

# Explotación racional de las aguas subterráneas

EMILIO CUSTODIO, DR. I.I.

Dep. Ing. Terreno/Centro Intern. Hidrol. Subter. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.

## RESUMEN

La explotación racional de las aguas subterráneas tiene como objetivo obtener de los acuíferos las cantidades de agua necesarias, con la adecuada calidad, adaptadas a las circunstancias de espacio y tiempo, y respetando los condicionantes medioambientales. No se trata de un objetivo aislado sino integrado en la utilización del conjunto de recursos de agua, aprovechando las circunstancias favorables de cada uno y minimizando en lo posible los inconvenientes. Esta explotación racional tiene una base eminentemente técnica pero también influyen decisivamente consideraciones económicas, sociales, culturales y políticas, además de las medioambientales. La explotación racional requiere conocer el funcionamiento de los sistemas acuíferos y los cambios cuantitativos y cualitativos resultantes de las diferentes posibilidades de explotación, tanto a nivel general como del sistema particular que se considere. Esto necesita una buena base de información y medios de observación adecuados y adaptados a la situación real, que va cambiando a lo largo del tiempo. La utilización racional se apoya, además de en las medidas técnicas convencionales o especiales de cada caso, en técnicas de gestión y en su desarrollo dentro de un marco de planificación, tanto de los aspectos cuantitativos como de la calidad. En zonas de recursos de agua escasos tienden a dominar los aspectos de cantidad, pero los de calidad son igualmente importantes a menos de entrar en utilizaciones que acaban siendo no racionales. La falta de racionalidad en la explotación de las aguas subterráneas en general es fruto de desconocimiento, mala gestión, insolidaridad, falta de aplicación del principio de subsidiaridad y preferencia arrogante de alternativas preestablecidas.

*Palabras Clave:* Aguas subterráneas, utilización racional, acuíferos, gestión, planificación, sobreexplotación, salinización, vulnerabilidad.

## ABSTRACT

The rational exploitation of groundwater points to obtain from the aquifers the quantity of water which is needed, with the due quality, adapted to the spatial and time circumstances, and respecting the environmental restrictions. These are not isolated goals but integrated with the full set of water resources, by taking advantage of the favourable aspects of each one and at the same time minimizing the drawbacks. This rational exploitation is based on dominantly technical considerations but other economic, social, cultural and political considerations are also of decisive influence, moreover those related to preservation of the environment. The rational exploitation needs a good knowledge of the behaviour of the aquifer systems as well as of the quantity and quality changes resulting from the different exploitation alternatives, both at general level and applied to the case under consideration. This requires good information support and monitoring means, which have to be adapted and suited to the real situation. This real situation is a continuously changing one. The rational situation, besides the conventional and specific techniques needed to deal with a given case, relies on management techniques and how they are implemented in the framework of a water plan, taking into account both water quantity and quality aspects. In areas with scarce water resources, water quantity aspects tend to be the main concern of managers, but water quality aspects are equally important if irrational groundwater use is to be prevented in the near future. Lack of rationality in aquifer water use is generally the result of poor knowledge, incorrect management, lack of solidarity, the subsidiarity principle being not applied and arrogant preference of pre-established alternatives.

*Palabras Clave:* Groundwater, rational use, aquifer, management, planning, over exploitation, salinisation, vulnerability

## 1.- INTRODUCCIÓN

Las aguas subterráneas no son un aspecto del recurso agua separado, sino que está íntimamente interrelacionado con los otros a través del ciclo hidrológico. No obstante posee características que hacen que esas aguas subterráneas sean especialmente atractivas, asequibles, evaluables y merecedoras de conservación, protección y restauración. Por eso tienen y continuarán teniendo un importante papel en la satisfacción de las necesidades de agua de la población humana y de sus actividades económicas, estéticas y recreativas. Además están muy ligadas a las etapas iniciales de desarrollo económico y social de muchas regiones. Por otro lado su descarga mantiene los caudales de base de ríos y humedales de interés medioambiental.

La utilización de las aguas subterráneas como fuente de suministro, tanto para unos urbanos, industriales y rurales, como para fines agrícolas de regadío, tiene numerosos aspectos favorables, como se expondrá más adelante, tanto técnicos, como económicos, como de oportunidad. No obstante, son también numerosas las circunstancias desfavorables que se derivan de dicha explotación, aún cuando en buena parte no se trata efectos negativos propiamente dichos sino que son consecuencias conocidas y previsibles asociadas a la naturaleza de los acuíferos y de la propia explotación. Lo que con frecuencia se consideran inconvenientes o aspectos desfavorables en buena manera son el resultado de expectativas, previsiones o evaluaciones incorrectas y sesgadas derivadas del desconocimiento del comportamiento de las aguas subterráneas o de indebidas extrapolaciones de lo que se observa en los sistemas de aguas superficiales (Custodio, 1995b).

El amplio uso de las aguas subterráneas contrasta con la frecuente propensión de los organismos públicos, en especial los más dotados de recursos económicos, hacia las grandes obras hidráulicas para poner a disposición las aguas superficiales. Aunque en ello existen claros aspectos positivos sobre todo para grandes áreas urbanas o industriales, o para extensos desarrollos agrícolas, no siempre son económicamente ni a priori ni a posteriori la solución más idónea. También hay que reconocer que el uso incontrolado y abusivo de las aguas subterráneas lleva a situaciones incómodas y a veces insostenibles (Volker y Henry, 1988), a las que las denomina recientemente "de sobreexplotación", término que será discutido más adelante.

Las mejores oportunidades nacen de la consideración del conjunto de recursos de agua (superficiales, subterráneas, residuales tratadas, desalinizadas, ...), en sus cir-

cunstancias naturales o modificados por obras hidráulicas, para asignar objetivos de puesta a disposición de agua en cantidad y calidad, en su lugar y tiempo, respetando restricciones técnicas, económicas y legales, y también políticas y culturales, y salvaguardando el medio ambiente. Es lo que se denomina "uso conjunto", que está muy relacionado con el "utilización racional" y la "gestión" de los recursos de agua, y con la adecuación de la demanda de agua.

Así, la explotación racional de las aguas subterráneas es aquella explotación que trata de obtener los recursos de agua que se necesitan para satisfacer una determinada demanda, que es variable en el espacio y en el tiempo, de la forma más económica y garantizada posible, tanto en cantidad como en calidad, de forma coordinada y conjunta con los otros recursos de agua disponibles o desarrollables, y de forma que los efectos negativos y costes directos, indirectos, sociales y ambientales se compensen sobradamente con los beneficios particulares y generales derivados de la explotación, en el contexto inmediato, de la generación actual y de las generaciones venideras.

El agua es en muchas áreas un bien económico escaso -- en el sentido de limitado -- y por lo tanto objeto de competencia, gestión y planificación, con sujeción a considerandos económicos, respeto a principios sociales de solidaridad y humanitarismo, salvaguarda del patrimonio medioambiental y consecución de fines políticos lícitos. El uso del término escasez para justificar actuaciones no serían viables que sin el miedo que se puede infundir en una población mal informada, es una actuación inadmisibles (Llamas, 1994b), y por supuesto fuera de lo que se puede considerar una utilización racional.

La utilización racional de las aguas subterráneas trata de obtener las mayores ventajas minimizando los inconvenientes, mediante la adecuada gestión por personas suficientemente preparadas utilizando los técnicos y herramientas idóneas, dentro de un suficiente marco económico, social, político y moral, con sujeción a una planificación bien realizada, flexible y socialmente aceptada y participada, con unos objetivos viables de protección del recurso agua y de la restauración de los elementos del sistema, incluidos los acuíferos. Se necesita además un contexto de ordenación territorial que dé contenido real a los objetivos de la gestión y provea los medios para que sea posible. Así la "utilización racional" va más allá de lo puramente técnico. Lo técnico da las pautas pero la racionalidad es el resultado de la consideración del conjunto de condicionantes, económicos, sociales y morales.

Todo lo anteriormente expuesto se centra en la consideración de los acuíferos como fuentes de agua de suministro, sin considerar otras funciones importantes. Tal es el caso de los aspectos medioambientales, principalmente en relación con los humedales y manifestaciones de las aguas subterráneas. También es posible estudiar y evaluar las aguas subterráneas bajo otros puntos de vista, como por su implicación en procesos geomorfológicos, de meteorización, de mineralización, geotérmicos, sistmológicos, vulcanológicos, etc., que aquí no se considerarán, pero que son también relevantes, y modulan lo que es utilización racional.

## 2.- CAUDAL SEGURO, DESARROLLO SOSTENIBLE Y UTILIZACIÓN RACIONAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El concepto de caudal seguro de explotación del acuífero se desarrolló en el primer cuarto del presente siglo en las zonas semiáridas de Norteamérica para tratar de cuantificar la cantidad de agua extraíble. Fue inicialmente usada por Meinzer (1920) y su desarrollo se recoge en el manual de gestión de acuíferos de la ASCE (1972) y en Walton (1970).

Se puede definir como caudal seguro (safe yield) de explotación de un acuífero, aquel que se puede extraer permanentemente sin producir resultados indeseables. Este concepto se perfecciona con el de caudal perenne (perennial yield), que según Young (1970) y Todd (1976) es el caudal de agua que puede ser extraído perennemente bajo condiciones específicas de operación sin producir un resultado que lleve a una situación adversa. Variando esas condiciones es posible llegar a otro valor del caudal perenne. Por lo tanto no se trata de un valor único. Entre otras cosas es función de la distribución y profundidad de los pozos, de las limitaciones legales y administrativas existentes, y del costo de obtención del agua. También es función de las limitaciones por interferencias, afecciones a rios y manantiales, salinización y otros efectos de la explotación que se comentarán más adelante. La subjetividad de lo que es efecto indeseable - además varía según el punto de vista del propio usuario, de otros usuarios, de la Administración del agua, del público y de los medioambientalistas (Custodio, 1993a) - deja indefinidos los conceptos de caudal seguro y de canal perenne, y explica su progresiva caída en desuso.

Recientemente ha hecho aparición el concepto de uso sostenible - o sustentable - que se orienta a que el recurso no solo sea para el disfrute y satisfacción de las necesidades de la generación actual, sino también de las futuras.

Desarrollo sostenible es aquel desarrollo que satisface las necesidades presentes sin comprometer la capacidad de que las generaciones futuras puedan satisfacer las suyas (WCED, 1987), acompañando el desarrollo económico con la preservación del medio ambiente (Haimés, 1992). Falta una definición precisa del término, lo cual es común cuando se trata de encerrar una elevada complejidad bajo una simple denominación.

Con respecto al agua, como sustancia necesaria a la vida sin otras alternativas, y como elemento esencial de buena parte de las actividades humanas, el uso sostenible apunta a objetivos sociales y morales (Pérez Adán, 1992), y también técnicos y económicos. El desarrollo sostenible del recurso agua implica asegurar ahora y en el futuro la disponibilidad en cantidad y calidad, y en el momento y lugar apropiados, de los recursos de agua existentes mediante la adecuada operación, manejo y reposición de las obras y captaciones. En su aplicación a los acuíferos se trata de sostener una fuente segura de suministro normal y de emergencia, sobre todo para economías débiles.

Este uso sostenible va ligado a la utilización racional de los recursos de agua subterránea, aunque uno no implique necesariamente el otro. La "racionalidad" es también algo que es difícil de definir con precisión ya que la "razón" que guía las actuaciones tiene muchos aspectos, condicionantes y posibles sesgos, y por supuesto no solo es de naturaleza técnica. La racionalidad se puede acotar en cierto modo por oposición a explotación incontrolada, aunque en actuaciones reguladas por la ley de la oferta y demanda acaba apareciendo una cierta racionalidad si las interferencias administrativas, políticas y culturales no la desvía en exceso.

El uso racional del agua subterránea tiene una base muy técnica y utiliza herramientas que se van sofisticando a medida que la explotación se acerca a los recursos desarrollables. La herramienta base es la identificación y cuantificación detallada de los elementos del balance de agua (fig. 1).

Esta explotación racional no es un problema de solución única. Son múltiples las posibilidades, y no solo hay que elegir aquellas más adecuadas a las circunstancias de un cierto tiempo, según los conocimientos e información de que se disponga en cada momento, sino que se requiere adecuaciones progresivas a medida que evolucionen las circunstancias, demandas, prioridades y comprensión de la situación. Así la calificación de racional es más adecuada que la de óptima, aunque la racionalidad

tienda a optimizar. La optimización no es sólo técnica e hidrológica sino también económica, social, medioambiental y política. La dificultad para cuantificar estos últimos aspectos hace que haya que conformarse con la racionalidad, es decir, mediante actuaciones conformes al mejor entender, con los mejores conocimientos al uso, con la información disponible y bajo las restricciones de las circunstancias externas actuantes. Es importante destacar que la racionalidad va muy ligada a la adecuada, actualizada y no sesgada información sobre el comportamiento del acuífero en cuanto a tal y en sus relaciones con el exterior, y de las implicaciones económicas, sociales y medioambientales. Esa racionalidad supone adecuación a la evolución y condiciones cambiantes.

Los aspectos ligados a la demanda de agua en general se consideran como un condicionante impuesto a las actuaciones para poner a disposición el agua, y el uso sostenible suele admitir tácitamente como que esas demandas vienen dadas. En la realidad esas demandas de agua, además de mal conocidas en el espacio y en el tiempo - sobretodo en el mundo agrario, que en España supone la utilización del 80% de los recursos de agua dulce - se pueden llegar a modificar sin cambiar substancialmente ni los niveles de vida ni las productividades agrícolas e industriales. La consideración y adecuación

de la demanda de agua debería ser parte de la utilización racional, gestión y planificación del agua subterránea. Normalmente se propende a motivar y forzar el ahorro de agua. Esto, que normalmente es una política de gestión correcta, suele ser un objetivo que se intenta universalizar, a modo de principio. No obstante hay circunstancias en que la racionalidad muestra que no siempre el ahorro es la solución, y a veces es el inicio de problemas en otro lado, como cuando los excedentes de riego con aguas de otro origen - a veces no utilizables - son una parte importante de la recarga de un acuífero.

La utilización racional de los recursos de agua, incluida el agua subterránea, con el debido respeto a los derechos razonables existentes, al medio ambiente y a las generaciones futuras, requiere una adecuada gestión, por personas e instituciones suficientemente preparadas, dentro de un marco económico, social, político y moral suficiente, con sujeción a una planificación bien realizada, flexible y socialmente aceptada y participada, con unos objetivos viables de protección del recurso agua y de la restauración de los elementos del sistema, incluidos los acuíferos. Se necesita además un contexto de ordenación territorial que dé contenido real a los objetivos de la gestión y provea los medios para que sea posible. Estos aspectos se desarrollarán más adelante.

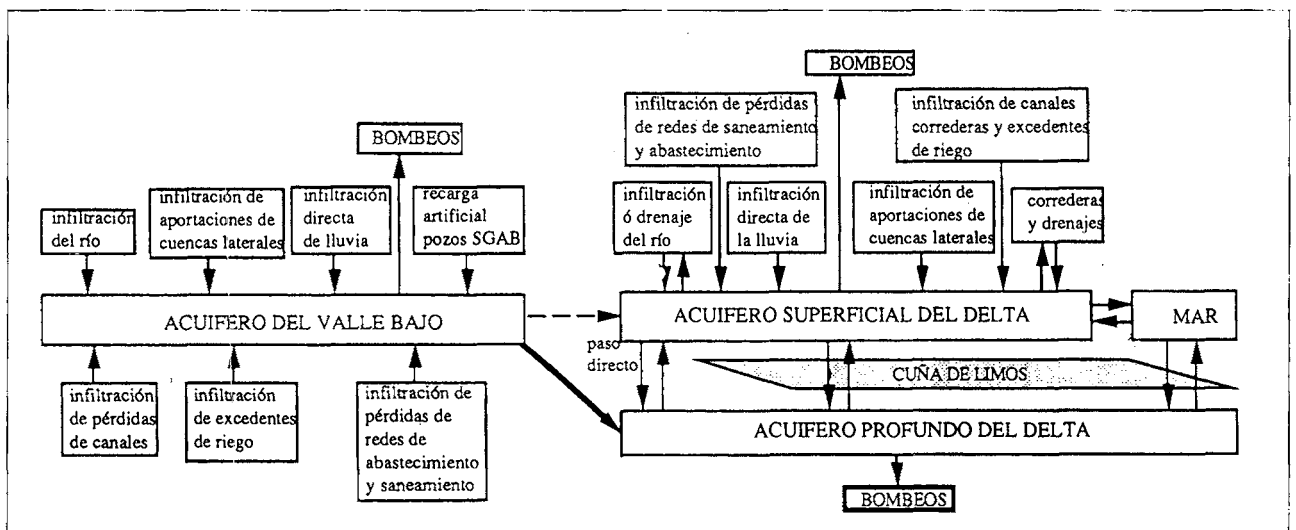


Figura 1.- Identificación de los elementos del balance hídrico del sistema acuífero del Bajo Llobregat (Barcelona) según Iribar (1992), como la base de la modelación del flujo y de la contaminación marina. El sistema se encuadra en el de recursos de la cuenca del río Llobregat y cuencas vecinas interconectadas y esta influido por 108 canales de riego, transferencias de aguas, desagües y conductos de evacuación de salmueras, los que condicionan para la racionalización de la utilización del sistema acuífero como fuente continua de suministro de reserva de emergencia.

Figure 1.- Scheme to identify the water balance components of the Lower Llobregat (Barcelona) aquifer system, after Iribar (1992). It is the basis for modelling groundwater flow and marine intrusion. In order to rationalize its use as a water source for continuous supply and the more essential role of emergency reserve, the system has to be integrated into that of the Llobregat river basin and other interconnected basins, taking into account irrigation canals, water transfers, outflows and pipes to take away the brines.

### 3.- CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS Y DE LOS ACUÍFEROS

#### 3.1.- Aspectos generales

Acuífero es aquella formación geológica saturada de agua de la que puede retirarse naturalmente (manantiales, caudal de base de ríos) o artificialmente (pozo, galerías) caudales de agua de interés económico en las circunstancias locales. Se entiende por sistema acuífero a un conjunto que contiene formaciones permeables saturadas de agua (acuíferos), los medios de baja permeabilidad que los separan (acuitardos) y los elementos de conexión con la superficie, delimitados de tal forma que hidráulicamente funcionen como razonablemente separados de otros sistemas acuíferos.

Bajo el punto de vista hidráulico los sistemas acuíferos contienen agua en los poros y fisuras de sus formaciones, que se mueve lentamente desde los lugares en que entra, donde se produce la recarga, hasta los lugares en que sale, donde se produce la descarga. El cociente entre el volumen de agua contenido en un dominio determinado y el flujo que penetra y sale por su contorno es el tiempo medio de renovación del agua o tiempo medio de tránsito del agua. Puede variar desde meses para unidades pequeñas muy permeables hasta miles de años para grandes acuíferos y para acuitardos.

La recarga es el resultado de la penetración profunda de parte de la precipitación atmosférica que penetra en el terreno lo suficiente para no ser evaporada ni transpirada, así como de la infiltración del agua de escorrentía superficial en los cauces y áreas de inundación cuando el nivel freático está a un nivel inferior. La recarga es también el resultado artificial de la infiltración profunda de excedentes de aguas de riego y las fugas de los elementos y redes de abastecimiento de agua y saneamiento, además de acciones intencionadas de recarga artificial. La recarga suele ocurrir sobre una gran parte del afloramiento de un sistema acuífero.

La descarga se produce en los puntos topográficamente bajos, bien sea de forma concentrada (manantiales discretos, lagunas), de forma lineal a lo largo de valles fluviales y orillas de lagos y del mar, o de forma difusa en áreas de extensión variable (humedales), en las que la vegetación tiene acceso directo al nivel freático o donde se produce encharcamiento.

Bajo el punto de vista de la salinidad y composición química del agua subterránea hay que tener presente que

la recarga difusa originada por la precipitación supone una concentración evaporativa de las sales atmosféricas, que es tanto más acentuada cuanto más cerca se esté de la costa, y sobretodo cuanto más árido sea el clima. Esta recarga puede llegar a ser agua salobre en condiciones litorales áridas. A estos efectos se añade la acción agresiva del dióxido de carbono, que está enriquecido en el aire del suelo a causa de la descomposición bacteriana de la materia orgánica del suelo y de la respiración de la vegetación. Ese efecto agresivo supone la hidrólisis de los carbonatos y de los silicatos, con lo que el agua de recarga aumenta su contenido en carbono inorgánico disuelto y en los cationes característicos de la roca que ha dado origen al suelo. Además, la disponibilidad de oxígeno hace que minerales en estado reducido se oxiden. Aunque estos procesos son químicamente complejos, son relativamente bien conocidos. El resultado es que la recarga al sistema acuífero lleva una marca climática y una marca litológica, en general con una notable mayor mineralización que la lluvia que la originó. Algo similar sucede con la recarga a través de excedentes de riego, en cuyo caso la composición del agua aplicada y la dosis de riego tienen un papel importante en el resultado final.

Comunmente los terrenos naturales carecen de sales altamente solubles pues el proceso continuado de lixiviado por la circulación de agua subterránea las ha eliminado previamente. Así, el flujo subterráneo de las aguas subterráneas desde las áreas de recarga hasta las de descarga no modifica substancialmente la composición química del agua de recarga en sistemas de relativa rápida renovación. Hay excepciones notables cuando las formaciones contienen sales evaporitas aún no disueltas, como yesos y anhidritas o sales halogenadas, como en yacimientos de sal o en terrenos formados en lagos terminales salinos, o como cuando como consecuencia de situaciones naturales especiales o antrópicas (minería) el oxígeno penetra en terrenos ricos en sulfuros y produce sulfatos solubles. Otras situaciones especiales se producen cuando a través del terreno se difunde dióxido de carbono desde formaciones profundas, lo que comunica a las aguas subterráneas, una gran capacidad de alterar minerales y aumentar la mineralización.

Las porciones de mayor tiempo de renovación de los sistemas acuíferos, que a veces es de decenas de miles de años, pueden contener aguas salinas, saladas y aún salmueras. El origen puede ser aguas marinas antiguas aún no desplazadas, el resultado de tiempos de contacto muy prolongados del agua con la roca en un medio casi estacionario y de alta temperatura, o la consecuencia de la infiltración de salmueras densas desde la superficie. El len-

to desplazamiento de esas aguas salinas, natural o acrecentado artificialmente, puede dar origen a salinización de partes del sistema acuífero y a manantiales por los que mana agua de alta mineralización.

En el medio subterráneo existe cierta actividad biológica, incluso en condiciones extremas de salinidad, temperatura y presión. Así se producen acciones catalíticas sobre reacciones químicas que de otro modo serían muy lentas. Esta actividad biológica es intensa en el suelo, donde las transformaciones son más importantes, pero también se producen significativamente en el resto del medio no saturado y en el propio acuífero si el desarrollo de microorganismos es suficiente, es decir, si hay nutrientes, las condiciones ambientales son las adecuadas, se eliminan los productos del metabolismo y no existen inhibidores. La movilidad de estos microorganismos es pequeña, en general mucho menor que la de la propia agua subterránea.

El medio subterráneo es inhóspito para los gérmenes patógenos y no contiene organismos que sustenten la multiplicación de los virus. Así existe una tasa relativamente rápida de desaparición de gérmenes y virus. Solo perviven y se reproducen donde hay circunstancias especiales, como en el entorno de pozos contaminados.

La pequeñez de los canalículos por los que circula el agua hace que el transporte de masa se reduzca a las sustancias disueltas y ciertos coloides, y así el agua carece de turbidez, excepto por defecto de funcionamiento de las captaciones cuando existen conductos grandes en el caso de rocas solubles (karst) o con amplias fracturas.

El conocimiento de todos estos aspectos, su modelación conceptual, la cuantificación y en su caso la modelación numérica del flujo del agua subterránea y del transporte de solutos considerando su interacción con el medio, forman la base de la utilización racional de las aguas subterráneas.

Los métodos están descritos en numerosos textos (Todd, 1976; Davis y de Wiest, 1965; Custodio y Llamas, 1983; Freeze and Cherry, 1979; de Marsily, 1986; Domenico, 1972, entre otros muchos), en textos especializados y en artículos de síntesis y revisión, que no se van a enumerar aquí. Estos métodos incluyen numerosos aspectos hidrodinámicos, geohidroquímicos, isotópicos ambientales y numéricos, además de los económicos, legislativos, sociales y políticos. Unos son de valor universal y sólo deben aplicarse a las circunstancias de cada problema y otros tienen una base local importante. No se

van a describir aquí y en lo que sigue solo se comentarán aspectos de interés para tratar de alcanzar una utilización racional de los recursos de agua subterránea.

La consideración de los recursos de agua de los acuíferos, que tienen carácter difuso, con la de otras fuentes, que son puntuales o lineales, supone que los acuíferos deben integrarse discretizados en el espacio y en el tiempo según las técnicas habituales de modelación (ver la revisión de modelos en Quercia, 1993) o con solo la discretización espacial mediante el método de los autovalores (Sahuquillo, 1990; Sahuquillo y Andreu, 1987; Sahuquillo et al., 1989). Estos aspectos y las técnicas correspondientes se desarrollan en Andreu (1993).

### 3.2.- Los acuíferos costeros

El hecho de que el agua marina sea algo más densa que el agua dulce hace que el agua salada tienda a ocupar una posición inferior dentro del acuífero (cuña de agua salada), sobre la que desliza el agua dulce hacia el lugar de su descarga al mar, bien sea en la costa o a cierta profundidad. Esta circunstancia limita la penetración de la cuña de agua marina, fija la profundidad del agua salada y mantiene el espesor de la zona de tránsito entre el agua dulce y el agua marina (zona de mezcla). Estos son los papeles de la descarga subterránea de agua dulce al mar. Ubicando las captaciones suficientemente retiradas de la costa o limitando su penetración en el medio es posible captar agua dulce o sólo ligeramente salinizada.

Los principios que regulan las relaciones agua dulce-agua salada en los acuíferos costeros se derivan del principio de Ghijben-Herzberg. Su aplicación no puede hacerse de forma simplista (Bear, 1979; Custodio y Bruggeman, 1987; Falkland y Custodio, 1992; Custodio y Llamas, 1983, Secc. 13), sino considerando las circunstancias de cada caso, tales como las características regionales y locales del acuífero, el flujo de agua dulce, las fluctuaciones potenciométricas debidas a la marea, recarga y explotación, el régimen e intensidad de la explotación, la distribución y localización y características de los pozos, y la existencia de formaciones y porciones ocupadas por agua salina y salobre.

El flujo de agua dulce continental que descarga en la costa juega el doble papel de determinar la posición de la zona de mezcla y de mantener su espesor ante las acciones que favorecen la dispersión. Estos aspectos son esenciales para la utilización racional de los acuíferos costeros.

### 3.3.- La calidad de las aguas subterráneas: polución y contaminación

Se denomina polución a las acciones antrópicas que introducen en el medio - en este caso el medio subterráneo - variaciones y sustancias que pueden suponer una degradación de la calidad física, organoléptica, química, radioactiva o biológica del agua. La contaminación es el resultado de la polución. La contaminación por causas antrópicas puede ser artificial - consecuencia de la introducción de sustancias o de calor - o inducida - consecuencia de los cambios potenciométricos que posibilitan la incorporación de aguas salinas o contaminadas o la solubilización de sustancias del terreno. El paso natural del agua por formaciones capaces de liberar sales rápidamente o el lavado de interfaces con masas de agua salina, por ejemplo en los acuíferos costeros, produce también una degra-

dación a la que se le puede llamar contaminación natural. La contaminación de acuíferos muy frecuentemente se origina fuera de los mismos, en el suelo y en el medio no saturado, por lo que su consideración es esencial para la utilización racional de las aguas subterráneas.

Los posibles contaminantes son muy diversos y tienen distintos comportamientos. También las posibles fuentes de contaminación son muy diversas. Una posible relación de importancia para considerar la utilización racional de las aguas subterráneas es:

- del medio geológico (sales, aguas salinas, cambios redox)
- por desplazamiento de fluidos naturales, incluyendo la intrusión marina
- por vía aérea (aerosoles, compuestos volátiles)

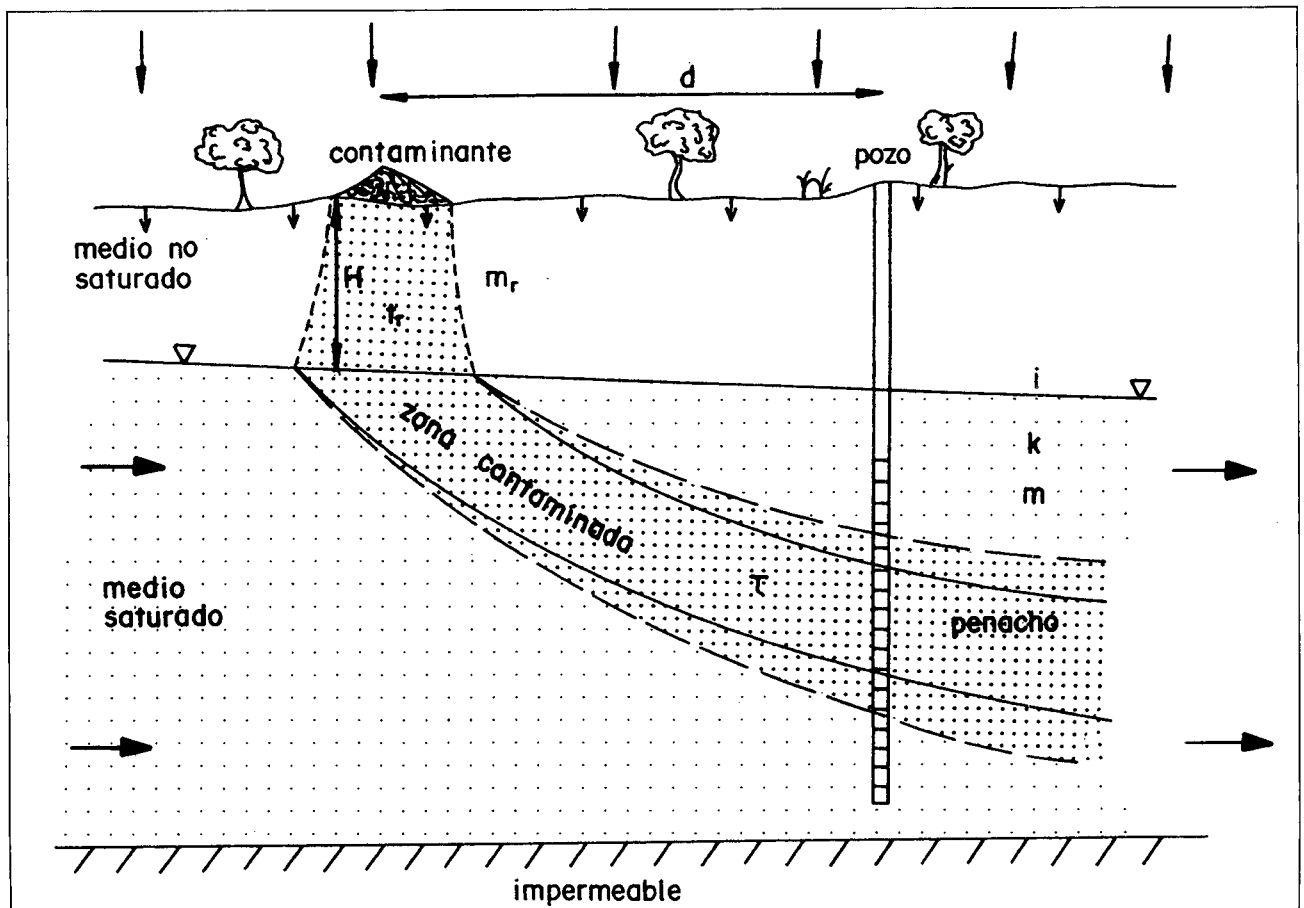


Figura 2.- Contaminación puntual de un acuífero freático, con paso por la zona no saturada y formación de un penacho local interestratificado en el medio saturado.

Figure 2.- Point contamination of a water table aquifer showing the penetration through the unsaturated zone and the formation of a local, stratified plume in the saturated zone.

- actividades agrarias (retornos de riego, lixiviado de agroquímicos)
- por actividades agropecuarias
- de infiltración de aguas de ríos, canales o drenes
- por lixiviado de acumulaciones, escombreras, basureros y vertederos
- por vertidos líquidos y fugas de tuberías, depósitos y alcantarillados
- asociadas al transporte (derrames en accidente, en manipulación)
- por cambios en el uso del territorio (en la recarga y del potencial redox)
- a causa de la captación de agua subterránea (cambios potenciométricos)
- por perforaciones, excavaciones y reconocimientos

(interconexiones)

- asociada a subsidencia y colapsamientos (más fácil acceso de otras aguas)
- por inyección

La polución, y la contaminación que origina, es puntual cuando la fuente está concentrada sobre una pequeña superficie o se trata de una perforación o pozo (fig. 2), o bien difusa (fig. 3) cuando el contaminante se extiende - aunque sea a pequeña concentración - sobre una gran superficie, como es el caso de áreas extensas de regadío o urbanas, o es transportado por vía atmosférica. Los efectos de las contaminaciones puntuales y de las difusas pueden ser muy diferentes, así como las acciones de control, rehabilitación y protección. En general las contami-

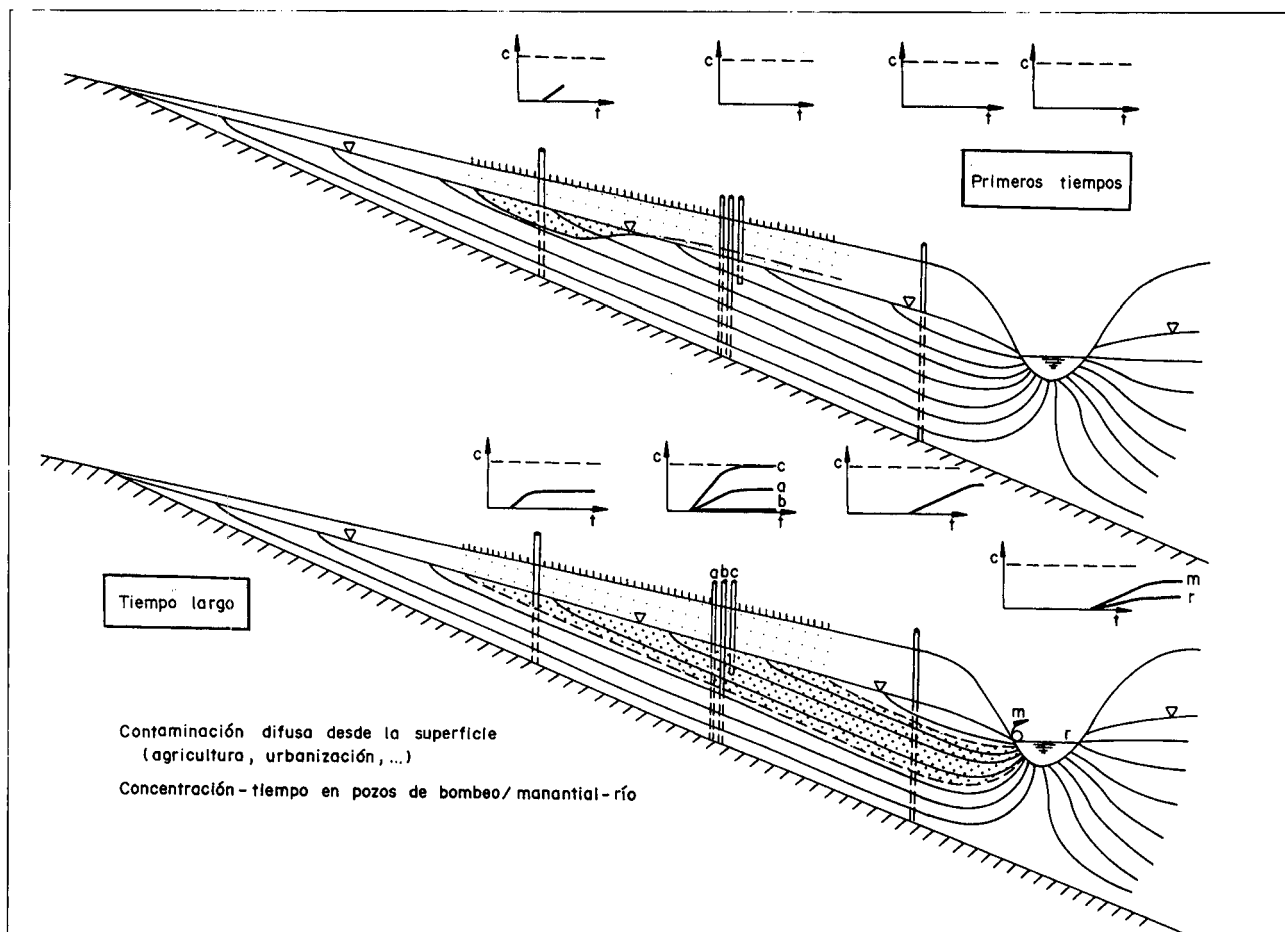


Figura 3.- Contaminación difusa por aporte de polucionante agrícola distribuido sobre la superficie del terreno. El contaminante penetra lentamente por la zona no saturada (no indicado) y luego va ocupando progresivamente la parte superior del medio saturado (punteado más intenso), afectando por mezcla a pozos y manantiales. Los gráficos indican cualitativamente la evolución temporal de las concentraciones de contaminante.

Figure 3.- Diffusive contamination by an agricultural pollutant distributed on the land surface. The contaminant slowly penetrates through the unsaturated zone (not shown) and afterwards progressively occupies the upper part of the saturated zone (darker points), thus affecting by mixing the wells and springs. The inset plots show the time evolution of contaminant concentration.



naciones puntuales dan origen a concentraciones elevadas localizadas en penachos, y las difusas tienden a crear una estratificación regionalizada, de modo que los manantiales y pozos suficientemente penetrantes producen una mezcla de agua contaminada y no contaminada, en proporciones crecientes en el tiempo.

El contaminante puede acceder al acuífero (medio saturado) a través del medio no saturado, o bien directamente (donde el nivel freático aflora, en una excavación, mediante un pozo) o a consecuencia de la existencia de pozos y sondeos (a lo largo de la separación entubación-perforación; por cortocircuito entre zonas filtrantes; por tramos corroídos, no estancos o mal soldados). El paso por el medio no saturado es el que ofrece las mayores posibilidades de fenómenos de interacción que diluyen y retrasan a los contaminantes, sobre todo cuando existe suelo. La eliminación del suelo o su alteración puede ser una importante pérdida de protección.

En su movimiento por el terreno, desde el momento de la infiltración, los contaminantes sufren una serie de procesos físicos (difusión hacia poros semicerrados y porciones de baja permeabilidad, dispersión hidrodinámica y filtración mecánica), procesos químicos (formación de complejos iónicos, quelatación de metales con materia orgánica, reacciones de adsorción y de cambio iónico, precipitación y coprecipitación, quimisorción y reacciones redox) y procesos biológicos (síntesis celular, degradación aerobia y anaerobia e inactivación de virus y muerte de bacterias).

Para un contaminante conservativo en el agua, el tiempo de llegada de un contaminante que penetra más o menos puntualmente por la superficie del terreno hasta un pozo es la suma del tiempo de tránsito por el medio no saturado más el de circulación por el medio saturado, cuya estimación elemental es relativamente sencilla (Custodio, 1994).

En un acuífero sometido a contaminación difusa sobre toda su superficie, que recibe una recarga que iguala a la descarga (régimen permanente), la contaminación del acuífero se iniciará cuando llegue el contaminante al nivel freático. La contaminación de un manantial o pozo se realizará progresivamente, a medida que el estrato superior contaminado aumente de potencia, con una evolución de tipo exponencial decreciente (Custodio, 1994).

La interacción del contaminante con el terreno (adsorción, cambio iónico, difusión a espacios semicerrados, retención capilar en fase separada) supone un retraso en

el movimiento y un paso con una larga cola de restitución. Ese efecto puede medirse elementalmente mediante el coeficiente de retardo, que es función de como se reparte el soluto entre el sólido y el líquido. Es algo muy variable de una sustancia a otra y de un medio a otro. Para muchas sustancias orgánicas, virus y bacterias es proporcional a la superficie específica (superficie/unidad de volumen) del medio, y en el suelo edáfico el efecto de sorción dominante lo produce la materia orgánica sólida presente.

La descripción matemática del transporte de contaminante se puede hacer mediante la ecuación del flujo y la ecuación del transporte de masa en el acuífero (Freeze and Cherry, 1979; Custodio y Llamas, 1983).

La situación del foco polucionante, forma de contaminación y naturaleza de la contaminación, junto a las heterogeneidades del terreno, hacen que cada caso real tenga sus peculiaridades en cuanto a la propagación de la contaminación intensidad de contaminación y resultados de la observación.

Una fuente de contaminación temporal o accidental produce un pulso de aporte de corta duración, que llega con tanto más retraso cuanto mayor sea la interacción con el terreno. Tras la desaparición de la misma la contaminación persiste en el acuífero un cierto tiempo, por lo menos igual al de renovación del agua de la porción afectada, en general mayor a causa de la dispersión del flujo y difusión a zonas semiestancadas, y aún mayor si hay retraso en el movimiento. En el caso de sustancias degradables o desintegrables este mayor tiempo de residencia es un factor favorable a la descontaminación. En el caso de que el contaminante sea un fluido distinto del agua y no miscible con ella, como hidrocarburos o disolventes orgánicos, se forma una fase separada que se infiltra y circula dejando un penacho con fase inmóvil retenida por fuerzas capilares (saturación irreductible).

Contaminación salina es la situación por la que un agua dulce incorpora sales hasta concentraciones que superan determinados límites. Pero un agua salina extraída de un acuífero no es necesariamente un agua inicialmente dulce a la que se ha añadido sales por disolución o por mezcla con otra agua más salina, sino que puede serlo originariamente, como ciertos retornos de riego o la recarga natural en áreas áridas y próximas a la costa (Custodio, 1993c).

Los orígenes de la salinidad son muy diversos, y varios de ellos pueden estar simultáneamente presentes (Custodio, 1994a,c):

- Penetración de agua marina moderna.
- Existencia de agua marina antigua no expulsada por flujo muy lento o falta de gradiente hidráulico en formaciones poco permeables.
- Aspersión marina en franjas ventosas próximas al litoral.
- Concentración del agua de lluvia por evaporación en la superficie del terreno o en la parte superior del suelo, cuando el clima es árido.
- Evaporación del agua subterránea en zonas de descarga encharcadizas (humedales) sometidas a intensa evaporación.
- Disolución de sales evaporitas existentes en las formaciones acuíferas, que más comúnmente son yesos y las sales asociadas.
- Desplazamiento de agua subterránea salina existente en ciertas formaciones profundas, naturalmente o inducida por la explotación.
- Infiltración de excedentes de riego en clima árido o cuando se utilizan aguas con elevada salinidad.
- Procesos industriales, mineros y de deshielo que producen salinidad.

La contaminación marina se refiere a aquellos procesos de salinización en los que las sales proceden directamente las contenidas en el agua del mar.

La contaminación inducida por la explotación no sólo hace referencia a las consecuencias de la explotación en sí sino también a las que se derivan de la existencia de captaciones, se usen o no. Un aspecto especial de esta contaminación es la que se deriva de las captaciones que por diversas causas resultan abandonadas. Son un acceso fácil y directo desde la superficie al acuífero y una interconexión de formaciones en el terreno. Otro tanto cabe decir de los sondeos de observación. La utilización racional de las aguas subterráneas debe considerar la obturación de esas vías de acceso y la provisión de aislamientos.

La fuente puede ser también continuada, como el caso de una fuga persistente o el vertido en un campo de infiltración o un pozo, o intermitente. La agricultura es una fuente intermitente, aunque el retraso y amortiguación de paso por el medio no saturado la suele convertir en una fuente continuada para el acuífero.

### 3.4.- Vulnerabilidad de los acuíferos

El concepto de vulnerabilidad hace referencia a la posibilidad de que un sistema sufra efectos indeseable co-

mo consecuencia de acciones exteriores. No implica que se produzca realmente perjuicio ni expresa la cantidad de daño sufrible, ni dice que se esté en el momento presente en tal o cual condición. Esto último es la descripción o medida del estado actual, que es el objeto del concepto de riesgo. Sin embargo, los conceptos de vulnerabilidad y riesgo no siempre están netamente diferenciados. Estos conceptos expresan propiedades estables del sistema, no temporales (en tanto que el sistema no cambie), y deben por tanto expresarse en función de variables de estado o características del sistema. Por otro lado, el riesgo adiciona a estas propiedades del sistema las de acciones exteriores (variables de decisión), que son temporales y cambian de un momento a otro. La vulnerabilidad se refiere a una cierta acción o forma de acción, aunque no a su intensidad, oportunidad y aplicación, las cuales conforman el riesgo.

Estos conceptos son aplicables a un sistema de recursos hídricos y a los recursos de agua subterránea. Con respecto a estos últimos se puede hablar de la vulnerabilidad y del riesgo asociados a la sequía, a la extracción intensiva de agua y a la degradación de la calidad del agua por cambios en la temperatura, salinidad o introducción de ciertos componentes, entre otros. Este último aspecto es el más frecuentemente aludido, y con frecuencia se sobreentiende cuando se habla de vulnerabilidad. Frecuentemente la degradación de la calidad es a consecuencia de la introducción en el medio subterráneo de sustancias o propiedades resultantes de la actividad humana, y por ello se habla de vulnerabilidad a la polución y por extensión a la contaminación. No depende de cual sea el estado real de calidad y contaminación del acuífero.

Comienza a hablarse de vulnerabilidad de los acuíferos hacia 1970 (Albinet y Margat, 1970), aunque su uso no adquiere cierta difusión hasta principios de la década de 1980. En general se sobreentiende que vulnerabilidad hace referencia a la calidad del agua y concretamente a la incorporación al agua subterránea de sustancias nocivas para la salud (vulnerabilidad a la polución), cuando esos polucionantes se depositan sobre la superficie del terreno sobre un territorio extenso (polución difusa). Por lo tanto no hace referencia a sucesos puntuales. En otros casos cabe considerar con igual importancia la vulnerabilidad a la merma en la cantidad, por ejemplo a la pérdida de recursos ante una sequía o una explotación intensiva, o a la salinización.

No existe aún ninguna definición satisfactoria y universalmente admitida de vulnerabilidad de los acuíferos (Vrba, 1991; Duijvenbooden y Waegeningh, 1967), lo

cual no ha impedido la vulgarización del término, aunque con una indefinición manifiesta y un frecuente uso incorrecto. Se trata de definir algo que sea una propiedad del acuífero y sus circunstancias e independiente del polucionante concreto y de su cantidad y concentración. La vulnerabilidad a la salinización y contaminación puede asociarse a la susceptibilidad de que la calidad del agua subterránea puede ser alterada negativamente como consecuencia de actividades humanas, tanto para su uso actual como futuro previsible. Mide en cierta forma la incapacidad del medio para hacer frente, espacial y temporalmente, a las consecuencias indeseables de esas actividades, y para restaurar la situación primitiva, naturalmente o con ayuda de medios artificiales. La consideración de cada polucionante individualmente, su cantidad, modo de aplicación y toxicidad conforma el riesgo a la contaminación (de que se alcancen ciertas concentraciones). De todos modos es un concepto útil para condicionar la utilización racional de las aguas subterráneas en el contexto del uso del territorio.

Los principios básicos, metodología y aspectos prácticos de la vulnerabilidad de los acuíferos a la polución se analizan con detalle en Carbonell et al. (1993) y en Foster e Hirata (1991). Dos de los métodos para indexar la vulnerabilidad son los llamados DRASTIC (Aller et al., 1987) y GOD (Foster, 1987; Foster e Hirata, 1992; Adams y Foster, 1992).

El concepto de tiempo de transferencia de un contaminante desde la superficie al acuífero no forma parte de lo que normalmente se considera vulnerabilidad a la polución sino que es algo más bien ligado al riesgo, ya que condicionan las concentraciones que se alcanzarán. Un largo tiempo de transferencia no significa ninguna protección absoluta sino sólo un diferimiento del problema. Ante una contaminación de una sustancia no degradable, un mayor tiempo de transferencia sólo aporta dilución, tanto mayor cuanto más dispersivo sea el medio. Pero esa dilución supone afectar a volumen grande de agua subterránea, que así pasará a tener un contenido extraño, con frecuencia indeseable aún a muy bajas concentraciones. Por ello, atribuir un índice de baja vulnerabilidad en función de un largo tiempo de recorrido es poco recomendable, y por supuesto puede dar origen a malas decisiones de gestión cuando los que las toman no son expertos en hidrología subterránea. No obstante, una llegada rápida del contaminante limita la posibilidad de atenuación y no deja tiempo para introducir medidas correctoras. Una notable retención, que retrasa la penetración, conlleva una lenta recuperación, salvo que la degradabilidad sea elevada.

La evaluación de la vulnerabilidad a la polución referida a una sustancia conservativa es poco realista para muchas otros tipos de sustancias. Si se considera una sustancia de degradabilidad media, si es que se puede definir, el resultado no vale para polucionantes conservativos. De ahí que se hable de vulnerabilidad específica a la polución, agrupando los posibles polucionantes en grandes grupos con una amplia base en común (conservativos, orgánicos degradables, orgánicos poco degradables, microbiológicos, metales pesados, ...), ya que en general no es posible considerar cada sustancia polucionante presente, dado el muy elevado número de ellas. Según la naturaleza del medio, un polucionante determinado puede estar en un grupo o otro. Carbonell et al. (1993) aclaran esta situación anterior llamado vulnerabilidad específica a la que hace referencia a un contaminante, clase de contaminante o actividad específica, y vulnerabilidad intrínseca a aquella en cuya definición no se considera ni los atributos ni el comportamiento de contaminantes específicos.

La gradación de la vulnerabilidad, si se cuantifica o categoriza, es apta para cartografía (Civita, 1994). Es algo útil para la ordenación territorial, a nivel de gestor no experto en hidrología, si existe una clara leyenda y se indican claramente las limitaciones y orienta la utilización racional de las aguas subterráneas. Sin embargo, los cambios en las condiciones de explotación de un acuífero pueden modificar las condiciones de flujo del agua subterránea y, por lo tanto, las gradaciones de vulnerabilidad, de modo que un mapa de vulnerabilidad no es una cartografía permanente.

#### 4.- ASPECTOS DE LA UTILIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS QUE CONFIGURAN SU UTILIZACIÓN RACIONAL

##### 4.1.- Generalidades

En el uso del agua subterránea existen ventajas y desventajas, como en cualquier actividad humana. Cómo debe realizarse una actividad es un compromiso entre los beneficios y costes (o daños), lo cual no es un simple cálculo matemático sino un complejo mundo de consideraciones técnicas, económicas, sociales, políticas y éticas, y donde son frecuentes los errores por insuficiente conocimiento, visión parcial del problema, intereses creados, prepotencia y corrupción, entre otros. Este común denominador de la actividad humana no es razón para no actuar, pues hay demandas sociales ineludibles, en este ca-

so de agua, y una justa aspiración a mejorar el nivel de vida, lo que exige dedicación, entusiasmo, optimismo y honradez. Todo ello forma parte del uso racional.

#### 4.2.- Aspectos favorables

Varias son las razones que explican el importante y esencial papel de las aguas subterráneas cuando se las compara con las aguas superficiales, si bien estas ventajas no son fruto del antagonismo sino de la complementariedad y oportunidad de uso. Esto lleva a que según las circunstancias convenga usar la fase superficial o la fase subterránea, y más comunmente una adecuada combinación de ambas, cambiante en el espacio y en el tiempo. Esta combinación requiere tanta mayor racionalidad cuanto mayor grado de utilización exista, y más necesidad de protección y mejor conservación medioambiental se requiera. En esto se basa al uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, según el sentido que se da actualmente a dicha designación (Sahuquillo, 1983; Andreu, 1993): proporcionar las mejores prestaciones en calidad y cantidad, con el menor coste y la mejor garantía.

Algunas de las razones favorables, dentro de las correctas circunstancias, del uso de las aguas subterráneas, que se han de tener en cuenta al considerar su utilización racional son:

- general notable almacenamiento asociado, que hace que su cantidad y calidad estén menos afectadas por la variabilidad de la pluviometría, y sean reservas de gran valor en sequías y situaciones de emergencia,
- regularidad de su composición química, radioquímica y biológica y de la temperatura, y ausencia de turbidez si las captaciones están bien construidas,
- mayor protección temporal frente a procesos contaminantes accidentales, lo que proporciona la posibilidad de continuar disponiendo de agua adecuada durante un periodo extendido de tiempo, mientras se adoptan las medidas paliativas y correctoras necesarias,
- frecuente disponibilidad en el lugar o cerca de donde se produce la demanda, con elementos de captación y transporte que suponen inversiones normalmente moderadas y graduales frente a las de las grandes obras de regulación, captación y tratamiento de aguas superficiales,
- asequibilidad a nivel rural, municipal y de áreas en vías de desarrollo, sin necesidad de que para el abastecimiento y puesta a disposición se tengan que comprometer recursos económicos muy necesitados para otros fines,

- menor dependencia en cuanto a cantidad y calidad de acciones exteriores de carácter catastrófico o provocadas intencionalmente o a causa de conflicto,
- menor dependencia de procesos tecnológicos complejos, que están sujetos a fallos de funcionamiento y diseño, y a errores humanos de operación,
- reconocimiento, evaluación y control con frecuencia más seguros y sencillos, y que requieren menor longitud de series de datos de base, aunque para llegar a propuestas preliminares aparentemente se requiera un mayor tiempo y esfuerzo de estudio, personal experto y superar un conjunto de deformaciones y prejuicios en el conocimiento popular, que alcanza con frecuencia a las personas con responsabilidades en las administraciones y órganos de gestión,
- relativa fácil predicción del comportamiento ante escenarios diversos de acciones futuras, dado el gran almacén asociado; para las aguas superficiales esa predicción tiene mayor incertidumbre al ser muy sensibles y no conocerse previamente la aportación pluviométrica futura,
- gestión más local, sin las restricciones y conflictos de organización e institucionales frecuentes en las grandes entidades,
- frecuente fácil control de problemas organolépticos y posibilidad de disminuir o incluso eliminar el tratamiento de desinfección previa si se utilizan redes de distribución adecuadas.

La experiencia muestra que la explotación de las aguas subterráneas ha ido creciendo y ha sido el motor del desarrollo de muchas regiones del Mundo, con frecuencia a partir de iniciativas locales y privadas, y todo ello a pesar de desidia y no pocos impedimentos administrativos e intelectuales. En muchos lugares son la principal y más segura fuente de suministro de agua potable y de riego. Esto contrasta con la frecuente propensión de ciertos organismos públicos, con frecuencia los mejor dotados económicamente, hacia las grandes obras hidráulicas (Llamas, 1988b, 1991b). Aunque existen claros aspectos positivos en el uso de aguas superficiales, sobre todo para grandes áreas urbanas o industriales, o extensos desarrollos agrícolas, no siempre se justifican económicamente sin recurrir a subvenciones, declaraciones llamadas de interés general, o endeudamiento encubierto.

Cuando los acuíferos se usan conjuntamente con las aguas superficiales para un mejor aprovechamiento de los recursos de agua disponibles con frecuencia aquellos juegan el papel de reserva y en circunstancias técnicas favorables son los receptores de excedentes temporales me-

dian­te alguna forma adecuada de recarga artificial. No obstante lo más frecuente no es necesariamente la regla universal. Cada circunstancia particular tiene su solución más racional o de oportunidad. La recarga artificial es solo una herramienta que tiene muy diversos aspectos (Custodio, 1986) y cuya aplicabilidad requiere agua y cuya aplicación ha de hacerse según las circunstancias locales.

Pero las aguas subterráneas no son una panacea, y por supuesto no están exentas de problemas importantes de cantidad, calidad, gestión y conocimiento, unas veces reales y otras fruto del desconocimiento y evaluaciones inadecuadas.

#### **4.3.- Problemas técnicos asociados a la explotación de las aguas subterráneas: descensos y recarga**

Los aspectos y problemas técnicos relacionados con la explotación de las aguas subterráneas son principalmente los que refieren a los descensos de niveles, a los cambios de la calidad y del agua y a los cambios locales en las características del territorio.

El descenso de los niveles piezométricos es inherente a la propia hidrodinámica del sistema acuífero y por lo tanto es cuantificable y predecible en la medida en que los parámetros y las variables sean suficientemente bien conocidas. Según la complejidad del problema se pueden usar o bien simples cálculos o se debe recurrir a modelos de simulación del flujo.

La explotación de un acuífero que se limita a captar los manantiales no sufre cambios a largo plazo sino se alteran las circunstancias, pero supone limitaciones importantes en cuanto a la ubicación de las tomas y a la utilización de la capacidad del sistema acuífero para adaptar la producción de agua a la variabilidad de la demanda. Para que el agua fluya a los puntos de captación hace falta un descenso piezométrico que cree el gradiente hidráulico que movilice el agua hacia los mismos. Cuando el descenso de niveles no incrementa substancialmente la recarga, que es una situación común, a la larga se detraerá un caudal medio de los puntos de descarga (manantiales, ríos, lagos, humedales) igual al de extracción. Hasta llegar a este momento, la extracción supera a la merma media de descarga y la diferencia se obtiene de las reservas (agua almacenada) en el sistema acuífero. Así, durante este periodo transitorio los niveles van descendiendo hasta estabilizarse, en el bien entendido de que la extracción no supere a la recarga. La duración de este periodo transitorio es directamente proporcional al

cuadrado de la dimensión del acuífero e inversamente a la difusividad hidráulica, y puede valer desde días hasta miles de años. Valores de años a muchas decenas de años son comunes.

Así la puesta en explotación de un acuífero supone descensos de nivel continuados durante un largo periodo, que pueden ser muchos años. Pueden alcanzar o incluso descender bajo el nivel de las descargas, sin necesidad de que la recarga se haya sido superada, y aún tomando sólo una fracción de ésta (fig. 4). Al mismo tiempo las descargas naturales van mermando. Esto permite extraer caudales grandes en una época, sin apenas afectar a las descargas naturales a corto plazo y con una afección media a largo plazo igual a la extracción media. Esta es una interesante forma de utilización racional.

Los inconvenientes generales ligados a la explotación se manifiestan como descenso de niveles. Conllevan un encarecimiento del agua extraída por requerirse mayor elevación y modificaciones en los medios de extracción y aporte de energía. Estos efectos son previsibles y valorables, y se han de tener en cuenta al considerar la racionalidad de una explotación.

Cuando la extracción supera a la recarga total no es posible llegar a una situación estable final manteniendo dicha extracción. Se estaría en un proceso estricto de sobreexplotación, del que se hablará más adelante.

En acuíferos conectados con masas de agua superficial (ríos, lagos, embalses) la extracción produce una recarga inducida. Esta forma de recarga es importante en acuíferos aluviales con ríos alóctonos. Este tipo de recarga es muy sensible a cambios en los niveles del agua superficial, velocidad de flujo, turbidez, naturaleza de los sedimentos, régimen de caudales, efecto de crecidas, canalización, alteración del cauce por acciones antrópicas, etc., y lo que en un momento es un aporte importante puede dejar de serlo en épocas posteriores. La utilización racional de las aguas subterráneas requiere que se tomen las precauciones adecuadas y que se realicen actuaciones de mantenimiento de la capacidad de recarga.

Es difícil evaluar a priori con exactitud el valor de la recarga de un acuífero, que es el que define los recursos de agua y los caudales explotables bajo unas ciertas circunstancias y condicionantes. Su conocimiento se afina con los estudios y observaciones que acompañan a la propia explotación. En climas áridos y semiáridos la recarga puede ser importante en años húmedos excepcionales, pero decrece muy rápidamente al disminuir la precipita-

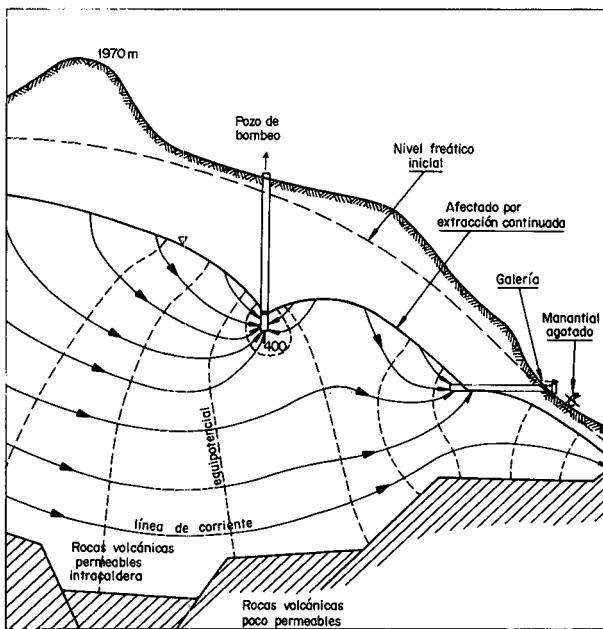


Figura 4.- Representación esquemática de la explotación de los materiales intracaldera de la cumbre de la isla de Gran Canaria en un largo proceso transitorio de descensos progresivos en el que el manantial llega a secarse, el caudal de la galería merma si no se alarga y el pozo debe ser profundizado progresivamente para mantener el caudal. El proceso se estabilizará en estas circunstancias cuando la galería drene solo la diferencia entre el caudal primitivo del manantial y el actual del pozo.

Figure 4.- Schematic representation of groundwater exploitation in the Gran Canaria island highland intracaldera formation. There is a long transient process of progressive drawdown during which the spring dries out, the discharge of the water gallery decreases if it is not extended, and the well needs progressive deepening to sustain the discharge. The process will attain a new steady state under this circumstances when the gallery drains out the difference between the initial flow of the spring and the current discharge of the well.

ción, lo cual exige prudencia al caracterizar el funcionamiento del acuífero. Pero además los parámetros que caracterizan la recarga no son fijos y dependen de cambios territoriales tales como el grado de forestación, estado de las zonas inundables, existencia de regadíos y dotaciones de agua aplicada (los retornos de riego pueden ser una recarga importante), urbanización y estado de las redes de distribución de agua y saneamiento. Además es posible llevar a cabo intervenciones de incremento de la recarga si hay agua disponible. Tales son el sobreriego y las actuaciones de recarga artificial en superficie o mediante pozos, si se dispone de medios económicos para la operación y mantenimiento. Todas esas acciones forman parte de la utilización racional de las aguas subterráneas.

Los grandes descensos del nivel piezométrico en formaciones no consolidadas suponen que éstas pueden compactarse al aumentar las tensiones efectivas en el terreno. El resultado es que se pueden llegar a producir descensos regionales importantes del nivel del terreno, lo cual supone modificación de red de drenaje y su funcionamiento, mayor frecuencia de encharcamientos, distorsión de las redes de canales y modificación del perfil costero. En acuíferos heterogéneos pueden originarse además cambios localizados de pendiente que pueden afectar a vías de transporte y canalizaciones. Este es un coste añadido a la explotación y por lo tanto debería sumarse al coste real del agua puesta a disposición.

Las cavidades de poca a moderada profundidad existentes en rocas karstificables (carbonatos y yesos) pueden colapsar al disminuir la presión del agua en su interior, bien sea por cambios rápidos de nivel del agua o bien por erosión y corrosiones internas por aumento del flujo del agua. El resultado es un aumento de la frecuencia de hundimientos localizados y más o menos bruscos del terreno (colapsos).

Las aguas subterráneas descargan en zonas bajas, dando lugar a bosques de ribera a lo largo de los ríos, a humedales en zonas llanas y a franjas de vegetación (ecotonos) en el límite entre formaciones de contrastada permeabilidad. La vegetación de esas áreas, la fauna asociada dependen del aporte sostenido de agua subterránea. La explotación de agua en el acuífero puede suponer - y con seguridad lo supone si se produce cerca de esas áreas - una reducción paulatina, diferida y a lo largo de un dilatado periodo, de las descargas de agua subterránea. Por lo tanto se produce una afección, que puede adoptar diferentes formas según las circunstancias. Así, puede tratarse de la desaparición de porciones de esas áreas naturales o de un cambio del hábitat a causa de una reducción generalizada de aportes de agua, que suele traducirse en una mayor severidad de los periodos de sequía al hacerse más intensos y más frecuentes (fig. 5). La utilización racional de un acuífero supone considerar y evaluar estos efectos.

#### 4.4.- Problemas técnicos asociados a la explotación de los acuíferos costeros

Los acuíferos costeros son elementos de gran importancia en el conjunto de recursos de agua por su ubicación en áreas de notable ocupación humana y elevada demanda, y frecuente escasez de otros recursos de agua dulce. Sus características se han comentado en el aparta-

do 3.2. No sólo son fuente de suministro sino también - y cada vez más - elementos de reserva para puntas de demanda y emergencias. Hidráulicamente se comportan como cualquier acuífero conectado a un cuerpo de agua superficial, con la diferencia de que la recarga inducida que se produce es de agua marina. Basta que el agua extraída contenga un 2% de agua marina para degradarla seriamente y un 4% la hace inútil para buena parte de los usos.

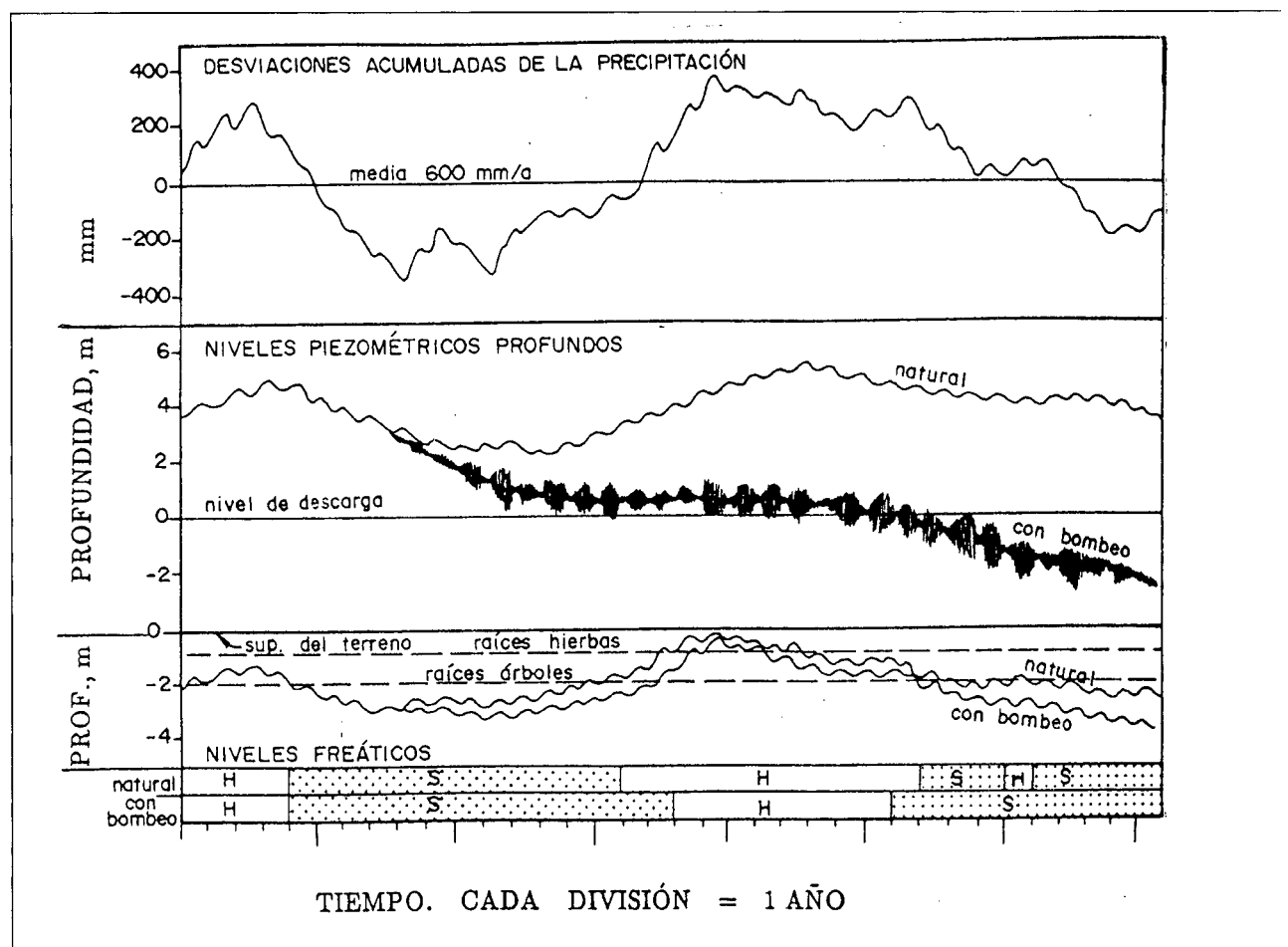


Figura 5.- Efecto de la explotación de un acuífero que alimenta a un humedal. Las desviaciones acumuladas de la precipitación muestran una secuencia de años secos (descenso) y húmedos (ascenso), de diferente naturaleza e intensidad. Como consecuencia de la explotación que se inicia en los primeros años, la evolución con bombeo difiere de la natural y se produce un descenso progresivo; las fluctuaciones representan el efecto de los bombeos estacionales en el punto de observación. La piezometría se refiere a niveles profundos más permeables y en ellos se asienta la vegetación y el humedal, con las raíces en situación tal que sólo en las secuencias de años muy secos no pueden obtener el agua del nivel freático. A consecuencia de la explotación los niveles freáticos van descendiendo, con lo que las secuencias secas para los árboles son progresivamente más largas y frecuentes (inspirado en el acuífero de El Abalarío y el Arroyo de la Rocina, Doñana, Huelva). H=época húmeda; S=época seca.

Figure 5.- Effect of the exploitation of an aquifer which sustains a wetland. The cumulative deviation of rainfall shows a sequence of different dry (decrease) and wet (increase) years. As a consequence of the groundwater exploitation starting in the early years, the evolution under pumpage shows a progressive drawdown when compared with natural conditions. The groundwater heads correspond to more permeable deep formations where well screens are placed, while the upper formations are less permeable and support the vegetation and the wetlands. Root depth is such that only in sequences of very dry years plants cannot take water from the water table. As a result of groundwater exploitation the water table goes down, and then the dry sequences for the trees are progressively longer and more frequent (based on the behaviour of the El Abalarío and the La Rocina ravine, Doñana, Huelva). H=wet period; S=dry period.

La explotación de agua dulce de un acuífero costero supone la reducción de la descarga de agua dulce al mar y por lo tanto una mayor penetración del agua marina y de la zona de mezcla - localmente un ascenso de la misma - y su ensanchamiento. El nuevo equilibrio se alcanza tras un periodo transitorio más o menos dilatado (desde meses a cientos de años, con frecuencia varios años) durante el cual la zona de mezcla se puede dilatar extraordinariamente y reflejar las macroheterogeneidades del medio. Para hacer sustentable la extracción de agua dulce en un acuífero costero es necesario limitar la penetración salina y la elevación de la zona de mezcla, y ello supone dejar que cierto flujo de agua dulce escape al mar, natural o artificialmente. Así los recursos explotables son menores que la recarga, y tanto menores cuanto más próximas estén las captaciones de la costa.

El comportamiento de un acuífero costero es científica y técnicamente conocido, y es simulable si el grado de conocimiento es suficientemente detallado. Buena parte de lo que se consideran problemas de los acuíferos costeros, bajo el punto de vista técnico son debidos a mala ubicación y diseño de las captaciones, inadecuada explotación, falta de observaciones para efectuar correcciones y desconocimiento de la hidrodinámica del acuífero. También a veces son debidos a que la fuente de salinidad no es la penetración de agua marina actual. Circunstancias tales como retornos de riego muy concentrados, aridez climática, entrada de agua salina antigua en los pozos por rejillas mal colocadas y tubos mal aislados o corroidos, evaporación intensa de agua en superficie y fugas de transporte de agua salina por el territorio, pueden producir efectos que en estudios de insuficiente calidad fácilmente se confunden con la intrusión marina propiamente dicha.

#### **4.5.- Problemas técnicos en relación con cambios en la calidad y salinidad**

Los cambios potenciométricos que necesariamente impone la explotación de las aguas subterráneas pueden hacer que masas de agua de calidad degradada o salina existente en el acuífero o conectada con el mismo se desplacen hacia las captaciones. Un caso especial es el de los acuíferos costeros antes comentado. Otras situaciones son las de infiltración de aguas de ríos o lagos, o masas de agua en ciertas partes del acuífero, otros acuíferos o acuitardos. En general los efectos aparecen diferidos - meses a muchos años - y con un posible frente de avance relativamente disperso. Un buen conocimiento del sistema acuífero permite prever los problemas que pueden presentarse y estimar cuando van a aparecer, con lo que

es posible tomar las medidas adecuadas para una utilización racional. Los aspectos más difíciles son los relacionados con la contaminación por el propio hecho de su variabilidad y frecuente ocultación, clandestinidad o desconocimiento, y los posibles focos pueden ser difíciles de identificar con solo sencillas inspecciones. De ahí que la utilización racional de las aguas subterráneas pase preferentemente por la prevención, ya que la corrección, aunque posible, es costosa, difícil y puede suponer actuar sobre grandes volúmenes de agua y de medio.

La contaminación de las aguas subterráneas a causa de la explotación puede producirse de diversas formas, cuya consideración es importante para la utilización racional de las aguas subterráneas:

- por desplazamiento horizontal de frentes de agua contaminada o salina;
- por lixiviado lento de contaminantes al pasar el agua por terrenos;
- por ascenso vertical de aguas contaminadas bajo la captación;
- a causa de la propia captación, por:
  - paso de agua contaminada procedente de la superficie o desde otros acuíferos, entre la pared de la perforación y la entubación a causa de cierres y cementaciones inexistentes o mal realizadas;
- establecimiento de comunicaciones (cortocircuitos) entre varios niveles permeables a causa de dejar el pozo sin revestir o con tramos filtrantes excesivamente largos;
- excesiva penetración o falta de aislamiento de formaciones contaminadas o salinas;
- corrosión y discontinuidades de la entubación frente a formaciones contaminadas y/o salinas, incluso frente a acuitardos, que teniendo una permeabilidad vertical pequeña pueden dejar circular horizontalmente cantidades apreciables de agua.

En las zonas húmedas, a las variaciones debidas a los cambios de niveles piezométricos se pueden unir las de modificación de la composición química por alteración de las superficies de evaporación, por penetración en el medio subterráneo de agua salina o por contaminación del acuífero, por ejemplo por actividades agrícolas. El resultado es una modificación de la vegetación.

#### **4.6.- Problemas asociados a la gestión y administración de las aguas subterráneas**

Buena parte de los problemas que se asocian a la ex-



plotación de las aguas subterráneas no son de carácter técnico sino de gestión y administrativos, incluyendo los relativos a consideraciones económicas, de conocimiento, de propiedad y derechos, y de legislación y normativa. Unos se derivan de las circunstancias técnicas pero otros no dependen de ellas.

El coste creciente a causa del descenso de niveles, cuando se produce, forma parte de la naturaleza del acuífero y de la ubicación de las captaciones, y es previsible e internalizable. Además los acuíferos aportan la ventaja de poder ponerse en explotación progresivamente, a medida que la demanda crece, con mínimos intereses intercalarios, y siendo más barata al principio, lo cual favorece el desarrollo en las etapas iniciales.

La utilización racional de un sistema acuífero supone poder tomar decisiones desde un organismo gestor, consorciadamente o por acuerdo de las personas físicas y jurídicas involucradas. Estas decisiones comportan una amplia gama de actuaciones sobre el grado de explotación, la ubicación de las captaciones y su modo de construcción y operación, todo ello en función de objetivos económicos, sociales, ambientales e incluso políticos, y entre ellas está la de no actuar (Custodio, 1989). Todo ello incluye la toma en consideración de la cantidad de agua a extraer, sino también la preservación de la calidad del agua mediante actuaciones sobre la propia explotación y sobre el uso del territorio. Tales pueden ser las limitaciones en la aplicación de productos agroquímicos, el establecimiento de áreas de protección de captaciones o la delimitación de perímetros de protección de la calidad y de la cantidad, que se comentarán más adelante.

En general el número de actores que intervienen en la utilización y gestión de un sistema acuífero es muy elevado y con muy diversos intereses. Los actores son los que detentan derechos de captación y los propietarios o concesionarios de pozos, así como los que van a usar esa agua, y los ocupantes habituales del territorio que son objetos potenciales de restricciones y condicionantes a sus actividades, y también los órganos que gestionan o van a gestionar obras públicas, tales como vías de comunicación, encauzamientos, regadíos, canales navegables, etc. La complejidad es normalmente mucho mayor que para las aguas superficiales, y ello independientemente del carácter de dominio público o privado de las aguas, que sólo modifica el procedimiento de las actuaciones pero no altera sus fundamentos.

Esta multiplicidad de actores parece plantear problemas de difícil solución para un uso racional cuando no se

tiene experiencia, no se saben manejar las herramientas disponibles, no se utiliza personal adecuado, se obra con prepotencia y se actúa deprisa y bajo presión para encontrar salidas rápidas a situaciones que requieren una maduración, un aprendizaje, una educación pública, la creación de un ambiente de confianza mutua entre los actores y la definición de objetivos en los que haya un consenso para la aceptación.

La aglutinación de los intereses de la multiplicidad de actores se puede conseguir en buena manera mediante la formación de Comunidades de Usuarios de Aguas. En España están configuradas en la Ley de Aguas de 1985 como entes de derecho público y con capacidad de actuación en la gestión de aguas (AIH-GE, 1995), si bien su creación y funcionamiento no es fácil, ni en lo que respecta a su constitución ni a su encaje efectivo en la Administración del Agua. Su nacimiento eficaz parte del reconocimiento de ese interés y beneficio mutuo por parte de los propios usuarios de forma que la constitución de la Comunidad de Usuarios sea una consecuencia. Esto supone un periodo de información, de difusión de los conocimientos y de toma de conciencia, con la ayuda de especialistas en comunicación humana y en resolución de situaciones de conflicto, que forman parte de la trama de la utilización racional de las aguas subterráneas.

#### **4.7.- Aspectos de carácter social y cultural del agua subterránea**

Los problemas sociales en relación con las aguas subterráneas son poco acusados en las etapas iniciales de la explotación, pero toman caracteres de enfrentamiento cuando se instalan centros de extracción con pozos profundos y eficientes que dejan en seco o con notables mermas de caudal a manantiales tradicionales o a pozos antiguos de tipo rural o agrícola, y condicionan la utilización racional de las aguas subterráneas en tanto que no se llegue a acuerdos, en general más efectivos y rápidos por vía de negociación que por vía administrativa o judicial. En acuíferos costeros la situación se complica por las posibles salinizaciones de captaciones. Otras reacciones posibles, como las ocasionadas por la desecación de zonas húmedas y pérdidas de vegetación que depende del agua subterránea, en general no produce tanta conflictividad dado que se pierde fácilmente memoria de situaciones anteriores cuando la evolución es lenta, pero que deben ser tenidas en cuenta.

La recuperación de niveles freáticos altos cuando se abandonan las captaciones que durante un tiempo habían

drenado zonas en las que se han construido obras subterráneas se traducen en problemas de inundaciones de las mismas. Es un problema ligado al uso del agua subterránea que tiene una conflictividad social limitada, pero que también se ha de considerar.

Los problemas culturales son los que se derivan de usos tradicionales de manantiales y pozos, acompañados o no de sentimientos y mitos en cuanto a la calidad, propiedades o beneficios del uso del agua. El cierre de esas captaciones por contaminación puede suponer cierto malestar, más que su progresivo secado. Más importante es la problemática ligada a la existencia real o sentida de derechos de explotación del agua subterránea en base a su uso continuado, asentamiento en el territorio o participación comunitaria en obras de captación, y en el fondo es una forma de problema social.

## 5.- UTILIZACIÓN RACIONAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS, GESTIÓN DE ACUÍFEROS Y PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA

La utilización racional de las aguas subterráneas va muy ligada a la posibilidad de su gestión y de su planificación.

La gestión de acuíferos es el conjunto de guías, normas, leyes, reglamentos y actuaciones dirigidas a sostener, conservar proteger, restaurar y regenerar esos acuíferos. Hace referencia a la cantidad y calidad del agua captable del acuífero, que ha de hacerse de forma compatible con la demanda a servir, con otras demandas existentes, con el medio ambiente y con la ordenación y uso del territorio. La gestión incluye la consideración de los costes y beneficios directos e indirectos, las prioridades y restricciones no valorables económicamente, el uso sostenible del recurso y el respeto a los derechos intergeneracionales. En encuadre es la normativa vigente y los derechos legales y legítimos, aunque sean de facto. Entre los objetivos están las limitaciones generales a los derechos, la compensación por las afecciones a derechos singulares y la corrección de abusos.

La gestión de las aguas subterráneas no es un objetivo aislado, sino que se integra en la de otros recursos de agua, en la ordenación territorial y en los usos reales del territorio. Supone una asignación del agua que sea económica (no necesariamente barata) y equitativa, y suficientemente flexible como para poder adaptarse a un mundo y sociedad cambiante. Entre los objetivos figura el uso adecuado de la infraestructura hidráulica y de ser-

vicios, naturales o ya creados, con preferencia a nuevas actuaciones estructurales y no estructurales.

La gestión de acuíferos incluye:

- inventario de necesidades, usos, elementos y dispositivos,
- conocimiento de la demanda real, de su evolución y de su elasticidad,
- considerar que el acoplo oferta de agua-demanda de agua se hace desde los dos lados, y tener los medios para llevarlo a cabo,
- disponer de suficientes conocimientos científicos y técnicos,
- disponer de personal suficiente y debidamente formado,
- tener medios de observación de la cantidad y la calidad del agua, y también de los impactos ambientales, sociales y territoriales de la explotación,
- ampararse en medidas administrativas y legales,
- disponer de medios de aplicación de las reglas, tanto por vías coercitivas como estimuladoras,
- poder disponer de los medios extraordinarios para actuaciones no comunes, además de medios de actuación ordinarios,
- recibir medios económicos adecuados,
- realizar campañas de información pública y de formación.

Toda gestión ha de ser realista, aceptada socialmente, implementable, adaptada a cada circunstancia local y temporal, e integrada en el conjunto de recursos que requiere la sociedad.

Así como la gestión atañe al presente, con visión de futuro, la planificación se dirige al futuro considerando el presente. La segunda es la guía de la primera. La planificación no debería ser ningún corsé rígido que defina estrictamente todas las actuaciones, sino un marco o guía, suficientemente flexible para servir a un mundo cambiante y con una dinámica que lleva a situaciones a veces poco previsibles. Todo esto requiere considerar la incertidumbre de los datos y de las prognosis, la elaboración y estudio de escenarios verosímiles, y la integración de las restricciones macroeconómicas, sociales y políticas.

La planificación - y la gestión que de ella se derive - para ser eficaz debe aplicar generosamente el principio de subsidiaridad (que lo que se puede realizar a un nivel social menor no se realice por un grupo social mayor) y contar con la participación de los usuarios de agua y de los expertos, a través de asociaciones apropiadas, con

voz suficiente en los órganos de la planificación. También se ha de fundamentar en la solidaridad, o sea en el reconocimiento de que todos los seres humanos tienen igual dignidad, y por tanto todos tienen el mismo derecho a participar de los frutos de la herencia común que es la Naturaleza. Estos principios, solidamente asentados y aceptados como filosofía universal, han sido recogidos en las Declaraciones de Dublín de 1992, de la Confederación Mundial de Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente.

El marco amplio de una planificación debe incluir aspectos y criterios:

- técnicos en cuanto a cantidad y calidad del agua,
- económicos, tanto a pequeña como a gran escala,
- sociales, legales, y políticos,
- de seguridad de suministro para usos humanos,
- de atención a situaciones de emergencia y estratégicas,
- de corrección continuada que respete la eficacia y la equidad ante la generación presente y las futuras,
- de respecto a las situaciones consolidadas no abusivas o ineficaces,
- de compensación por daños y cargas no generales o desproporcionadas,
- de predictibilidad, de forma que sea posible prever la forma de amortizar obras e inversiones, atraer empleo estable y evitar crispaciones sociales.

## 6.- LA PROTECCIÓN DE LOS ACUÍFEROS COMO ELEMENTO DEL USO RACIONAL DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

### 6.1.- Aspectos generales

La protección de acuíferos incluye todo el conjunto de actividades y disposiciones cuyo objetivo es conservar tanto la cantidad como la calidad del recurso agua. En buena parte de los países industrializados, que con frecuencia coinciden con áreas templadas con relativamente elevada lluvia útil, se suele sobreentender que la protección hace referencia a la calidad y más en concreto a sustancias o propiedades que pueden ser nocivas a la salud. En cambio, en áreas en vías de desarrollo suele predominar el concepto de cantidad, es decir, que sea posible obtener los caudales deseados, en el lugar y momento oportunos. No obstante, los aspectos de calidad se van poniendo de relieve ante la aparición de grandes concentraciones urbanas, pobremente saneadas, donde los efectos sobre la salud son notorios y multiplicativos,

así como los de salinidad que acaban afectando al bienestar público y a la economía local.

### 6.2.- Protección de la cantidad

La protección de la cantidad del agua de un acuífero o sistema acuífero pretende el uso sostenido del cauce de recursos de agua. No obstante, no puede desligarse de la calidad, ni de como se realiza la explotación, ni de hasta donde hay realmente afección o solo se trata de una modificación ligada a la propia explotación, ni de qué interferencias o afecciones se pueden tolerar en otras partes del ciclo hidrológico o en el terreno. Una parte esencial de esta protección es la conservación de la recarga al acuífero y, cuando convenga, su incremento estimulado o artificial. Los cambios de uso del territorio, tales como deforestación o reforestación, cambios de la agricultura, urbanización, establecimiento de polígonos industriales, y paso de grandes vías de comunicación, pueden tener un gran efecto. En los casos en que una parte importante de la recarga procede de infiltración de aguas fluviales, intervenciones tales que cambien el régimen de las aguas y su turbidez, o que supongan encauzamiento y explotación de arroyos o que mantengan un flujo unidireccional entre el río y el acuífero, también tienen con frecuencia un gran efecto, que hay que evitar, corregir o compensar. Todo esto afecta profundamente a la utilización racional de las aguas subterráneas.

La protección de la cantidad se realiza mediante la delimitación de polígonos en los cuales se aplican restricciones y prohibiciones en cuanto a las extracciones y sus condiciones, y a la construcción de nuevas captaciones. Las restricciones y prohibiciones que tratan de mantener los caudales con tramos de ríos o manantiales que ya tienen cierto uso no suelen conducir a un uso racional del recurso agua. La protección de la cantidad no es algo estático, sino que requiere un ajuste periódico a la evolución de la explotación, de la recarga y de las actividades que afectan al balance hídrico. Por ello la conflictividad asociada puede ser grande y son relativamente frecuentes las situaciones de utilización no racional

En ciertos casos la delimitación de áreas de protección de aguas subterráneas pretende conservar acuíferos para usos futuros, en general para obtener de ellos agua potable, limitando o prohibiendo el uso actual. En el momento de iniciarse la explotación, si ésta no se limita a captar las salidas naturales según su régimen, y pretende una explotación con captaciones profundas, se producirán cambios, con lo que el estado preservado no se podrá

ya mantener, ni en cuanto al propio acuífero ni en cuanto a los sistemas asociados. Tal puede suceder con la creación de parques naturales para proteger reservas de agua para el futuro; la conservación del propio parque puede luego impedir o limitar el uso de esos recursos.

### **6.3.- Protección de la calidad de los acuíferos**

Cada día aparecen más ejemplos de acuíferos salinizados, o contaminados por nitratos agrícolas y residuos industriales, y más recientemente por plaguicidas diversos. Las fuentes difusas, como la agricultura y las grandes áreas urbanas, de efectos más diferidos, son actualmente una de las causas más serias y preocupantes de la contaminación creciente de los acuíferos. La difícil observación del suelo y la zona no saturada y la falta generalizada de datos ha creado durante cierto tiempo una falsa sensación de seguridad, que hoy queda claro que no es real. Además el problema de la contaminación de las aguas subterráneas no se limita a los acuíferos, sino que a medio o largo plazo repercute también en el resto del ciclo hidrológico, como en los ríos y manantiales y también en las zonas húmedas y tramos de costa en los que descargan los acuíferos afectados.

La protección de la calidad del agua subterránea a nivel de acuífero se basa en especial en la prevención de aquellas acciones humanas con capacidad para producir su contaminación, tanto por cambios hidrodinámicos como por la presencia en el territorio de sustancias y actividades contaminantes. Esto incluye normas generales para la producción, distribución, almacenamiento, transformación y vertido de la gran diversidad de contaminantes existentes o que se puedan producir en el futuro, con reglamentos y guías para la actuación en caso de accidente. También incluye el desarrollo de nuevas sustancias y procesos menos agresivos a las aguas subterráneas. Esta normativa incluye el uso de agroquímicos, de estiércoles, de fangos de depuración y de vertidos a la atmósfera que se puedan incorporar al agua subterránea mediante la lluvia. También incluye a aquellas acciones que alteren las características y espesor del suelo, o que acerquen la superficie del terreno al nivel freático, o de perforación para cualquier fin.

Puesto que no es posible eliminar absolutamente el manejo de sustancias potencialmente contaminantes, los mapas de vulnerabilidad a la polución de los acuíferos - en especial los que se refieren a grupos de contaminantes específicos - son una ayuda a la ordenación territorial y a la forma de aplicar las restricciones derivadas

de una determinada normativa. Eso no quiere decir diferentes grados de protección de los acuíferos sino que, para llegar a un mismo grado de protección de los recursos de agua subterránea, es preciso aplicar restricciones con diferente intensidad.

En planificaciones a corto y medio plazo, para evitar perder acuíferos de valor presente o futuro para el abastecimiento humano, cuando las acciones de protección a nivel general se prevén de aplicación poco eficaz, cabe considerar protecciones especiales. Estas pueden - y suelen - consistir en introducir restricciones a las actividades humanas en determinadas áreas territoriales, y para ello se recurre a figuras tales como parques naturales, zonas de reserva de la biosfera, y otras, que en lo posible además cumplan otros objetivos.

### **6.4.- Perímetros de protección de las captaciones**

Tras una polución conocida o velada, la población puede sufrir temporalmente el suministro de aguas de calidad inadecuada hasta el momento en que se detecta el problema o quedar sometida a restricciones de servicio, lo cual es indeseable para un país desarrollado, y no solo por lo que representa en pérdida de calidad de vida - sino también cuanto a costes asociados. A este respecto, las captaciones de agua subterránea son fuentes de suministro de agua potable de calidad estable y poco sometidas a afecciones por fallos tecnológicos, que requiere especial protección. Además, la pérdida temporal o definitiva de una captación supone una pérdida de una infraestructura hidráulica y sus obras asociadas, la necesidad de nuevas obras substitutorias y con frecuencia la puesta a disposición de un recurso de agua más costoso y no en pocas ocasiones conflictivo. Por eso la protección de captaciones es además un objetivo económico y social importante. La conservación de inversiones permite destinar los nuevos recursos económicos a otras necesidades de desarrollo, de bienestar y de creación de oportunidades de empleo.

La protección se hace mediante restricciones al uso del territorio y a actividades que supongan un riesgo de contaminación. Normalmente se imponen grandes restricciones en las inmediaciones de la captación, y se van relajando al aumentar la distancia. Las limitaciones y la zonificación varían de un país a otro (Lallemant-Barrés y Roux, 1989; Matthess et al., 1985; EPA, 1987; IGME, 1991; van Waegeningh, 1981) y los criterios son también variables, pero hay un denominador común que se puede resumir en la delimitación de las siguientes áreas:

Zona Inmediata: 10 a 20 m alrededor de la captación, propiedad del explotador, cerrada y controlada; se excluye cualquier actividad, almacenamiento, manipulación o aplicación peligrosa.

Zona Próxima: preferentemente para la protección bacteriológica. El límite externo se suele fijar para un tiempo de tránsito del agua desde la superficie del terreno a la captación superior a un cierto valor, que suele variar entre 50 y 100 días. Según el terreno, espesor no saturado y caudal de captación puede traducirse en distancias de 0 a 300 m si bien es frecuente que se establezcan distancias mínimas a respetar, según se trate de un acuífero libre o de un acuífero cautivo, y según la garantía de construcción de la captación. Se toleran solo actividades no contaminantes, solo ciertos almacenamientos en condiciones bien controlables, y en general un paso restringido de personas y vehículos.

Zona Lejana: en general hasta límites naturales (divisorias de aguas) o suficientemente alejados como para conseguir tiempos de tránsito de al menos alguna decena de años. Su extensión y forma es muy variable, pero es corriente que alcance desde varios centenares de metros hasta más de 1 km en acuíferos libres, y puede ser inexistente para acuíferos cautivos con perforaciones dotadas de buen aislamiento. En ella se aplican restricciones de uso del territorio en cuanto a ocupación industrial o urbana o a determinadas prácticas agrícolas, y a la existencia, diseño y conservación de vías de comunicación. Sin ser extensiones grandes, a veces se divide en dos partes, para graduar las restricciones.

Es evidente que además de la protección territorial, la captación deba estar construida de modo que se evite la penetración de contaminantes.

El concepto de área de protección de una captación de agua subterránea destinada al consumo humano es intuitivamente claro y es fácil convencer de su necesidad. Sin embargo, su definición territorial es más difícil, no es sencillo establecer aquellas restricciones que sean razonables, y es mucho más arduo su implantación eficaz. La existencia de límites territoriales con restricciones distintas a un lado y otro es objeto de conflictividad, así como su trazado real, y aún más su modificación. Además, la imposición de perímetros de protección afecta al valor de mercado de los terrenos afectados.

Así, el establecimiento de perímetros de protección de captaciones supone una importante intervención en la ordenación territorial y por lo tanto debe coordinarse con

la legislación y normativa al respecto. Es algo que en general va más allá de la esfera de competencia de los organismos de gestión del agua. En principio puede condicionar actividades agrícolas, ganaderas, forestales, industriales, mineras, de transporte (carreteras, ferrocarriles, canales de navegación), urbanas y de prospección y penetración del subsuelo.

## 6.5.- Protección de los acuíferos costeros

Buena parte de los problemas que afectan a los acuíferos costeros son de gestión, es decir, de dónde, cómo y cuándo se realizan las extracciones, y qué cantidades se extraen. La mala o ineficiente gestión puede fácilmente llevar a una salinización por:

- Extracción excesiva con respecto a la recarga del acuífero.
- Captaciones demasiado próximas al litoral.
- Pozos con explotación a caudal excesivamente alto.
- Pozos excesivamente cercanos unos a otros.
- Mala construcción e inadecuado proyecto de la captación.

En general muchos de los acuíferos costeros con problemas de salinización no disponen de ningún plan de explotación ni de prevención de la contaminación marina. La explotación suele ser el resultado de acciones aisladas que no consideran los recursos explotables y menos aún el uso sostenible del acuífero.

El insuficiente conocimiento de la dinámica de los acuíferos costeros hace que en ocasiones se trate de conseguir la protección o la corrección con medios inadecuados o desproporcionados, en base a concepciones no realistas o por intento de imitación de actuaciones en otros lugares. Cada acuífero tiene su propia dinámica de acuerdo con sus peculiaridades geológicas e hidrogeológicas, unidas a una forma de explotación y a actividades económicas y socio-legales ya establecidas, dentro de un determinado contexto poblacional. Difícilmente hay en el mundo dos situaciones asimilables. Además, la gestión, conservación y protección son dinámicas y hay que prever los mecanismos de adaptación y corrección necesarios. La realidad de la explotación de acuíferos costeros la frecuente la utilización y distribución de aguas salobres o saladas.

El agua salobre o salina puede ser una fuente de agua si lo que se demanda es agua para desalinizar o simplemente agua de temperatura poco variable, como por

ejemplo para refrigeración. La captación de aguas subterráneas de salinidad similar a la del mar, que no es una situación frecuente (fig. 6), puede proporcionar un agua de características constantes que puede ser una alternativa para la creación de acuicultivos de especies marinas. No obstante, no es raro que estas aguas resulten anóxicas, con presencia de amonio y otros iones metálicos tóxicos a la vida, y por lo tanto que se requiera cierto tratamiento.

La explotación de captaciones salinizadas reduce el potencial del agua salina en el acuífero y por lo tanto su penetración en el mismo, aún en situaciones de niveles de agua dulce bajo el nivel del mar. Este es un efecto beneficioso para el acuífero, de carácter temporal, y siempre y cuando el agua salinizada extraída tenga algún uso no nocivo, como la refrigeración. Es una interesante medio de gestión y protección si se utiliza racionalmente. Pero la extracción de aguas salinas tiene una serie de inconvenientes importantes:

- dificulta o anula la posibilidad de reutilizar las aguas residuales tratadas cuando el agua salinizada extraída va a parar al sistema de alcantarillado
- puede afectar a la producción agrícola y afectar negativamente al suelo
- puede ser una causa de salinización del acuífero subyacente, bien sea por la existencia de fugas en conducciones de distribución de retorno al mar o de transporte, o por originar excedentes de riego muy salinos que se infiltran.

Salvo en las situaciones aludidas, la explotación racional de los acuíferos costeros una necesidad, no solo porque el suministro de agua salobre o salada es sanitaria, económica y socialmente inaceptable, sino también porque los acuíferos costeros son depósitos naturales ya existentes, situados en lugares donde poner a disposición otros medios de almacenamiento es muy caro o difícil por cuestiones de relieve y grado de ocupación del territorio. Es-

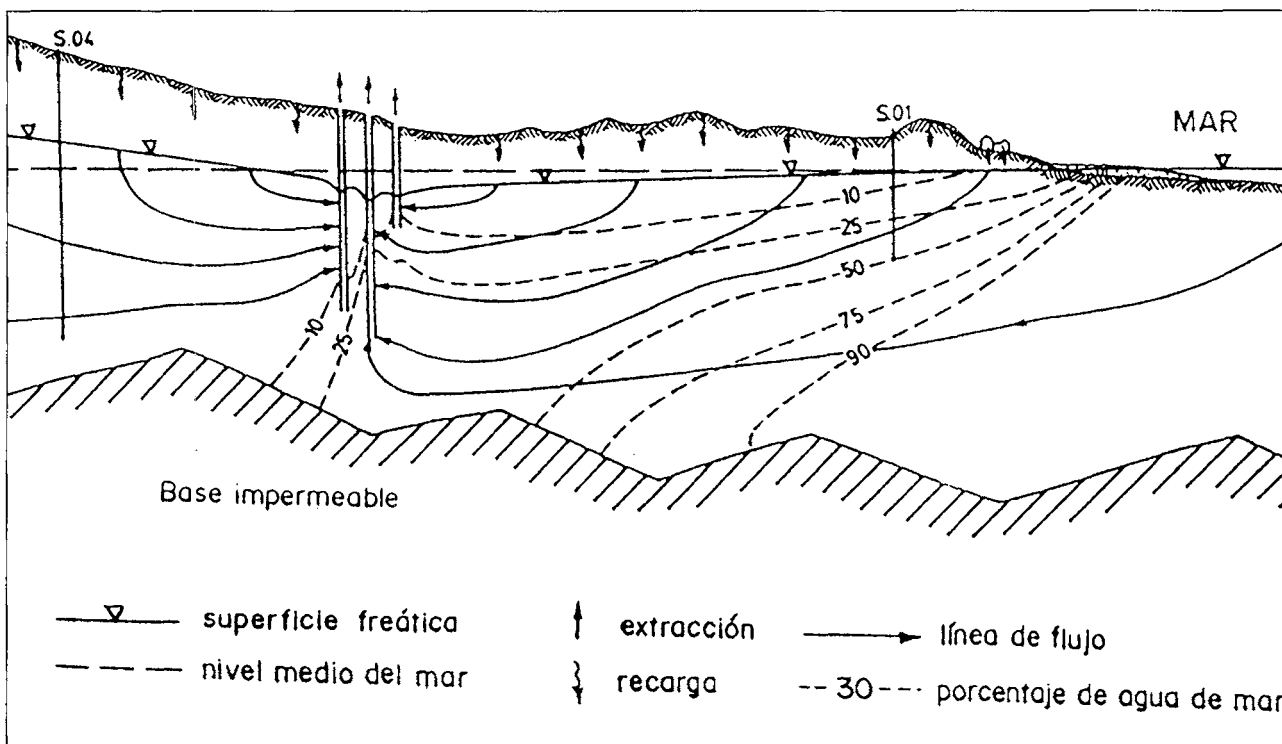


Figura 6.- Situación de mezcla de agua dulce-agua salada en un acuífero costero muy permeable sometido a explotación intensa en áreas algo alejadas de la costa. El agua captada en parte es del interior continental y en parte agua marina que llega conjuntamente con la recarga de agua dulce en la franja costera. Esto explica la gran variabilidad de salinidad de un pozo a otro, los cambios con la explotación y por qué no se llega a extraer ni agua dulce ni agua marina. Situación inspirada en el área de Calafell, en la costa del Garraf (Tarragona).

Figure 6.- Mixing of fresh and saltwater in a highly permeable coastal aquifer subjected to intense exploitation in areas far from the coast. Abstracted water is in part inland continental water and partly marine water which arrives jointly with freshwater recharged in the coastal strip. This explains the large variability of salinity among wells, the changes observed when exploitation is modified and why wells do not yield freshwater nor marine water. This is based on the behaviour of the Calafell area, at the Garraf coastal area, Tarragona.

tos acuíferos costeros son así una reserva de agua dulce para situaciones de emergencia (sequía, puntas estivales de demanda de agua, averías en otros sistemas de abastecimiento), con alto valor estratégico (Custodio, 1995).

#### **6.6.- Protección de humedales que dependen del agua subterránea**

Una parte importante de las zonas húmedas dependen de la existencia y/o aportes de agua subterránea (Llamas, 1988a; 1988b; 1989; 1991a). No solo son de interés naturalístico sino económico inmediato, ya que son una fuente de riqueza. Su protección es una actividad importante dentro de la conservación del medio ambiente, que requiere a su vez la protección de los acuíferos con los que guardan relación y su utilización racional. El agua necesaria para conservar un humedal es una demanda de agua más del sistema acuífero, con la diferencia de que el que ese agua esté disponible depende de que la distribución natural de potenciales hidráulicos no se altere o se altere poco. Las captaciones de agua subterránea cambian esa distribución y pueden producir notables afectaciones, si bien el efecto puede pasar desapercibido durante años debido a la lenta respuesta de los acuíferos y de la vegetación.

La protección de humedales comporta la preservación del acuífero tributario para mantener razonablemente la cantidad y niveles del agua. Es algo que se debe definir como un compromiso entre la atención a las demandas humanas, la reducción ecológicamente tolerable y el mantenimiento de la calidad. Los efectos de las extracciones y las alteraciones pueden aparecer diferidos años o décadas, y establecerse muy lentamente, de forma aparentemente imperceptible en observaciones en cortos lapsos de tiempo. Ello obliga a restricciones serias en el uso del territorio y a adoptar medidas extraordinarias en cuanto a posibles asentamientos humanos y agrícolas e incluso de zonas comerciales o de estacionamiento de vehículos.

#### **6.7.- Aspectos económicos y sociales de la protección de acuíferos**

La aplicación de la normativa de protección de acuíferos supone la imposición de obligaciones y la aplicación de servidumbres y restricciones al uso del territorio, además de actuaciones de carácter general. Todo ello conlleva costes, tanto de primera instalación como de mantenimiento. La forma de cubrirlos es muy diversa y

guarda estrecha relación con la política fiscal de cada país. Las limitaciones de derechos o costumbres o de simples situaciones de hecho deberían ser soportadas, al menos en buena parte, por los propios usuarios del acuífero o por el Municipio, ya que en general van en su directo beneficio. Pero cuando esas limitaciones pretenden conservar caudales de base de un río o áreas de valor ecológico o transferir capacidad de extracción de un sector económico a otro, parece lógico que existan ciertas compensaciones económicas desde el sector beneficiado al sector perjudicado o que siente que merman sus posibilidades de acceso actual o futuro al recurso agua. Ello supone una evaluación objetiva de ese perjuicio, tras depurar situaciones evaluables de abusivas.

La conflictividad y complejidad que puede conllevar la puesta en práctica parece aconsejar que el marco de solución más adecuado sea la constitución de Comunidades de Usuarios de Aguas (del acuífero, o del conjunto de recursos de agua), también denominadas en California Distritos de Aguas. Estas Comunidades de Usuarios están definidas en la Ley de Aguas española de 1985 y en sus Reglamentos, y se han formado ya varias (AIHGE, 1995), pero aún hay poca experiencia de funcionamiento.

La protección general del agua subterránea como línea general de actuación, afecta al conjunto de una unidad política y por lo tanto no parece que sea objeto de compensaciones por supuestos perjuicios, aunque no se excluye la conveniencia transitoria de ayudas y subvenciones a sectores económicamente débiles o de gran impacto social, para acelerar la implementación de las normas.

Las limitaciones de uso de agroquímicos en agricultura tiene dos vertientes. Una es el correcto uso en cuanto a tipo de producto, dosis, momento y forma de aplicación. No parece que ésto sea objeto de compensación económica, salvo ayudas o incentivos para adquirir la tecnología y práctica adecuada. Tampoco parecen compensables las diferencias de limitaciones o de exigencias de un área a otra en función de cambios en el tipo de suelo y de vulnerabilidad y riesgo de contaminación del acuífero. Pero si se imponen restricciones en la aplicación de agroquímicos más allá de lo que es una buena práctica agrícola, sí que parece que debe ser objeto de compensación económica por parte de los que se benefician de esa protección. La compensación puede medirse como pérdida de producción.

Si se establecen áreas de reserva de aguas subterráneas, su coste debe sufragarse a cargo de los futuros be-

neficiarios, los cuales deben compensar a los habitantes y entidades con derechos objetivos de explotación, tanto del agua como del territorio, de las pérdidas reales que puedan sufrir a causa de limitaciones presentes o pérdidas de expectativas. La compensación debería tener lugar siempre que con la actuación prevista se produzca un daño desproporcionado.

La creación de áreas de protección especial de acuíferos y de áreas de protección de captaciones contiene aspectos claros de compensación económica. Está claro que el área inmediata a una captación debe ser adquirida y equipada por el propietario de la captación. Las limitaciones y prohibiciones en las otras áreas que no sean de carácter general deben ser compensadas equitativamente. Parece lógico que el coste sea cargado, al menos en parte, a los usuarios del agua de la captación o del acuífero como un sobreprecio o una tasa adicional. No obstante, también se puede financiar a partir de otras tasas que graven el agua puesta a disposición. Sin embargo, unas limitaciones particulares que creen diferencias con otras partes del territorio en donde no sean necesarias, pueden ser también compensadas con una tasación general sobre la actividad en cuestión y su aplicación a las situaciones particulares, o bien proceder de la recaudación general de impuestos destinados a compensaciones.

Sin embargo, la puesta en marcha eficaz de cualquier política de protección requiere al mismo tiempo la reparación y restauración de lo ya dañado. En general el causante de la contaminación debe pagar el coste de la limpieza. En la realidad, cuando éste no tiene capacidad económica o es desconocido, debe abordarse con fondos públicos. Estos daños pueden ser importantes en áreas industrializadas y periurbanas. A menudo se requieren grandes sumas de dinero para abordar el estudio, desarrollo de metodología de limpieza, intervención, descontaminación y restauración, que pueden fácilmente rebasar las posibilidades económicas a medio plazo de una región o país.

Parte de la frecuente desidia en la protección de los acuíferos deriva de un menosprecio de fuentes de agua que resultan poco espectaculares, o cuya gestión requiere una cierta habilidad de la que se carece. A ello se suma la preferencia, por parte de los aparatos de la administración y de las grandes empresas, por las grandes obras, espectaculares y con notables inversiones económicas (Llamas, 1984; 1994b; 1995). Aunque en muchos casos tal preferencia puede estar técnica, económica y socialmente justificada, en muchos otros no responde a un análisis correcto de alternativas (Sahuquillo, 1994) o

no se basa en un proyecto que integre los diferentes elementos de forma racional y que produzca el mayor beneficio económico y social con el mínimo daño ambiental y dando el servicio adecuado.

La conservación y utilización racional de los acuíferos en buena parte depende del correcto conocimiento de su valor y de su acertada incorporación en la definición y estudio de alternativas de aprovechamiento de recursos de agua. Esto requiere educación popular, información asequible y veraz, y ética ciudadana, profesional, administrativa y política, y la adecuada cooperación de los medios de información de masas.

## **7.- Explotación intensiva y sobreexplotación de acuíferos**

El mundo es finito y la demanda de agua de adecuada calidad es creciente. De ahí viene la constatación - en general exagerada, mal documentada, tendenciosa y sensacionalista - y la generalización de problemas derivados de la explotación de aguas subterráneas, tales como grandes descensos de niveles, agotamiento de reservas y salinización. Esto levanta reacciones neomaltusianas que auguran un futuro de penuria y degradación sin aportar más soluciones que ahogar el desarrollo y angustiar a la población, imponiendo restricciones injustificadas. En este contexto aparece el borroso concepto de sobreexplotación de acuíferos y sus variantes.

La naturaleza es un conjunto de equilibrios y de evoluciones fuera del control humano (por ejemplo como resultado de cambios climáticos, tectónicos y geomorfológicos) y la intervención del hombre los perturbaba de una u otra manera y con intensidad diferente según las circunstancias. Esa perturbación se produce para obtener un beneficio y como respuesta se obtiene un cambio que implica unos costes. No obstante sucede con frecuencia que los que obtienen el beneficio no son aquellos que soportan el coste, y ello puede ser una causa de conflictividad que dificulta la utilización racional de las aguas subterráneas.

Es fácil que la actuación a la que unos llamen simplemente explotación - los que obtienen beneficio - otros llamen sobreexplotación si reciben un costo no compensado. De ahí la enorme dificultad para definir lo que es sobreexplotación, o lo que son efectos indeseables en caso de hablar de caudal seguro y otros conceptos similares. Con definiciones simplistas difícilmente se puede llegar a un resultado satisfactorio, y de ahí que aquí no se



intente hacerlo, sino que más bien se trate de enmarcar el concepto. Ello puede también explicar en cierta manera la razón por la que la Ley de Aguas española de 1985, que introduce el término sobreexplotación - y su compañero de riesgo de salinización - y que por lo tanto los ha convertido en términos con contenido legal, no aporta ninguna definición clara y deja un amplio margen de posibilidades en el artículo 171.2 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico, de forma similar a la definición de caudal seguro.

Es una idea frecuente entre muchos hidrólogos y gestores del agua - en buena parte basada en una extrapolación simplista de la hidráulica de embalses y depósitos a los acuíferos - que la sobreexplotación se produce cuando se extrae más de lo que entra o se recarga, y ello sin considerar aspectos de calidad. Esta podría ser una sobreexplotación en sentido estricto, que es la que se hace en algunas zonas áridas, pero que no responde a la mayoría de situaciones en las que se aprecia efectos "negativos", sin conocer bien su dinámica.

Como ya se expuso anteriormente, la explotación de todo acuífero que no sea la simple captación de sus salidas naturales, comporta una perturbación potenciométrica para movilizar el agua subterránea hacia las captaciones artificiales. Cuando el caudal de agua captada es menor que la recarga que recibe el acuífero se acaba alcanzando un nuevo equilibrio en el sistema de agua subterránea, de modo que el caudal captado se compensa, pasado cierto tiempo, con la disminución de salidas naturales (manantiales, caudal de base de los ríos y arroyos, superficie evaporante de lagos, humedales y zonas de vegetación freatófita, paso a otros acuíferos), y con un aumento de la recarga (infiltración de agua fluvial o de lagos - o del mar -, recarga desde otros acuíferos). Cuando las extracciones superan a la recarga se produce un progresivo vaciado del acuífero por consumo de reservas, en un proceso llamado minería del agua, y también sobreexplotación en sentido estricto.

Pero aún siendo la recarga algo conceptualmente elemental, su plasmación en cifras es uno de los problemas más difíciles de la hidrogeología si se requiere exactitud, aunque no suele ser más difícil que evaluar las aportaciones temporales de un río, a igual precisión en las cifras. Es necesario considerar la variación espacial y temporal de la precipitación y de la evapotranspiración, de los posibles aportes de aguas superficiales, del estado del suelo y de la cobertura vegetal y de la actividad humana en el territorio, además de posibles acciones de recarga artificial. El conocimiento se afina con estudios de deta-

lle y una buena red de observaciones potenciométricas mantenida a lo largo del tiempo.

Es importante considerar que un continuado descenso de niveles indica consumo de reservas de agua del sistema acuífero, pero no necesariamente implica que las extracciones superen a la recarga, y en muchos casos no la superan. La causa hay que buscarla en la larga duración del periodo transitorio entre el inicio de la extracción y la llegada a un nuevo estado de equilibrio. En las circunstancias más frecuentes puede variar entre pocos años y decenas de años, pero en ocasiones puede mucho más largo (fig. 7).

Más importante que el propio balance hídrico es la evaluación de los efectos de la explotación, incluyendo los derivados de la profundización de los niveles del agua, los químicos y los económicos. Pero también deben considerarse los numerosos e importantes beneficios derivados del uso del agua subterránea, sobre todo en cuanto a magnitudes y progresividad de las inversiones económicas, crecimiento acompasado de la demanda y la oferta de aguas, y menores problemas de calidad, al menos inicialmente.

La designación sobreexplotación en general pone énfasis en los aspectos negativos y propende a prohibiciones, cohartaciones e intervencionismo. Esto y la falta de definición clara hacen aconsejable que se abandone su uso (Custodio y Dijon, 1991; Custodio, 1993a, 1993b; Margat, 1992). Es más realista hablar de explotación intensiva y analizar sus circunstancias, y en el caso de ser claramente excesiva en su conjunto, calificarla como tal o como abusiva, con la definición clara de las circunstancias en que se produce.

En cierta manera a uso sostenible del agua subterránea se opone la sobreexplotación de los acuíferos, minería del agua y contaminación de los acuíferos, si bien estos conceptos no deben verse en un ámbito limitado en el tiempo y en el espacio, ni desligado del resto de las fuentes de agua aptas para el uso que se pretende (Margat y Saad, 1982). Así, agotar las reservas no renovables de un acuífero o salinizarlo - por lo tanto substrayendo su agua y uso a generaciones futuras - puede que sea aceptable como utilización racional si con los beneficios que se van a obtener es posible crear riqueza y bienestar permanentes, y con ellos se puede poner a disposición otras fuentes de agua hasta aquel momento inasequibles, tales como la traída de aguas superficiales o subterráneas desde lugares alejados, o la extracción desde mayores profundidades, o incluso mediante actuaciones complemen-

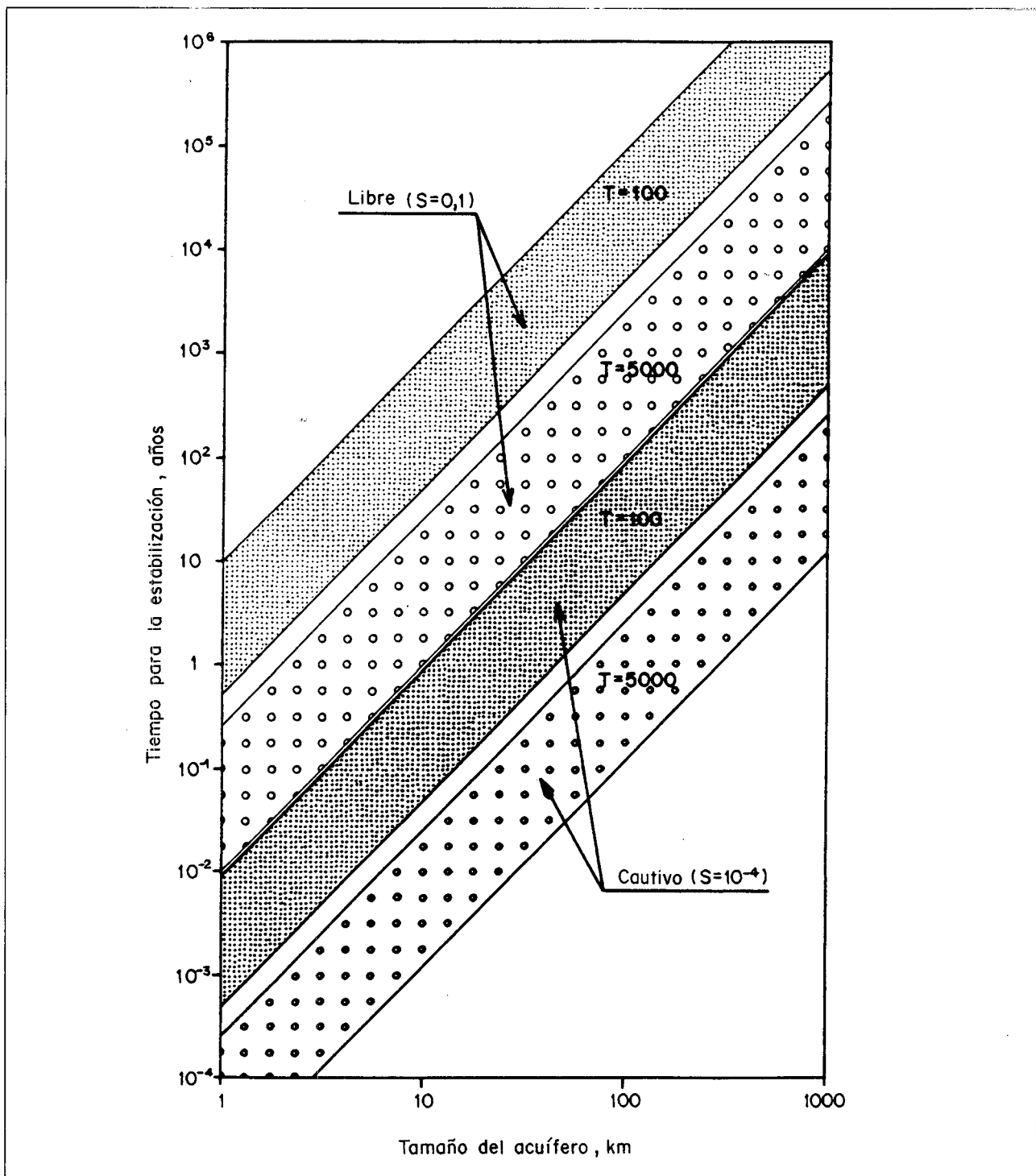


Figura 7.- Tiempo en años (t) para que los descensos en un acuífero se estabilicen después de un cambio brusco en las condiciones de recarga-descarga en función del tamaño (L, en km), la transmisividad (T, m<sup>2</sup>/día) y el coeficiente de almacenamiento (S).  $t = cL^2S/T$ , en que cE un coeficiente de proporcionalidad que, con un margen estrecho, depende de cada situación particular (según Custodio, 1993a; Custodio y Dijon, 1991).

Figure 7.- Time (t) in years to attain the steady state of groundwater head after a sudden change in the recharge-discharge conditions, as a function of size (L, km), transmissivity (T, m<sup>2</sup>/day) and storage coefficient (S).  $t = aL^2S/T$ , in which cX is a proportionality coefficient varying in a narrow range according with each particular situation (after Custodio, 1993a; Custodio and Dijon, 1991).

tarias más complejas, abordables por una sociedad económicamente mejor dotada, como la desalinización, reutilización o el incremento de la regulación subterránea por recarga artificial.

La experiencia muestra que no se han cumplido los malos augurios sobre ciertos acuíferos (Llamas, 1992; Margat, 1992; Custodio y Dijon, 1992) - salvo en situaciones locales afectando a colectivos limitados y absorbibles por el conjunto - pero eso tampoco lleva a adoptar la postura contraria, de que el recurso agua está disponible sin más, ilimitadamente en cantidad y calidad, suponiendo que el progreso técnico irá solucionando los problemas a medida que aparezcan (Foster, 1991). Se trata de posiciones extremas clásicas (Tierney, 1990). El que no se produzcan situaciones catastróficas reales es el fruto de un análisis desapasionado de las situaciones con suficiente anticipación como para reconocer los problemas y atraer recursos humanos y económicos para abordarlos. Sin embargo esta postura se muestra poco atractiva, popular y políticamente.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se ha preparado por la amable invitación del Dr. Jordi Serra. Su materialización se ha debido al apoyo del grupo de Hidrología Subterránea del Departamento de Ingeniería del Terreno (ET-SICCP) de la Universidad Politécnica de Cataluña y del Centro Internacional de Hidrología Subterránea. Se han utilizado datos y medios de los proyectos Doñana de la CICYT (AMB 92-636) y GRACE de la CEE, que guardan relación con la temática. Las ideas expresadas son las del autor y no tienen por que coincidir con las de los organismos mencionados.

## REFERENCIAS

- ADAMS, B.; FOSTER, S.S.D. (1992). Land-surface zoning for groundwater protection. *J. Inst. Water & Environmental Management*. London. 6(3): 312-321.
- AIH-GE (1995). *Las aguas subterráneas en la Ley de Aguas Española: un Decenio de Experiencia*. Asoc. Intern. de Hidrogeólogos-Grupo Español. I: 1-384.
- ALBINET, M.; MARGAT, J. (1970) Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine. *Bull. BRGM*, 2ème Serie, 3(4): 13-22.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J.; HACKETT, G. (1987). *DRASTIC, a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic setting*. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK. EPA Report 600/2-87-035: 1-455.
- ANDREU, J. (1993). Conceptos y métodos para la planificación hidrológica. *CIMNE*. Barcelona: 1-391.
- ASCE (1972). *Ground water basin management*. Manuals and Reports on Engineering Practice no 40. Am. Soc. Civil Engineers. Washington.
- BEAR, J. (1979). *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill: 1-589.
- CARBONELL, A.J. (1993). *Ground water vulnerability assessment: predicting relative contamination potential under conditions of uncertainty*. National Research Council. National Academy Press, Washington D.C.: 1-204.
- CIVITA, M. (1994). Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. *Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale 31*. Pitagore Editrice. Bologna: 1-325.
- CUSTODIO, E. (1986). Recarga artificial de acuíferos. *Boletín de Información y Estudios 45*. Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. Madrid: 1-149.
- CUSTODIO, E. (1989). *Strict aquifer control rules versus unrestricted groundwater exploitation: comments on economic consequences*. Groundwater Economics. Elsevier, Developments in Water Science, 39: 381-395.
- CUSTODIO, E. (1993a). Hydrogeological and hydrochemical aspects of aquifer overexploitation. *Selected Papers on Hydrogeology*. Intern. Assoc. Hydrogeologists. Heise, 3: 3-27.
- CUSTODIO, E. (1993b). Is groundwater overexploitation a new hydrogeological concept?. *IGEA*, Rev. Sez. Ital. Acque Sotterranee, Assoc. Mineraria Subalpina. Torino, 2: 5-14.
- CUSTODIO, E. (1993c). *Protección de los acuíferos y su correcta explotación: perímetros de protección*. La Economía del Agua. Sociedad General de Aguas de Barcelona. Barcelona: 69-105.
- CUSTODIO, E. (1994). I: Procesos de contaminación del agua en la zona saturada, II: Contaminación de las aguas subterráneas inducida por la explotación, III: Gestión y protección de acuíferos. *Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*. Univ. Nacional del Mar del Plata. Argentina: 139-244.
- CUSTODIO, E. (1995). La gestión de los acuíferos costeros como fuente de un recurso importante y estratégico: encaje en la Ley de Aguas y perspectivas: punto de vista del usuario. Las Aguas Subterráneas en la Ley de Aguas Española: un Decenio de Experiencia. Asoc. Intern. de Hidrogeólogos-Grupo Español. Ponencias, Tomo I: 219-252.
- CUSTODIO, E. Llamas, M.R. (1983). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, 2 vols: 1-2350.
- CUSTODIO, E. Bruggeman, G.A. (1987). Sea water problems in coastal areas. *Studies and Reports in Hydrology 45*. UNESCO Press. París: 1-596.
- CUSTODIO, E. Dijon, R. (1991). *Groundwater overexploitation in developing countries: report of an Interregional Workshop*, Gran Canaria, Canary Islands, Spain. U.N. Dept. of Technical Cooperation for Development. New York, 1992: 1-116.
- DAVIS, S.N.; de Wiest, R.J.M. (1965). *Hydrogeology*. Wiley: 1-463.
- DE MARSILY, G. (1986). *Quantitative hydrogeology*. Academic Press: 1-440.
- DOMENICO, P.A. (1972). *Concepts and models in groundwater hydrology*. McGraw-Hill.
- DUIJVENBOODEN, W. VAN; WAEGENINGH, H.G. VAN (1987). Vulnerability of soil and groundwater to pollutants. TNO/RIVM, *Proceedings and Information*, 38. The Hague: 1-1143.
- EPA (1987). *Guidelines for delineation of wellhead protection areas*. U.S. Environmental Protection Agency, Ada, OK.
- FALKLAND, A.; CUSTODIO, E. (1991). Hydrology and water resources of small islands: a practical guide. *Studies and Reports in Hydrology*, 49. UNESCO Press. París: 1-435.
- FOSTER, S.S.D. (1987). Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. *Vulnerability of Soil and Groundwater to Pollutants*. TNO/RIVM, Proceedings and Information 38, The Hague: 69-86.
- FOSTER, S.S. (1991). Unsustainable development and irrational exploitation of groundwater resources in developing nations: an overview. *Aquifer Overexploitation*. XXIII Congress Intern. Assoc. Hydrogeologists. Puerto de la Cruz. I: 385-402.
- FOSTER, S.S.D.; HIRATA, R. (1991). *Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data*. WHO-PAHO/CEPIS. Lima, Perú: 1-78.

- FREEZE, R.A.; CHERRY, J.A. (1979). *Groundwater*. Prentice-Hall: 1-604.
- IGME (1991). *Guía metodológica para la elaboración de perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid: 1-289.
- IRIBAR, V. (1992). *Evolución hidrogeoquímica e isotópica de los acuíferos del Baix Llobregat*. Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona.
- LALLEMAND-BARRÉS, A.; ROUX, J.C. (1989). *Guide méthodologique d'établissement des périmètres de protection des captages d'eau souterraine destinée à la consommation humaine*. Manuels & Méthodes 19, Editions du BRGM. Paris--Orléans: 1-221.
- LLAMAS, M.R. (1984). *Política hidráulica y génesis de mitos hidráulicos en España*. Cimbra, Madrid, 218: 16-25.
- LLAMAS, M.R. (1988a). Conflicts between wetland conservation and groundwater exploitation: two case histories in Spain. *Environ. Geol.*, 11(3): 241-251.
- LLAMAS, M.R. (1988b). *El agua subterránea como recurso económico-ecológico y como factor geológico*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid: 1-83.
- LLAMAS, M.R. (1989). *Wetlands and groundwater: new constraints in groundwater management*. *Groundwater management: quantity and quality*. Intern. Assoc. Scientific Hydrology, Publ. 188: 595-604.
- LLAMAS, M.R. (1991a). Groundwater exploitation and conservation of aquatic ecosystems. *Aquifer Overexploitation*. XXIII Congress Intern. Assoc. Hydrogeologists, Puerto de la Cruz, I: 115-132.
- LLAMAS, M.R. (1991b). Consideraciones iniciales sobre el pasado, presente y futuro de las aguas subterráneas en España. *Revista de Obras Públicas*. Madrid. Dic. 1991: 7-12.
- LLAMAS, M.R. (1992). La sobreexplotación de aguas subterráneas en España: bendición, maldición o mito. *Riegos y Drenajes*. Barcelona, 61: 17-33.
- LLAMAS, M.R. (1994a). El Plan Hidrológico y las aguas subterráneas: otro punto de vista. *Revista de Obras Públicas*. Marzo 1994: 13-26.
- LLAMAS, M.R. (1994b). La crisis del agua: ¿mito o realidad?. *Hidrogeología*. Granada. 10: 31-39.
- LLAMAS, M.R. (1995). *Las aguas subterráneas en España*. El Campo. Servicio de Estudios BBV, Bilbao: 129-147.
- MARGAT, J. (1992). *The overexploitation of aquifers. Selected Papers on Aquifer Overexploitation*. Selected Papers on Hydrogeology. Intern. Assoc. Hydrogeologists. Heise. 3(1992): 29-40.
- MARGAT, J. (1992). Quel est le concept de suexplotation utile à la gestion des eaux souterraines?. *Hydrogéologie*. Paris-Orléans, 4(1992): 145-152.
- MARGAT, J.; SAAD, K.F. (1982). Utilisation des ressources fossiles: analyse de cas historiques. *Hydrogéologie-Géologie de l'Ingenieur, Sect. III, (3/4)*: 289-304.
- MATTHESS, G.; FOSTER, S.S.D.; SKINNER, A. (1985). *Theoretical background, hydrogeology and practice of groundwater protection zones*. Intern. Contributions to Hydrogeology, 6. Intern. Assoc. Hydrogeologists. Heise: 1-204.
- MEINZER, O.E. (1920). Quantitative methods of estimating groundwater supplies. *Bull. Geological Society of America*, 31: 329-338.
- PÉREZ ADÁN, J. (1992). *El pensamiento "ecológico" de Juan Pablo II*. Estudios sobre la Encíclica "Centesimus Annus". Aedos-Unión Editorial. Madrid: 333-350.
- QUERCIA, F. (1983). *Summary review of available models for groundwater flow and contaminant migration*. UNESCO-IHP. Paris. Technical Documents in Hydrology. Paris: 1-58.
- SAHUQUILLO, A. (1983). *Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas*. Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid.
- SAHUQUILLO, A. (1990). *El método de los antovalores en el análisis de los acuíferos cársticos*. Libro de Homenaje a Carlos Romariz. Sección de Geología Económica e Aplicada. Lisboa: 200-229.
- SAHUQUILLO, A. (1994). El tratamiento de las aguas subterráneas en el Plan Hidrológico Nacional. *Revista de Obras Públicas*, enero 1994: 41-54.
- SAHUQUILLO, A.; ANDREU, J. (1987). *The eigenvalue approach solving linear groundwater flow problems*. Groundwater Flow and Quality Modelling. LNEC. Lisboa. NATO ASI Series C, 224, Reidel: 151-164.
- SAHUQUILLO, A.; ANDREU, J.; O'DONNELL, T. (1989). *Groundwater management: quantity and quality*. Inter. Assoc. Scientific Hydrology, Publ. 188: 1-633.
- TIERNEY, J. (1990). Betting the planet. *The New York Times Magazine*, Dec. 2: 53-54, 76-81.
- TODD, D.K. (1976). *Groundwater Hydrology*. 2a Ed. Wiley & Sons: 1-535.
- VOLKER, A.; HENRY, J.C. (1988). *Side effects of water resources management*. Intern. Assoc. Scientific Hydrology. Publ. 172: 1-269.
- VRBA, J. (1991). *Mapping of groundwater vulnerability: working paper*. IAH Groundwater Protection Commission Meeting, Tampa, Fda. UNESCO-Intern. Hydrological Programme IV, Project M-1.2 (a).
- WCED (1987). *Our common future. World Commission on Environment and Development*. Oxford Univ. Press, Oxford, UK.
- WAEGENINGH, H.G. VAN (1981). A proposal for the dimensions of protection areas. Quality of Groundwater. *Studies in Environmental Science*, 17. Elsevier: 1107-1113.
- WALTON, W.C. (1970). *Groundwater resources evaluation*. McGraw-Hill: 1-664.
- YOUNG, R.A. (1970). Safe yield of aquifers: an economic reformulation. *J. Irrigation and Drainage Division*. Am. Soc. Civil Engineers, IR 4: 377-385.