación Internacional de Hidrogeólogos Grupo Español. (Santiago de Compostela 7–9 noviembre 2007)

PN (1996) Real Decreto 261/1996, de 16 de febrero, sobre protección de las aguas contra la contaminación producida por nitratos procedentes de fuentes agrarias. Min. Medio Ambiente. Madrid.

Postel, S. (1999) The pillar of sand. W.W. Norton and Co. New York, USA: 1–313.

Price, M. (2002) Who needs sustainability? In: K.M. Hiscock, M.O. Rivett and R.M. Davison (eds.), *Sustainable Groundwater Development*. Balkema Publishers. Lisse, The Netherlands: 191–207.

Ragone, S., Hernández-Mora, N., de la Hera, A., Bergkamp, G., McKay, J. (eds.) (2007) The glo-

bal importante of groundwater in the 21th Century. Proc. Intern. Symp. Groundwater Sustainability. National Groundwater Association Press, Westerville, Ohio.

Sahuquillo, A. (1999) La calidad y la contaminación de las aguas subterráneas en España. ¿quo vadimus?. La Contaminación de las Aguas Subterráneas: Un problema Pendiente (eds. J. Samper, A. Sahuquillo, J.E. Capilla, J.J. Gómez-Hernández). Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Instituto Tecnológico y Geominero de España. Madrid.

Sahuquillo, A. 2000. La utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas en las sequías. Revista R. Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (Esp). 94(2) (2000):187200. Monográfico Aguas Subterráneas y Sequías.

Sahuquillo, A. 2002. Conjunctive Use of Surface Water and Groundwater, in Theme

2.9 Groundwater, Edited by Luis Silveira, in UNESCO Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). Eolss Publishers, Oxford, UK.

Sahuquillo, A. and Lloria. 2003. Conjunctive use as potential solution for stressed aquifers: social constraints. In Llamas M.R. and Custodio, E., 2003 (eds). Intensive use of groundwater: challenges and opportunities. A.A. Balkema Publishers, the Netherlands: 478 pp.

Sahuquillo, A., Pérez Zabaleta, A., Candela, L. y Hernández, S. (2004) Informe sobre la Tramitación del Proyecto de Ley del Real-Decreto 2/2004 por el que se modifica la Ley 10/2001 del Plan Hidrológico Nacional. Madrid 29 de Septiembre de 2004 www.unizar.es/fnca/docu/docusa.pdf.

Sahuquillo, A., Pérez Zabaleta, A. y Candela, L. (2005a) Comentarios al informe de sostenibilidad ambiental de las actuaciones urgentes del Programa A.G.U.A. en las Cuencas Mediterráneas. www.unizar.es/fnca/docu/docusa.pdf.

Younger, P.L. (2007) Groundwater in the environment, an introduction. Blackwell Publ. Oxford: 1-317.

Samper, J., Sahuquillo, A., Capilla, José E. y Gómez-Hernández, J.J. (1999) La contaminación de las aguas subterráneas: Un problema pendiente. Asoc. Internacional de Hidrogeólogos-Instituto Tecnológico y Geominero de España. Madrid.

Schlager, E., López-Gunn, E. (2006) Collective systems for water management: is the tragedy of the common a myth? In: Water Crisis: Myth or Reality (eds. M.R. Llamas & P. Rogers). Balkema, Amsterdam: 43-58.

Shah, T. (2005) Groundwater and human development: Challenges and opportunities in livelihoods and environment. Water Science and Technology, 8: 27-37.

Soluciones medioambientales para la industria y la ciudad

Acredítese gratuitamente
www.ecocity.es



Ecocity es el punto de encuentro y de reflexión del sector. Los últimos avances y las propuestas más innovadoras. Un auténtico foro de conocimiento abierto a los vectores claves para el medio ambiente: residuos, agua, aire y energías renovables. En Fira de Barcelona, el primer recinto ferial de España.

ecocity & industry
EL SALÓN DEL MEDIO AMBIENTE

www.ecocity.es



Fira Barcelona

**Recinto Gran Via
27-29 Mayo 2009**

Aerolínea Oficial
clickair
volando inteligente