

# SOBREEXPLORACIÓN DE ACUÍFEROS Y DESARROLLO SOSTENIBLE<sup>1</sup>

ANTONIO PULIDO BOSCH

*Departamento de Hidrogeología, Universidad de Almería (España)*

## RESUMEN

La Conferencia de Río apostó por el desarrollo sostenible. La pregunta sería ¿es compatible el aprovechamiento de los acuíferos con el desarrollo sostenible de una región? ¿lo es la sobreexplotación?. Se analizan las principales consecuencias directas e indirectas de la explotación y sobreexplotación, ilustrándolas con ejemplos reales. Numerosos acuíferos de todo el mundo son objeto de explotación minera de sus aguas como consecuencia del aumento de la demanda para uso agrícola y doméstico. Cuando el tamaño del acuífero es pequeño o cuando se trata de un acuífero costero, el problema se identifica rápidamente, mientras que si se trata de acuíferos extensos, el vaciado puede durar muchos años, e incluso llegar a alcanzar un nuevo equilibrio con las condiciones de explotación. Se exponen las principales soluciones técnicas y se alude a las soluciones legales, especialmente las recogidas en la Ley de Aguas española, vigente desde 1986; en ella se contempla la declaración de acuífero sobreexplotado y prevé las medidas a tomar, aunque la experiencia demuestra que su puesta en práctica es muy poco ágil.

*Palabras clave:* Sobreexplotación, consecuencias negativas, soluciones técnicas y legales.

## INTRODUCCIÓN

Los asentamientos humanos se han hecho tradicionalmente en entornos con agua y/o con facilidades defensivas. El hombre utilizó en principio el agua en régimen natural, generando un residuo contaminado. En las regiones áridas y/o en los períodos más secos el hombre tuvo que recurrir a sistemas de captación, cambiando en gran medida el régimen natural de los ríos o de los acuíferos. El sistema más sencillo de captación fue el azud de derivación. La realización de

---

1. Trabajo inicialmente elaborado como ponencia para el III Taller Internacional sobre Gestión y Tecnologías de Suministro de Agua Potable y Saneamiento Ambiental, La Habana, Cuba. Dado que el trabajo permanece inédito y que enlaza con la temática de este libro, los editores han considerado oportuna su inclusión.

galerías, a veces de varios cientos de metros o de varios kilómetros de longitud, constituyó un paso cualitativo muy importante en lo que a la afección medioambiental se refiere.

Los cientos de galerías que han jalonado las regiones áridas tuvieron como consecuencia el secado masivo de amplias extensiones en las que el agua se encontraba muy cercana a la superficie. Todas aquellas plantas que subsistían merced a la utilización de este agua poco profunda tuvieron que adaptarse a la nueva situación o simplemente desaparecer. De esta manera aparentemente inofensiva, la galería (*kanats, minas, cimbras, viajes, etc...*) se convirtió en una obra de un impacto ambiental muy apreciable que posiblemente favoreció el avance de la desertización.

Los sistemas más sofisticados de explotación que surgieron a continuación, inicialmente accionados por fuerza animal (norias), y luego por equipos de bombeo cada vez más sofisticados y potentes (pozos y sondeos de distintos tipos) tuvieron y tienen también su fección sobre el medio natural. Igual sucede con los embalses superficiales y las complejas redes de distribución de agua asociadas, que tienen también su incidencia sobre el medio y sobre la vida en el agua.

A medida que la humanidad aumenta en número de individuos, la demanda de agua crece, con el consiguiente aumento de residuos que son susceptibles de deteriorar la calidad de otras masas de agua, limpias en principio. En las áreas de clima húmedo este aumento de la demanda suele tener incidencia, esencialmente, sobre la calidad del recurso. En aquellas otras de clima árido o semiárido, o húmedo con estación seca pronunciada (tipo mediterráneo por ejemplo), el aumento de la demanda plantea además serios problemas de cantidad. En éstas, las condiciones climáticas son favorables a los cultivos de primor, de alta rentabilidad. Debido precisamente a esta alta rentabilidad, la demanda aumenta de forma continuada, degenerando frecuentemente en una explotación minera de los acuíferos (PULIDO BOSCH, 1985).

Cuando tiene lugar el abandono del acuífero se puede producir paralelamente un grave problema socioeconómico, que se traduce en la disminución del nivel de vida y en el empobrecimiento que, a menudo, se acompaña por emigraciones masivas hacia lugares con mayor disponibilidad de agua. Las soluciones pasan con frecuencia por la exportación de agua o por métodos muy costosos de desalación, lo cual no es siempre realizable.

El objetivo esencial de este artículo es hacer unas discusiones sobre la compatibilidad entre la sobreexplotación de los acuíferos y el desarrollo sostenible de una región, para lo cual comenzaré por tratar de definir el concepto de sobreexplotación, no sin descartar una discusión crítica a dicho término, comentar brevemente los principales impactos asociados a la sobreexplotación, y las posibles soluciones técnicas y legales, para terminar comentando algunos ejemplos singulares.

## **CARACTERIZACIÓN DE LA SOBREEXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS**

De una forma sencilla, la sobreexplotación de un acuífero se puede definir como la extracción del agua del mismo en una cantidad superior a la correspondiente a su alimentación, todo ello referido a un período de tiempo suficientemente largo como para diferenciar las consecuencias similares que tendrían períodos anómalamente secos. En consecuencia, el efecto más in-

mediato de la sobreexplotación sería el descenso continuado de los niveles piezométricos, que se acompaña normalmente del agotamiento de las surgencias.

No obstante, la definición y caracterización de la sobreexplotación sigue siendo algo complejo, como ponen de manifiesto numerosos autores (ERHARD-CASSEGRAIN y MARGAT, 1983; CUSTODIO, 1991) y, de manera muy especial, la que podríamos denominar “sobreexplotación legal”, en el sentido que la Ley de Aguas Española y sus Reglamentos (REVERTE y PÉREZ, 1990) desarrollan, dado que ello conlleva una serie de actuaciones inmediatas de difícil puesta en práctica y de gran impacto socioeconómico (ARAGONÉS et al., 1989). En cualquier caso, parece claro que la sobreexplotación sería el resultado de una mala gestión de los acuíferos (LEHR, 1991).

Numerosos autores se muestran totalmente contrarios a aceptar el término sobreexplotación por las connotaciones que tiene (LLAMAS, 1991 y 1998; FOSTER, 1991; CUSTODIO, 1991 y 1993; COLLING y MARGAT, 1993; ADAMS y McDONALD, 1995; SOPHOCLEOUS, 1997), proponiendo alguno en su lugar el término “explotación intensiva” (CUSTODIO, 1996). Si tenemos en cuenta que la gestión de los acuíferos se refiere al “conjunto de normas, leyes, reglamentos dirigidos a sostener, conservar, proteger, restaurar y regenerar esos acuíferos, lo que se traduce en el establecimiento de unas cantidades y calidades del agua susceptibles de ser captadas, compatibles con la demanda, con el medio ambiente y con el uso y ordenación del territorio” (CUSTODIO, 1996), parece que habría muy pocos casos en los que explotar los acuíferos fuera viable. En clima semiárido sería muy difícil, por no decir imposible, gestionar el recurso agua. Toda modificación de régimen natural en la explotación de los recursos conlleva un costo medioambiental. Simultáneamente, el rechazo al término “sobreexplotación” suele basarse en muy diversos argumentos; algunos pasan por la connotación negativa de la palabra “explotación” (ZEBIDI, 1998). Otros ven en dicho término un argumento para los enemigos de la utilización de las aguas subterráneas al generalizar los problemas derivados de su explotación, basados en informaciones “mal documentadas, tendenciosas, y sensacionalistas”, auguran un futuro de penuria y degradación, “sin aportar más soluciones que ahogar el desarrollo y angustiar a la población, imponiendo restricciones injustificadas” (CUSTODIO, 1996).

Es bien cierto que en muchos países los responsables de la planificación y gestión de las aguas suelen ignorar las aguas subterráneas, sea por desconocimiento sobre su funcionamiento, sea por motivos legales; que están siempre dispuestos al argumentar en contra de este recurso invocando para ello toda una serie de errores conceptuales calificados por algunos autores de “hidromitos” (CUSTODIO y LLAMAS, 1997).

Pero, aunque difícil de definir, la sobreexplotación, con las modificaciones que se quiera, es una realidad en muchos lugares. Hay quien piensa que es incluso una opción ética bajo determinadas circunstancias (LLAMAS, 1998). Tal es el caso de la obra faraónica puesta a punto en Libia para transformar en regadío grandes superficies subdesérticas a partir de sondeos que explotan aguas “fósiles”.

## ¿ES COMPATIBLE LA SOBREEXPLOTACIÓN DE LOS ACUÍFEROS CON EL DESARROLLO SOSTENIBLE DE UN ÁREA?

### Aspectos generales

La respuesta no es fácil ante la gran variedad de circunstancias que pueden existir. Cada caso necesitaría un detallado estudio. La respuesta más inmediata sería negativa dado que poco sostenible (VILLARROYA y ALDWELL, 1998) puede ser un desarrollo que acaba con un recurso tan básico como es el agua. Ahora bien, existen multitud de casos en los que la sobreexplotación es planteable como alternativa de desarrollo mientras llegan otros recursos, procedentes de otras cuencas o de origen diverso (desalación de aguas marinas, de aguas salobres, etc...). En lo que se refiere a su identificación, cuando se trata de acuíferos de gran extensión es muy difícil caracterizar adecuadamente los límites de la sobreexplotación, debido a las posibilidades existentes de alcanzar un nuevo equilibrio como consecuencia del avance espacial del frente de influencia.

La sobreexplotación de los acuíferos se ve como algo negativo en sí, olvidando que frecuentemente tiene unos efectos positivos muy importantes para las regiones que lo practican. El más evidente es de tipo económico, pues constituye la posibilidad de desarrollo de un área, que de otra manera no podría desarrollarse. Aunque no tengo una visión especialmente negativa de la sobreexplotación, voy a comentar brevemente algunos de los principales impactos negativos, diferenciando los que son directos de los inducidos o indirectos (PULIDO BOSCH, 1998).

### Consecuencias negativas directas

#### *Descenso de los niveles piezométricos*

La explotación de las aguas subterráneas por cualquiera de los sistemas posibles que incluyan bombeos producen inexorablemente descenso del nivel piezométrico, sea en el entorno inmediato de los pozos o en un amplio área. El descenso puede ser ocasional con posterior recuperación una vez parado el bombeo, o puede ser continuado. La magnitud del descenso depende esencialmente de los parámetros hidráulicos locales, del caudal de bombeo, del volumen total extraído y del régimen de recarga del sistema.

Cuando el bombeo es continuo, con caudales medios que excedan la recarga y durante un tiempo suficientemente largo para evitar desequilibrios locales, el resultado es sobreexplotación o explotación minera de los acuíferos (PULIDO BOSCH et al., 1989; CANDELA et al., 1991; SIMMERS et al., 1992), que en algunos casos puede llevar al vaciado completo de las reservas (PULIDO BOSCH et al., 1995; ANDREU, 1997).

El drenaje de minas conlleva un descenso en los niveles piezométricos, con el consiguiente impacto sobre el medio. Con una adecuada planificación se puede cuantificar el riesgo de que tales cosas sucedan. Un claro ejemplo es el descrito por LAMOREAUX (1989) en Hardee County (Florida) en relación con la explotación de fosfatos en un área kárstica, tanto en lo que se refiere a los pozos de abastecimiento de agua potable como a los utilizados en agricultura y en el abastecimiento a la industria química existente.

### *Compactación inducida del terreno*

La explotación de los acuíferos detríticos, especialmente los confinados aunque no únicamente, puede llevar aparejada una redistribución irreversible de los granos y de los huecos, con la consiguiente pérdida de la capacidad total de almacenamiento. Este hecho ha sido igualmente constatado en las explotaciones petrolíferas, teniendo como consecuencias posibles la aparición de áreas endorreicas, variaciones en la línea de costas, deterioro de edificaciones, etc. Los ejemplos más conocidos internacionalmente serían los de Venecia y México D.F.

### *Compartimentación de acuíferos*

En áreas de estructura tectónica compleja donde la morfología del sustrato impermeable puede ser muy irregular, con algunos sectores levantados y otros hundidos, el descenso del nivel piezométrico puede llevar aparejada la individualización de sectores con evoluciones piezométricas muy diferentes. Un ejemplo clásico español es del sistema de Quibas que inicialmente fue considerado un único sistema; después del inicio de una explotación intensa se llegaron a individualizar siete unidades atendiendo a sus niveles piezométricos y a las características fisicoquímicas de sus aguas. Alguna de estas subunidades mantienen una surgencia mientras que otras tienen el nivel piezométrico a más de 100 m bajo el nivel inicial.

### *Aumento de los costos de explotación*

Debido al descenso de los niveles piezométricos la altura de elevación aumenta y, en consecuencia, el consumo energético también aumenta. Además, en algunos casos se puede hacer necesario reprofundizar el sondeo al ver reducido su rendimiento inicial. Otro aumento del costo sería el derivado del propio equipo de bombeo, más costoso al aumentar la altura de elevación. Un ejemplo de esto, probablemente excepcional, es el acuífero de Crevillente donde los niveles piezométricos descendieron 95 m en 4 años (1979 a 1983), y los costos de extracción pasaron de 2,9 ptas/m<sup>3</sup> a 10,9 ptas/m<sup>3</sup> (PULIDO BOSCH, 1985). A este aumento hay que añadir los gastos de transporte y distribución hacia los puntos de consumo, así como la amortización de las instalaciones. En Crevillente estos gastos alcanzan 7,2 y 21 ptas/m<sup>3</sup>, respectivamente.

### *Deterioro de la calidad del agua*

La explotación puede movilizar aguas de baja calidad generando procesos de mezcla; este agua puede tener un origen natural, o corresponder a procesos de contaminación. Un caso particular, aunque muy generalizado en áreas alpinas, sería cuando el sustrato o alguno de los bordes del acuífero está ocupado por materiales evaporíticos de facies Keuper, por ejemplo. Se produce un aumento de la mineralización total con un cambio de facies desde bicarbonatada cálcica hasta clorurada sódica, con el avance de la sobreexplotación. En algunos casos no puede ser descartada la posible existencia de una zonación vertical (gravitacional) de la calidad de las aguas, con aguas cada vez más salinas con el aumento de la profundidad (PULIDO BOSCH et al., 1997).

Es más frecuente el caso de los acuíferos costeros en los que la sobreexplotación y el consiguiente descenso de los niveles piezométricos provoca un avance de la cuña salina de forma

generalizada o localizada (upconing). Tal es el caso del Campo de Dalías (SE español). La sobreexplotación estacional puede también inducir intrusión marina incluso en años húmedos de elevada recarga, muy superior a los bombeos (CALVACHE y PULIDO BOSCH, 1994). Un caso especial puede ser el deterioro relacionado por el drenaje de áreas mineras sobre carbonatos.

La movilización de partículas finas -arcillas y limos- como consecuencia de las turbulencias generadas por los bombeos es otro aspecto a tener en cuenta, al obligar a decantar y/o filtrar el agua. Ello hace recomendable controlar la turbidez durante las pruebas de evaluación de la potencialidad acuifera de un sector, muy especialmente si se bombea en la propia surgencia o en conductos kársticos (LAMOREAUX et al., 1989).

#### *Abandono de pozos*

En algunos casos, la explotación de acuíferos puede provocar el abandono de pozos por problemas de calidad o de cantidad. El caso del acuífero costero ya mencionado puede conllevar el abandono de pozos y la construcción de otros en áreas del acuífero menos deterioradas. Cuando el nivel piezométrico baja demasiado, algunos pozos pueden reducir su caudal, y llegar a provocar su abandono, por ejemplo si el diámetro final de la obra no es el adecuado como para permitir su reprofundización. Hay casos donde la necesidad de abandono es más evidente como es el caso del vaciado del acuífero, o cuando el nivel se sitúa en áreas muy escasamente productivas; sería el caso de tramos con ausencia de karstificación en series carbonatadas.

#### *Modificaciones inducidas en el régimen de los ríos*

La explotación de un acuífero conectado con un río puede afectar al régimen de este último. Cuando el bombeo alcanza volúmenes elevados el río puede llegar a secarse durante algunos períodos con el consiguiente impacto ecológico (VOLKER y HENRY, 1988). En España hay numerosos ejemplos de ello aunque posiblemente el más conocido sea el del río Guadiana (LLAMAS et al., 1992; MARTÍNEZ ALFARO et al., 1992). El régimen de este río ha cambiado en el área de cabecera como consecuencia de la explotación del acuífero relacionado con él (Parques de las Lagunas de Ruidera y Tablas de Daimiel). En determinados casos puede ser adecuado provocar una alimentación inducida estacional a partir de los ríos para garantizar el abastecimiento en aguas bajas.

#### *Afección o secado de zonas húmedas*

Al igual que sucede con los ríos asociados con acuíferos, las zonas húmedas alimentadas por acuíferos pueden sufrir las consecuencias de la explotación de las aguas subterráneas. Estas zonas húmedas pueden estar situadas en el entorno de los manantiales mismos o localizarse en los sectores en los que el nivel piezométrico se sitúa sobre la superficie del terreno. Las Lagunas de Ruidera en la provincia de Ciudad Real (España) suministran un ejemplo claro de impacto en un acuífero de 2.700 km<sup>2</sup> que recibe una alimentación media de 126 hm<sup>3</sup>/año mientras que se bombean 35 hm<sup>3</sup>/año (DGOH, DGCA e ITGE, 1994). A pesar de que las extracciones son bastante bajas con respecto a la recarga, varias lagunas se han secado y el resto ha reducido sensiblemente su lámina de agua.

### *Problemas legales por afección a los derechos de terceras personas*

El primer problema legal relacionado con la sobreexplotación de acuíferos afecta a los usuarios tradicionales de las surgencias naturales de los sistemas. Los manantiales reducen su caudal en período seco, coincidiendo con el aumento de la demanda. Los derechos adquiridos ancestrales pueden paralizar cualquier explotación no iniciada por esos mismos usuarios. En muchos países hay ejemplos de intento de regulación de acuíferos para lo cual se han llevado a cabo costosos estudios incluyendo sondeos de investigación, pruebas de bombeo y perforación de sondeos de explotación. Algunos ejemplos españoles serían los de Deifontes (provincia de Granada) donde 5 pozos pueden bombear 2,35 m<sup>3</sup>/s, y Pego (provincia de Alicante) donde la capacidad es similar y hay dos estaciones espectaculares de bombeo que no pudieron ser utilizadas por la oposición de los usuarios. Estos problemas pueden llegar a generar largos y costosos procesos judiciales tendentes a proteger los derechos adquiridos de los usuarios.

### *Consecuencias negativas indirectas*

#### *Problemas en redes de evacuación y roturas de infraestructuras*

La subsidencia inducida, al ser diferencial, puede llegar a cambiar los gradientes de las redes de evacuación de aguas residuales, produciendo áreas encharcadas e inundadas; en otros casos, las canalizaciones rompen al superarse la capacidad de deformación elástica del material. A su vez estas fugas y/o encharcamientos provocan la saturación del material con el cambio consiguiente de las propiedades mecánicas del mismo, lo cual se traduce en una aceleración de los procesos destructivos.

#### *Salinización de suelos*

El regadío con aguas subterráneas en las que el contenido salino ha aumentado como consecuencia de la explotación puede provocar la salinización de los suelos. Hay algunos ejemplos en los cuales, además del alto contenido salino en las aguas, la aridez provoca la evaporación de una fracción importante del agua aplicada, con el consiguiente depósito de sal en el suelo. En otros casos el efecto pernicioso en el suelo y/o en la vegetación aumenta debido a la presencia de algunos elementos fitotóxicos. Un ejemplo de esta situación es el Andarax (Almería, SE español), donde las aguas del acuífero profundo (calizas dolomíticas, calizas marmóreas y mármoles) contienen una considerable cantidad de boro (PULIDO BOSCH et al., 1994). En este área, varios miles de hectáreas han tenido que ser abandonadas en los últimos veinte años. El origen de la salinización no es solamente el *acuífero profundo*, sino también el *acuífero detrítico*, el cual ha contribuido a aumentar la salinidad.

#### *Desertización progresiva*

La desertización puede ser debida, entre otros factores, a la salinización del suelo y a la sobreexplotación de las aguas. Los terrenos que tras haber sido transformados en regadío han tenido que ser abandonados debido a la salinización del suelo y/o a la insuficiente cantidad de agua para riego, ponen de manifiesto que son especialmente vulnerables a la erosión. Las prác-

ticas agrícolas en regiones semiáridas como el SE de España, parte de Marruecos, Argelia y Túnez protegen contra la erosión, especialmente los cultivos arbóreos (cítricos, por ejemplo) y las terrazas. El abandono de estas tierras tras la muerte del arbolado favorece el inicio de las erosiones laminar y concentrada, cárcavas y abarrancamientos, procesos remontantes, y piping (GARCÍA-RUIZ et al., 1986).

#### *Inducción de hundimientos y colapsos*

Hay abundantes ejemplos en el mundo que ilustran la generación de colapsos, especialmente en áreas kársticas, muchos de los cuales reflejan una clara relación con la explotación de acuíferos (LAMOREAUX, 1991). El agua actúa como elemento estabilizador al soportar parte de la carga; un descenso en el nivel piezométrico reduce la resistencia del subsuelo, aumentando el riesgo de colapso. En otros casos, la explotación produce la movilización de conductos y huecos kársticos rellenos con arcilla de descalcificación y en equilibrio con el entorno. La evacuación rápida de estos materiales, que contribuyen al equilibrio, puede provocar el colapso del techo carbonatado por falta de soporte (GARAY, 1986).

En Selby County (Alabama; LAMOREAUX y NEWTON, 1986) los estudios realizados pusieron de manifiesto que las subsidencias catastróficas son ocasionadas o aceleradas por las actividades humanas. Los principales mecanismos que contribuyen a ello son los aumentos del gradiente; fluctuaciones del nivel agua y recarga inducida; actividades constructivas incluyendo excavación de zanjas; movilización de recubrimientos; perforaciones; movimientos de equipos pesados; explosiones controladas; y la diversificación y mejora del drenaje. Los países que registran el mayor número de colapsos son probablemente China y Estados Unidos (VOLKER y HENRY, 1988). La dimensión media de los colapsos es inferior a 20 m de diámetro y 10 de profundidad. Las formas pueden también ser muy variables, desde circulares a elípticas, aunque también alargadas. En el Sur de China, los colapsos inducidos por bombeos se aproximan a 3.000 desde el año 1969.

Las consecuencias de los colapsos van desde la destrucción de edificios, daños en carreteras, vías ferroviarias, conducciones y otras líneas de comunicación. El daño causado por el colapso en Whiter Park City (Florida) en Mayo de 1981 superó los 4 millones de dólares (DOUGHERTY y PERLOW, 1987). Cuando el yeso está implicado, los procesos pueden acelerarse, debido a su mayor solubilidad. Aunque no está relacionado con bombeos pero sí con el agua subterránea, los colapsos y subsidencias en diapiros salinos y en otras acumulaciones evaporíticas son también abundantes. Las minas de potasio de Cardona (Cataluña, España) fueron abandonadas, y la explotación tradicional de Wilyzca (Polonia) tiene actualmente serios problemas de estabilidad.

#### *Cambios en las propiedades físicas de los acuíferos*

Los acuíferos son entes dinámicos; ello es tanto más evidente en los acuíferos kársticos desde el momento en que los procesos de karstificación actúan de manera continua siempre que las condiciones favorables persistan. Estos procesos son relativamente rápidos a escala geológica. La explotación puede alterar los potenciales hidráulicos debido a los cambios en la dirección del flujo que aumentan cerca de las áreas sometidas a bombeos intensivos; ello se



puede acompañar por un aumento en el potencial de karstificación con el consiguiente aumento en el volumen de huecos. La karstificación se acelera si como resultado de la explotación se produce una mezcla de agua que genere aguas subsaturadas con respecto a la calcita; es lo que se denomina karstificación por mezcla de aguas (BÖGLI, 1964 y 1980).

Un caso particular puede ser el de los acuíferos costeros (PASCUAL, 1990; BACK y HERMAN, 1991; BACK, 1992) en los que la franja de transición agua dulce - agua salada es muy activa en lo relativo a la disolución, precipitación e intercambios iónicos, lo que puede traducirse en un cambio en el volumen de huecos. Sin embargo, hay que señalar que aunque los procesos son rápidos en relación con el tiempo geológico, no suelen ser visibles a la escala de vida humana.

#### *Inducción de contaminación procedente de grandes distancias*

Dado que los bombeos pueden producir un conoide en régimen transitorio (que es el régimen más común en la naturaleza), el radio de influencia aumenta proporcionalmente al tiempo de bombeo. En consecuencia, los procesos contaminantes pueden afectar a sectores del acuífero que no lo estarían en régimen natural. La movilización de contaminantes puede ocurrir también a partir de las sustancias tóxicas inyectadas en formaciones profundas, práctica común en Florida por ejemplo. La descompresión de la parte superior de los acuíferos debido a la explotación puede inducir un aumento de la polución a través de las fracturas o de los defectos constructivos en los sondeos de inyección.

## **MEDIDAS A TOMAR**

Hay muchas medidas susceptibles de aplicación, entre las que se encuentran las legales y las de carácter técnico. Dentro de las últimas parecería evidente que la medida más inmediata podría ser la reducción de las extracciones, e incluso llegar a su anulación, lo cual casi nunca es posible sin provocar consecuencias socioeconómicas muy graves (ALONSO, 1989).

### **Algunas medidas técnicas**

Algunas medidas susceptibles de ser aplicadas son :

- Realización de recarga artificial, siempre y cuando exista recurso disponible. En casos muy concretos la recuperación de los niveles puede afectar a la estabilidad de los terrenos, especialmente si la “sobreexplotación» ha sido debida a la necesidad de drenar explotaciones mineras (BEUKES y DU PLESSIS, 1990)
- Creación de infraestructura hidráulica que favorezca la recarga inducida (LLOYD, 1991)
- Redistribución de las captaciones dentro del acuífero y/o reducción de los volúmenes bombeados por cada captación; esto puede ser especialmente recomendable en el caso de acuíferos costeros
- Reducción de las extracciones por mejora en las redes de distribución que anulen las pérdidas (caso del Campo de Dalías)
- Desalinización del agua de mar en los acuíferos costeros, o de aguas salobres no aprovechables

- Reutilización de aguas residuales previamente depuradas
- Modificación de las técnicas de regadío hacia procedimientos más eficientes (riego por goteo, por ejemplo)
- Aprovechamiento de las aguas de crecidas, tal y como se lleva a cabo en la actualidad en el Campo de Dalías y como hacen numerosos embalses de laminación de avenidas, de forma programada e intencionada, o no proyectada inicialmente
- Uso conjunto aguas superficiales y aguas subterráneas (CANALES, 1991...).

Conviene recordar que uno de los aspectos que se ha considerado más positivo en la sobreexplotación «temporal» de los acuíferos ha sido su influencia en la reducción de la evaporación (CULLER, 1970), en el caso de áreas de clima semiárido y en los sectores en los que el nivel piezométrico se encontraba muy cerca de la superficie; hay que pensar que en muchos casos este aspecto positivo es calificado de muy distinta manera por botánicos, zoólogos y ambientalistas, por el impacto ecológico que conlleva, muy especialmente si se afectan especies endémicas o escasas (COATES, 1981).

### **Medidas legales**

Las medidas legales difícilmente satisfacen a todas las personas o grupos de presión afectados, al ser muy dispares los intereses puestos en juego. La experiencia española al respecto puede resultar ilustrativa. En efecto, al cabo de más de 10 años de la entrada en vigor de la Ley que regula los aspectos concernientes a la sobreexplotación, no parece que los resultados satisfagan a nadie. Veamos parte del articulado relativo a estos aspectos.

Actualmente en España se encuentra vigente la denominada Ley de Aguas, de 1985, que entró en vigor el 1 de Enero de 1986, que se completa con su Reglamento, aparecido en varias etapas a lo largo de los años siguientes. Esta ley vino a sustituir la de 1879 que ya era poco coherente con los avances tecnológicos acaecidos durante más de un siglo. En los artículos 54.1 y 54.4 (BOE, 1985 y 1986) se contempla la posibilidad de declarar sobreexplotado un acuífero. El primero de ellos enuncia “*el Organismo de Cuenca competente, oído el Consejo del Agua, podrá declarar que los recursos hidráulicos subterráneos de una zona están sobreexplotados o en riesgo de estarlo, debiendo a la vez imponer una ordenación de todas las extracciones para lograr su explotación más racional, y proceder a la correspondiente revisión del Plan Hidrológico.* En el artículo 54.4 retoma la cuestión y señala “*Reglamentariamente se establecerá el procedimiento para la declaración de acuífero sobreexplotado...*” En efecto, los Reglamentos correspondientes precisan muchos de los aspectos tratados en la Ley. Así, el artículo 171.2 define, desde el punto de vista legal, el concepto de sobreexplotación (“*Se considerará que un acuífero está sobreexplotado o en riesgo de estarlo cuando se está poniendo en peligro inmediato la subsistencia de los aprovechamientos existentes en el mismo, como consecuencia de venirse realizando extracciones anuales superiores o muy próximas al volumen medio de los recursos anuales renovables, o que produzcan un deterioro grave de la calidad del agua. La existencia de riesgo de sobreexplotación se apreciará también cuando la cuantía de las extracciones, referida a los recursos renovables del acuífero, genere una evolución de éste que ponga en peligro la subsistencia a largo plazo de sus aprovechamientos*”); ya se ha indicado que muchos autores consideran poco acertada dicha definición.

Los siguientes apartados del artículo citado desarrollan el procedimiento a seguir en caso de declaración de sobreexplotación que lo inicia la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca, de oficio, a instancia de la Comunidad de Usuarios del acuífero, si lo hubiera, o de usuarios que acrediten estar utilizando legalmente, al menos, la mitad de los volúmenes extraídos anualmente (Art. 171.3). Esta Junta de Gobierno tiene la potestad de emitir una declaración provisional de acuífero sobreexplotado, en la que señalará el perímetro de la zona afectada. Ello supone la paralización de todos los expedientes de autorización de investigación o de concesión de aguas subterráneas, la suspensión del derecho de apertura de nuevas captaciones, la paralización de todos los expedientes en trámite de modificación de características de las concesiones de aguas subterráneas, y obliga a la constitución de la Comunidad de Usuarios del acuífero (Art. 171.4).

Además, el Organismo de cuenca tiene que elaborar un Plan de Ordenación de las extracciones (Art. 171.5) que, tras su aprobación por la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca, emitirá la declaración definitiva de sobreexplotación del acuífero (Art. 171.6). El control de la ejecución del Plan de Ordenación corresponde a una Junta de Explotación, cuya constitución se acordará en la declaración definitiva. Esta Junta elaborará un informe anual sobre la marcha del Plan, con las propuestas de modificación que estime procedentes (Art. 171.8).

Tras más de 10 años de la entrada en vigor de la Ley, su funcionamiento y eficacia quedan lejos de ser óptimos (GEIAH, 1995). Resulta muy difícil conciliar los intereses de los distintos usuarios del acuífero, la Administración no consigue un control adecuado al carecer del personal y de los medios suficientes y adecuados, etc. Es por ello que actualmente se asiste a un debate político cuya finalidad es cambiar la ley en aquellos aspectos susceptibles de mejora. Entre otras ideas, se parte de la base de que el agua es muy barata y que su precio debe de aproximarse al costo real, incluyendo el de oportunidad -en muchos casos- con lo que se cree que el consumo puede llegar a reducirse sensiblemente y se mejoraría la gestión, especialmente si se consigue un mayor protagonismo de los usuarios.

## ALGUNOS EJEMPLOS

Son muy numerosos los ejemplos existentes en todo el mundo que ponen de manifiesto la problemática relacionada con la sobreexplotación; no obstante existen al menos dos reuniones recientes que sirven de punto de referencia al momento de abordar la cuestión; se trata del Congreso Nacional de «La Sobreexplotación de Acuíferos» que tuvo lugar en Almería en Diciembre de 1989, y el XXIII Congreso Internacional de la IAH «Acuifer overexploitation» que se celebró en Tenerife en Abril de 1991. En ambos se pueden consultar numerosos ejemplos.

Dentro de las áreas más clásicas referenciadas, se tienen las relativas al entorno de la ciudad de Méjico D.F. en donde la subsidencia inducida supera varios metros, al igual que en el valle de San Joaquín, en California, con subsidencias máximas inducidas cercanas a la decena de metros (BELITZ y HIEMES, 1990). Se da el caso paradójico de que al disminuir los bombeos como consecuencia de la importación de recursos, surgieron una serie de complejos problemas derivados del encharcamiento de un amplio sector del área de transformación agrícola, que obligó a la construcción de canales de drenaje. En la llanura del río Po las subsidencias medidas han sido del orden de 10 mm/año en Milán (1950-1972) y de 28 mm/año en Módena (1950-

1979), registrándose un manifiesto descenso en los años posteriores (4 y 3 mm/año, respectivamente; BERETTA et al., 1991).

Otro ejemplo muy peculiar se refiere a las minas de Pb y Zn de Olkusz, en Polonia que explotan el mineral que rellena discontinuidades calizas y dolomías triásicas y jurásicas (MOTYKA et al., 1994), debiendo para ello drenar el material, dado que la mineralización se encuentra bajo el nivel piezométrico (MOTYKA y PULIDO BOSCH, 1985). El sistema puesto a punto supone la extracción de un caudal de varios m<sup>3</sup>/s, de manera que al ser más de 20 años los que la explotación lleva funcionando, se ha generado un gran conoide; el avance de dicho conoide ha provocado el que los vertidos de una industria papelera situada a varios kilómetros de la explotación se propaguen hacia la mina. Estos vertidos contaminantes contienen un elevado porcentaje de materia orgánica y otras sustancias cuya descomposición en medio anaerobio ha generado metano, con el consiguiente riesgo de explosión al formarse grisú en el frente de explotación.

La concentración de contaminantes en los conoides ligados a los centros de gran bombeo en acuíferos sobreexplotados es un hecho bastante frecuente; en las grandes áreas de transformación agrícola pueden ser pesticidas y nitratos, entre otros, aunque en los sectores industriales se pueden movilizar muchas otras sustancias tóxicas, función de su solubilidad y movilidad. Por su gran espectacularidad merece ser comentado el caso del acuífero detrítico terciario-cuaternario de Ogallala en el SW de Estados Unidos, situado en un área semiárida; la formación permeable tiene una potencia variable entre 60 y 180 m. El acuífero ocupa una superficie de 130.000 km<sup>2</sup> y constituye la principal fuente de abastecimiento agrícola y doméstico del área (JOHNSON, 1991). Explotado desde 1880, en 1980 se llegaron a bombear 7.700 hm<sup>3</sup> que regaron 18.580 km<sup>2</sup> en los tres estados afectados (Texas, Oklahoma y Nuevo México). En amplias áreas el nivel descendió unos 30 m; la reducción de la superficie regada, el aumento de las precipitaciones durante varios años y una gestión más acorde del recurso -incluyendo la aplicación de sistemas de regadío más eficientes- han frenado el descenso en el sistema e incluso existen sectores donde se recuperan los niveles iniciales. Ello hace que LLAMAS et al. (1992) consideren este caso como un claro ejemplo de acuífero sobreexplotado sin que tenga consecuencias negativas sobre el medio.

Un caso muy curioso, de influencia ecológica desigual de la sobreexplotación en un entorno, es el propuesto por RODRÍGUEZ ESTRELLA y LÓPEZ BERMÚDEZ (1991). Se trata del Mar Menor y su relación con el acuífero superficial del Campo de Cartagena. En los períodos de mayor sobreexplotación (años 60) las aguas del Mar Menor registraron la mayor salinidad conocida, como consecuencia de la reducción de los aportes del acuífero. La reducción de las extracciones, como consecuencia de la disminución de los bombeos debido a la llegada de las aguas del trasvase Tajo-Segura, se ha traducido en un considerable aumento de la descarga del acuífero, con la consiguiente reducción de la salinidad, que de 57 g/l ha pasado a unos 40 g/l. La influencia en la flora y fauna ha sido manifiesta; entre otras consecuencias, ha favorecido la colmatación del Mar Menor al proliferar las "sarmentosas", plantas que retienen los sedimentos, impidiendo su transporte al mar abierto. Han aparecido los salmonetes, desconocidos en el Mar Menor antes, aunque muchas otras especies han perdido gran parte de su exquisito sabor peculiar, siendo ya el mismo que el de los equivalentes del Mediterráneo.

También en nuestro entorno se tiene un ejemplo muy singular; se trata del acuífero detrítico

del Alto Guadalentín, objeto de explotación durante varias decenas de años, aunque es a partir de 1973 cuando se comienza a detectar un descenso continuado de los niveles. La magnitud de este descenso, variable de unos sectores a otros, llegó a ser de 4.5 m/año entre 1976 y 1983 y de 10 m/año entre 1984 y 1985, según los datos publicados en 1988 por la Dirección General de Recursos Hidráulicos de la Comunidad de Murcia. La peculiaridad de este caso reside en el hecho de que con el avance de la sobreexplotación se registra un notable aumento del contenido en  $\text{CO}_2$  de las aguas, de manera especialmente marcada a partir del año 1983 en el que la profundidad del nivel piezométrico era de 140 m; el contenido en bicarbonato de las aguas, que en régimen naturaleza cercano a 300 mg/l, pasa a 800 a principios de 1986 y a 1800 mg/l en 1987, en los sectores más "contaminados" (RODRÍGUEZ ESTRELLA et al., 1987). La liberación de estos gases (predomina el  $\text{CO}_2$ , aunque también se han detectado  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ , y  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  y He en mucha menor proporción; op. cit.) parece estar relacionada con la disminución de la carga hidráulica; como consecuencia inmediata las aguas resultaron mucho más agresivas, de manera que los equipos de bombeo, las conducciones metálicas y otras instalaciones han sido corroídas debiendo proceder a su renovación en tan sólo algunos meses de utilización, con el consiguiente costo adicional (CERÓN y PULIDO BOSCH, 1996).

Como ya he comentado, la intrusión marina puede ser consecuencia de la sobreexplotación, en el caso de los acuíferos costeros, aunque no toda sobreexplotación produce intrusión marina, ni toda intrusión marina presupone la existencia de sobreexplotación, en el sentido que ha sido definida. Tal es el caso de la unidad acuífera de Balanegra en el Campo de Dalías, en donde los niveles piezométricos se encuentran varios metros bajo el nivel del mar, sin que hasta el momento se haya detectado intrusión marina, salvo en la denominada escama de Balsa Nueva; ello es debido a la ausencia de conexión hidráulica entre el acuífero y el mar. Por el contrario, en numerosos acuíferos costeros mediterráneos de escasas dimensiones, cuyas entradas suelen ser muy superiores a los bombeos se produce intrusión marina; el concepto de sobreexplotación "estacional" se ha aplicado en estos casos (CALVACHE y PULIDO BOSCH, 1989), concretamente para el acuífero de río Verde (Almuñécar), el cual presenta intrusión marina todos los veranos, desde el año 1982, produciéndose la extrusión y lavado casi total en el período lluvioso invernal (CALVACHE y PULIDO BOSCH, 1991).

Por último, merece ser comentado el caso del acuífero de la sierra de Crevillente, integrado por calizas y dolomías jurásicas subbéticas, fuertemente explotado desde finales de los años sesenta (PULIDO BOSCH et al., 1995 y 1998). Con unos recursos medios estimados en  $10 \text{ hm}^3$  /año, se han llegado a extraer en algunos años más de  $40 \text{ hm}^3$ . Debido a ello se agotaron las surgencias que debían existir y los niveles piezométricos descendieron de forma continuada, más acusada en los años más secos; muchos sondeos tuvieron que ser reprofundizados y algunos abandonados, al penetrar en el sustrato impermeable. La calidad del agua sufrió un deterioro continuado, llegando a superar varios gramos por litro en los sondeos más cercanos a los afloramientos o subafloramientos de materiales de facies Keuper. La declaración provisional de acuífero sobreexplotado, el deterioro de la calidad y la existencia de un período ligeramente más húmedo que la media tuvieron como consecuencia la inversión de la tendencia al descenso en los niveles, de manera que algún año han llegado incluso a subir de forma manifiesta. En la actualidad (Julio de 1997) el nivel de los pozos en el área de mayor bombeo se sitúa a 480 m de profundidad.

## CONSIDERACIONES FINALES

La sobreexplotación constituye uno de los principales problemas que afectan a las aguas subterráneas en todo el mundo y de manera muy especial a España. 78 de 369 unidades hidrogeológicas en la península y Baleares presentan problemas de sobreexplotación, con una superficie afectada de unos 23.000 km<sup>2</sup>, aunque la declaración provisional de sobreexplotación sólo afecta a 13 de ellas (LÓPEZ CAMACHO et al., 1991). La casi totalidad de los acuíferos costeros presentan problemas de intrusión marina, en mayor o menor grado (Batlle, 1988). Todo ello debe hacer reflexionar y tomar medidas a todos los niveles, desde el usuario, pasando por la Administración y los centros de investigación.

En efecto, es de la concienciación de todos de donde pueden surgir las soluciones, aunque los procesos identificativos y de control y seguimiento deben de ser puestos a punto -en muchos de sus aspectos escasamente conocidos- mediante la adecuada investigación. Por último, parece claro que sobreexplotación de acuíferos y desarrollo sostenible no son muy compatibles, aunque en muchos casos es una alternativa socioeconómica viable si se quiere mantener el nivel de vida de una región; cuando existen fuentes alternativas de suministro, la sobreexplotación ha sido practicada con mucho éxito, como solución provisional. La problemática se agudiza en las regiones de clima árido y semiárido en las que la explotación se convierte en una auténtica “explotación minera”.

## AGRADECIMIENTOS

El presente artículo ha sido elaborado en el marco del Proyecto AMB95-0493 financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología. También se ha beneficiado de la experiencia adquirida en el proyecto ERB-CIPA-CT93-0139 “Ecological problems of karst waters caused by overexploitation and contamination. On the example of North-East Bulgaria”, financiado por la Unión Europea (Programa COPERNICUS) del que el firmante fue coordinador.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, B.; McDONALD, A. (1995). *Over-exploited of aquifers-Final Report*. British Geological Survey, Technical Report WC/95/3, 53 p.
- ALONSO, C. (1989). «Soluciones para los acuíferos del Campo de Dalías». In “*La sobreexplotación de acuíferos*”, I: 147-156.
- ANDREU, J.M. (1997). *Contribución de la sobreexplotación al conocimiento de los acuíferos kársticos de Crevillente, Cid y Cabeço d’Or (provincia de Alicante)*. Tesis Doct. Univ. Granada.
- ARAGONES, J.M. et al. (1989). «Planes de ordenación de acuíferos sobreexplotados. La experiencia del de la Sierra de Crevillente (Alicante)». In: *La sobreexplotación de acuíferos*, I: 177-191. Almería.
- BACK, W. (1992). «Coastal karst formed by groundwater discharge, Yukatan, Mexico». In *Hydrogeology of selected karst regions*. Paloc, H. & Back, W. Eds. IAH, 13: 461-466. Verlag Heinz Heise, Hannover.
- BACK, W. ; HERMAN, J.S. (1991). «Geochemical consequences of saltwater intrusion into carbonate aquifers». *XXIII IAH Congress*, I: 35-38. Canary Island.
- BATLLE, A. (1988). «Gestión de los acuíferos costeros en España». *TIAC’88*, I: 351-375.
- BELITZ, K.; HIEMES, F.J. (1990). *Character and evolution of the groundwater flow system in the central part of the western San Joaquin Valley, California*. U. S. Geol. Survey Water-Supply Paper 2348. 28 p.
- BERETTA, G.P. et al. (1991). «Sobreexplotación de los acuíferos en la llanura del Po: aspectos hidrogeológicos e hidroquímicos». *XXIII IAH Congress*, I: 503-506. Canary Island.
- BEUKES, J.H.I.; DU PLESSIS, A. (1990). «Surface subsidences and sinkhole formation due to the partial recharge of a dewatered area on the far west rand, republic of South Africa». *IAH Selected papers on Hydrogeol.*, 1: 43-52.
- BOE (1985). *Ley 29/1985, de 2 de Agosto, de Aguas*; nº 189 de 8 de Agosto; corr. Errores nº 243, 10 de Octubre.
- BOE (1986). *Real Decreto 849/1986, de 11 de Abril, por el que se aprueba el Reglamento del dominio público hidráulico que desarrolla los títulos preliminar I, IV, V, VI y VII de la Ley de Aguas*. nº 103 de 30 de Abril.
- BÖGLI, A. (1964). «Corrosion par mélange des eaux». *Int. Journ. Spél.* 1: 61-70.
- BÖGLI, A. (1980). *Karst hydrology and physical speleology*. Springer-Verlag. Berlin.
- CALVACHE, M.L.; PULIDO BOSCH, A. (1989). «Estudio de la sobreexplotación estacional mediante un modelo de flujo en el acuífero del río Verde (Almuñécar, Granada)». Congr. Nac. “*La Sobreexplotación de Acuíferos*”, 1: 21.34. Almería.
- CALVACHE, M.L.; PULIDO BOSCH, A. (1991). «Saltwater intrusion into a small coastal aquifer (rio Verde, Almuñécar SE Spain)». *Journ. Hydrol.*, 129: 195-213.
- CALVACHE, M.L.; PULIDO BOSCH, A. (1994). «Modeling the effects of salt-water intrusion dynamics for a coastal karstified block connected to a detrital aquifer». *Ground Water*, 32 (5): 767-777.
- CANALES, A.G. (1991). «Sobreexplotación y manejo del agua subterránea en México». *XXIII IAH Congress*, I: 275-279. Canary Island.

CANDELA, L.; GÓMEZ, M.B.; PUGA, L.; REBOLLO, L.; VILLARROYA, F. (1991). *Aquifer exploitation*. XXIII IAH Congress. 580 p. Islas Canarias.

CERÓN, J.C.; PULIDO BOSCH, A. (1996). «Groundwater problems resulting from CO<sub>2</sub> pollution and overexploitation in Alto Guadalentín aquifer (Murcia, Spain)». *Env. Geol.*, 28 (4) : 223-228.

COATES, D.R. (1981). *Environmental Geology*. John Wiley & Sons. 701 p. New York.

COLLING, J.J.; MARGAT, J. (1993). «Overexploitation of water resources: overreaction or an economic reality?». *Hydroplus*, 36: 26-37

CULLER, R.C. (1970). «Water conservation by removal of phreatophytes». *Am. Geoph. Union Trans.* 51(10): 684-689.

CUSTODIO, E. (1991). «Characterisation of aquifer overexploitation: comments on hydrogeological and hydrochemical aspects: the situation in Spain». *XXIII IAH Congress*, I: 3-19.

CUSTODIO, E. (1993). «Aquifer intensive exploitation and over-exploitation with respect to sustainable development». *Int. Conf. Environmental Pollution. European Center for Pollution Research*. 2: 509-516.

CUSTODIO, E. (1996). «Explotación racional de las aguas subterráneas». *Acta Geológica Hispánica*; 30: 21-48.

CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R. (1997). «Consideraciones sobre la génesis y evolución de ciertos hidromitos en España». *Libro Homenaje a Víctor Mendoza*. Instituto de Estudios Económicos; p. 168-179.

DGOH, DGCA; ITGE (1994). *Libro blanco de las aguas subterráneas*. 135 p. MOPTMA. Madrid.

DOUGHERTY, P.H.; PERLOW, M. (1987). «The Macungie sinkhole, Lehigh Valley, Pensilvania: cause and repair». *Envir. Geol. Water Sci.* 12 (2). 89-98.

ERHARD-CASSEGRAIN, A.; MARGAT, J. (1983). *Introduction à l'économie générale de l'eau*. Masson, 361 p. Paris.

FOSTER, S.S.D. (1991). «Unsustainable development and irrational exploitation of groundwater resources in developing nations - an overview». *XXIII IAH Congress*, I: 385-401. Canary Island.

GARAY, P. (1986). «Informe geológico sobre la sierra de hundimiento de Pedreguer (Alicante)». *Jorn. Karst Euskadi*, 1: 323-333.

GARCÍA RUÍZ, F.J.; LASANTA, T.; ORTIGOSA, L.; AMAEZ, J. (1986). «Pipes in cultivated soils of La Rioja: origin and evolution». *Z. Geomorph. Suppl.* 58: 93-100.

GEIAH (1995). *Las aguas subterráneas en la Ley de Aguas Española: un decenio de experiencia*. 2 vol. Murcia.

JOHNSON, K.S. (1991). «Exploitation of the tertiary-quatemary Ogallala Aquifer in the High Plains of Texas, Oklahoma and New Mexico, Southwestem U.S.A». *XXIII IAH Congress*, I: 313-328. Canary Island.

LAMOREAUX, P.E. (1989). «Water development for phosphate mining, in a karst setting in Florida. A complex environmental problem». *Environ. Geol. Water Sci.* 24 (2): 117-153.

LAMOREAUX, P.E. (1991). «Environmental effects to overexploitation in a karst terrane». *XXIII IAH Congress*; I: 103-113. Canary Island.



LAMOREAUX, P.E.; NEWTON, J.G. (1986). «Catastrophic subsidence: an environmental hazard, Shelby County, Alabama». *Environ. Geol.*; 8: 25-40.

LAMOREAUX, P.E. et al. (1989). «Hydrogeologic assessment - Figeih Spring, Damascus, Syria». *Environ. Geol. Water Sci.*; 13 (2): 73-127.

LEHR, J.H. (1991). «Perceived aquifer overexploitation is, in reality, mismanagement-commonly correctable by artificial recharge and well field design». *XXIII IAH Congress*; I: 329-338. Canary Island.

LÓPEZ CAMACHO, B. et al. (1991). «Unidades hidrogeológicas con problemas o riesgos de sobreexplotación (territorio peninsular e Islas Baleares)». *XXIII IAH Congress*; I: 539-544. Canary Island.

LLAMAS, M.R. (1991). «Groundwater exploitation and conservation of aquatic ecosystems». *XXIII IAH Congress*; I: 115-131. Canary Island.

LLAMAS, M.R. (1998). Over-exploitation of groundwater (including fossil aquifers). UNESCO, *Water: a looming crisis*. Paris (en prensa). «.

LLAMAS, M.R.; BACK, W.; MARGAT, J. (1992). «Groundwater use: equilibrium between social benefits and potential environmental cost». *Applied Hydrogeology*; 2: 3-14.

LLOYD, J.W. (1991). «Protective and corrective measures with respect to the overexploitation of groundwater». *XXIII IAH Congress*; I: 185-206. Canary Island.

MARTÍNEZ ALFARO, P.E.; MONTERO, E.; LÓPEZ-CAMACHO, B. (1992). «The impact of the overexploitation of the Campo de Montiel aquifer on the Lagunas de Ruidera ecosystem». *Selected Papers IAH*; 3: 87-91. Verlag Heinz Heise. Hannover.

MOTYKA, J.; PULIDO BOSCH, A. (1985). «Karstic phenomena in calcareous-dolomitic rocks and their influence over the inrushes of water in lead-zinc mines in Olkusz region (S of Poland)». *Int. Journ. Mine Water*; IV. 1-12.

MOTYKA, J.; WITZAK, S.; ZUBER, A. (1994). «Migration of lignosulfonates in a karstic-fractured-porous aquifer; History and prognosis for a Zn-Pb mine, Pomorzany, southern Poland». *Environ. Geol.*; 24. 144-149.

PASCUAL, J.M. (1990). *Hidrogeoquímica del macizo carbonatado de Garraf*. Tesis Doct. Univ. Pol. Cataluña.

PULIDO BOSCH, A. (1985). «L'exploitation minière de l'eau dans l'aquifère de la Sierra de Crevillente et ses alentours (Alicante, Espagne)». *XVIII IAH Congress*; p. 142-149. Cambridge.

PULIDO BOSCH, A. (1998). «Karst water exploitation. Introduction». In: *Karst hydrogeology and human activities*. IAH; 20: 225-234.

PULIDO BOSCH, A.; CASTILLO, A.; PADILLA, A., eds. (1989). *La sobreexplotación de acuíferos*. Congreso Nacional, Almería. ITGE Madrid, 687 p.

PULIDO BOSCH, A. et al. (1989). *Caracterización hidrogeoquímica del Campo de Dalías (Almería)*. Serv. Estudios IARA. 265 p. Granada.

PULIDO, BOSCH, A. et al. (1994). «Consideraciones sobre la contaminación de las aguas subterráneas en el Bajo Andarax (Almería)». *Jorn. Anál. y Evol. Contamin. Aguas Subt.* II: 179-196. Alcalá de Henares.

PULIDO BOSCH, A.; MORELL, I.; ANDREU, J.M. (1995). «Hydrogeochemical effects of the groundwater mining of the Sierra de Crevillente (Alicante, Spain)». *Envir. Geol.*; 26: 232-239.

PULIDO BOSCH, A.; ANDREU, J. M.; ESTEVEZ, A. (1997). «Sur l'existence d'une zonation hydrogéochimique verticale dans certains aquifères karstiques». In: *Karst Hydrology*. IAHS Publ.; 247: 137-144.

PULIDO BOSCH, A. et al. (1998). «La surexploitation dans certains aquifères du Sud-Est espagnol». In: *Water: a looming crisis?* Edit. H. Zebidi. IHP-V; 18: 293-298. UNESCO.

REVERTE, A.; PÉREZ, E. (1990). *Legislación de Aguas*. 4a Edic. 559 p. Edit. Tecnos, Madrid.

RODRÍGUEZ ESTRELLA, T.; GARCÍA, V.; ALBACETE, M. (1987). «Problemática de la presencia de gases en las aguas subterráneas del Valle del Guadalentín (Murcia)». *Hidrogeol. Rec. Hidr.*, XII: 117-137.

RODRÍGUEZ ESTRELLA, T.; LÓPEZ BERMÚDEZ, F. (1991). «Algunas consecuencias ecológicas de la sobreexplotación de acuíferos en los humedales del Sureste español». *XXIII IAH Congress*, I: 163-166. Canary Island.

SIMMERS, I., VILLARROYA, F.; REBOLLO, L.F. eds. (1992). *Selected Papers on Aquifer overexploitation*. IAH, 3: 391 p.

SOPHOCLEOUS, M. (1997). «Managing water resources systems: why "safeyield" is not sustainable». *Ground Water*, vol. 35, 4: 361.

UNCED (1992). *The Rio Declaration on environmental development*. Rio de Janeiro.

VILLARROYA, F.; ALDWELL, C.R. (1998). «Sustainable development and groundwater resources exploitation». *Environ. Geol.*, 34: 111-115.

VOLKER, A.; HENRY, J.C. edit. (1988). «Side effects of water resources management». IAHS Publ. no 172. 269 p.

ZEBIDI, H., edit. (1998). *Water: a looming crisis?*. UNESCO, IHP-V. Techn. Doc. Hydrol. Nº 18, 536 p. París.