

Las aguas subterráneas

Un recurso natural del subsuelo



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACION



Instituto Geológico
y Minero de España



Fundación
Marcelino Botín

Las aguas subterráneas

Un recurso natural del subsuelo

AUTORES

Juan Antonio López-Geta
Juan María Fornés Azcoiti
Gerardo Ramos González
Fermín Villarroya Gil

Instituto Geológico y Minero de España
2009

Las AGUAS subterráneas: un recurso natural del subsuelo / Juan Antonio López-Geta, Juan María Fornés Azcoiti, Gerardo Ramos González, Fermín Villarroya Gil, auts.- 4ª ed.- Madrid: Instituto Geológico y Minero de España, 2009.

90 pgs; ils; 21×25 cm.
ISBN 978-84-7840-806-1

1. Agua subterránea. 2. Ciclo agua. 3. Acuífero. 4. Recursos agua. 5. Gestión recursos agua. 6. Perspectiva. 7. España. 8. Mundo. I. Instituto Geológico y Minero de España, ed. II. López-Geta, J.A., aut. III. Fornés Azcoiti, J.M., aut. IV. Ramos González, G., aut. V. Villarroya Gil, F., aut.

556

La primera edición del libro fue realizada con la colaboración especial del Doctor José Javier Clúa (†), inestimable en sus aportaciones en cuanto a ideas, diseños y tratamiento de los textos aportados por los diferentes autores. Su saber científico y su conocimiento de la industria editorial fueron determinantes en la calidad de ese trabajo. Asimismo, los redactores queremos agradecer al Doctor Emilio Custodio, ex-Director General del Instituto Geológico y Minero de España, su continuada atención y dedicación a la primera edición de este libro. Las observaciones y correcciones hechas desde el punto de vista de su larga experiencia, fueron fundamentales para que el contenido tuviera la categoría perseguida.

Hacemos extensivo nuestro agradecimiento a los Doctores Ramón Llamas Madurga y Juan José Durán Valsero, por las revisiones y sugerencias que nos transmitieron en la primera edición. Y a todas aquellas personas que han cedido generosamente las diferentes fotografías que aparecen en el texto, especialmente a: Rafael Fernández Rubio, Antonio Martínez Sánchez de la Nieta, José Antonio Domínguez Sánchez, Carlos Torres Minondo, Juan José Rodes Martínez, Antonio Fernández Uría, Juan I. Rozas, Marc Martínez Parra, Vicente Fabregat Ventura, Carlos Mediavilla Laso, Diego Martín Sosa, así como a la Excma. Diputación Provincial de Alicante, al Ayuntamiento de Córdoba, a D. Rafael Nuche, de la Empresa Nacional de Residuos, S. A., a Aguas de Barcelona y a la NASA. Los dibujos que representan la parte subterránea de las figuras, han sido realizados por Gerardo Ramos González.

© INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA
Rios Rosas, 23 – 28003 Madrid
Teléfono: 91 349 57 00
Fax: 91 349 57 62
Web: www.igme.es

4º Edición 2009
ISBN: 978-84-7840-806-1
NIP0: 474-09-013-4
Depósito legal: M-42295-2009
Maquetación: Ibersaf Industrial, S. L.
Impresión y fotomecánica: Grupo Industrial de Artes Gráficas Ibersaf Industrial, S. L.



Pozo mía

*Debajo de su misma imagen brota,
y la porción nacida
impide el nacimiento en cada gota
de la que está enseguida
por venir a la boca de su vida.*

*La ausente actividad se hace reposo
copioso de frecuencia:
reclusa su inquietud en breve coso,
socorros con paciencia
de cuerda aguarda, coro de inocencia.*

*Por más que el cubo en su unidad ahonde
no merma ni acaba;
este dulzor proviene de algún donde
que no se menoscaba
y que está, sin estar, en donde estaba.*

*Permanentes frescuras manantiales
que en mi mano convoca
en sus hondos estados primordiales:
¡Nada más! agua y roca:
ni cielo ni mirada, ni luz ni boca.*

*Ningún tropiezo espumas le origina
ni voces le derrama...
¡Qué gracia circular! ¡Qué fría mina!
De agua sin río y brama,
sin corriente, sin márgenes, sin grama.*

*Rascacielos, oh pozo soterráneo,
subterránea manida;
aquí el árbol dejó, al amor del baño,
su vena empedernida, su vida/
desposada con su herida.*

*Miguel Hernández (1910-1942).
Poemario del Primitivo Silbo Vulnerado.*

Presentación

Esta nueva edición constituye la 4ª desde que se publicó la primera con motivo de la celebración, en el año 1999, del 150 aniversario del Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Entonces, el libro nació como fruto de la cooperación entre la Administración del Estado –a través del IGME, que en esas fechas dependía del Ministerio de Ciencia y Tecnología–, y la sociedad civil –representada en este caso por la Fundación Marcelino Botín–. Se distribuyeron 5.000 ejemplares, fundamentalmente entre colegios e institutos de enseñanza secundaria, tanto públicos como privados, de toda España. Posteriormente, el Ministerio de Educación y Ciencia manifestó su interés en la publicación y propició una segunda edición idéntica a la primera, tanto en contenidos como en la tirada de ejemplares, 5.000. Sus destinatarios fueron también los colegios e institutos de enseñanza secundaria del territorio nacional. Según Andras Szöllösi-Nagy, Director de la División de Ciencias del Agua de la UNESCO, “debido a la gran importancia que este libro está teniendo en la difusión del conocimiento sobre las aguas subterráneas, el Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO solicitó su traducción al inglés”, editándose en dicha lengua una 3ª edición de 2.500 ejemplares, en la que se modificó el índice del libro, se actualizaron algunos capítulos, y se incorporó uno nuevo sobre las aguas subterráneas en el mundo. Esta edición, que en palabras del Director de la División de Ciencias del Agua de la UNESCO “representa un espléndido ejemplo de material didáctico y educativo sobre las aguas subterráneas”, fue presentada en el IV Foro Mundial del Agua celebrado en México en marzo de 2006 .

La 4ª edición es el resultado de la gran demanda que está teniendo en los diferentes eventos relacionados con el agua. Se trata de una edición actualizada, ampliada y mejorada respecto a las anteriores. Claramente, la idea de componer un libro de estas características hace ahora unos

diez años, se ha revelado un completo éxito. Los Profesores Emilio Custodio, entonces Director General del IGME, y Ramón Llamas, Director del Proyecto Aguas Subterráneas de la Fundación Marcelino Botín, contribuyeron a la consecución de tal empresa. En su Presentación a la primera edición, el Profesor Emilio Custodio señalaba: “No es tarea fácil preparar un texto breve que reúna aspectos básicos y aplicados, y cuestiones candentes del momento, y que siendo riguroso sea al mismo tiempo asequible al no especialista interesado en el tema y a aquéllos que ejercen la importantísima función social de enseñar”. Por su parte, el Profesor Ramón Llamas apuntaba en la misma edición: “Para justificar la publicación de este pequeño libro, basta quizá mencionar que el aprovechamiento progresivo e intensivo de las aguas subterráneas, se ha producido en un corto periodo de tiempo (los últimos tres o cuatro decenios), y ha sido realizado esencialmente por cientos de miles de pequeños usuarios, en su mayor parte agricultores de mediana capacidad económica, y también por algunos miles de abastecimientos urbanos”.

Por último, como señala el Profesor José Pedro Calvo, actual Director General del IGME, en su Presentación a la edición en inglés, “el contenido de este libro podría ayudar a comprender mejor el comportamiento y características de las aguas subterráneas en los países en vías de desarrollo. Uno puede preguntarse si los problemas derivados de la escasez de agua en esos países es el resultado de una falta real del recurso, o quizá de una escasez tecnológica y/o deficiencia administrativa”.

Esperamos, por tanto, que esta publicación siga siendo referencia para conocer este recurso y una ayuda para lograr un mejor uso y gestión de ese tesoro escondido que son las aguas subterráneas.

Índice

	<u>Págs.</u>
Introducción	9
El ciclo hidrológico	11
¿Qué es el agua subterránea?	14
¿Qué es un acuífero?	17
Composición natural de las aguas subterráneas	23
¿Cómo se extraen las aguas subterráneas?	28
Gestión integrada de los recursos hídricos	34
Recarga artificial	37
Perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas	41
El agua subterránea en el mundo	44
Agua y vida	44
Desarrollo de las aguas subterráneas	46
Aguas subterráneas y alivio de la pobreza.....	49
Algunos ejemplos de utilización de las aguas subterráneas.....	53
Acuíferos compartidos	55

El agua subterránea en España	56
Acuíferos y masas de agua subterránea	56
Reservas y recursos de aguas subterráneas	57
Administración pública del agua.....	59
Registro y Catálogo de aprovechamientos de agua.....	60
Usos del agua subterránea	62
Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas.....	67
Valor económico del agua subterránea	68
Aspectos ambientales del agua subterránea	70
La sequía.....	76
Redes de observación de las aguas subterráneas	77
Principales afecciones a las aguas subterráneas.....	80
<i>Uso intensivo de las aguas subterráneas</i>	80
<i>Contaminación de acuíferos</i>	82
Perspectiva futura de las aguas subterráneas	91
Lecturas recomendadas	95
Información de interés	97



Introducción

No pocas civilizaciones primitivas se establecieron allí donde existían aguas subterráneas. De hecho, bastantes localidades incluyen en su toponimia palabras como *bir* en árabe, *well* en inglés, *pozo*, *fuelle*, *hontanar*, *fontanar*, en castellano, etc.

El hombre desde su presencia en la tierra ha utilizado las aguas subterráneas que brotan por los manantiales. Estas aguas que en un principio tenían un uso casi exclusivo para beber, con el transcurso de los siglos se extendió a otras actividades que el hombre iba

Algunas civilizaciones primitivas se establecieron allí donde existían aguas subterráneas

incorporando y que requerían de la disponibilidad de agua para su subsistencia; es el caso de la agricultura de regadío o la industria. Y así, en la actualidad en España, las aguas subterráneas abastecen a casi un 30% de la población (unos trece millones de personas), a los que hay que incluir parte de los cerca de 60 millones de turistas que con carácter estacional recibe España cada año. Quizá, un dato que puede servir de ejemplo para reflejar la importancia de las aguas subterráneas en nuestro país, lo proporciona el hecho de que en el 70% de los núcleos urbanos el abastecimiento de agua se surte de pozos, sondeos o manantiales.

El volumen de agua anual que se extrae de los acuíferos españoles se sitúa entre los 5.500 y 6.500 hm³, que representa entre el 17 y el 22% del agua total utilizada. De ellos, se dedican al regadío entre el 75 y el 80%, y el resto a usos urbanos e industriales. De los aproximadamente 3,6 millones de hectáreas de riego existentes en España, un tercio se riegan de manera predominante con aguas subterráneas. La eficacia en los regadíos con aguas superficiales puede situarse en torno al 45%, mientras que en aguas subterráneas puede alcanzar el 70%.

Para muchos, el origen de las aguas subterráneas es poco o mal conocido, y da lugar a mitos y malentendidos; y esto a pesar de que las aguas subterráneas son un recurso insustituible en buena parte del planeta, e imprescindible para la salud y para la buena marcha de la economía. No pocas personas añaden al simple carácter subterráneo de esas aguas un conjunto de propiedades propias del ocultismo; se les llega incluso a atribuir, en ocasiones, fabulosas propiedades curativas o de otro tipo. Un halo de misterio rodea a todo lo relativo a las aguas subterráneas hasta el extremo de que aún en nuestros días se sigue recurriendo, para el intento de alumbra-las, a las artes geománticas de los zahoríes*. Este es el lado oscurantista de lo que es en realidad la Hidrogeología, una Ciencia y

Introducción

Durante siglos, las aguas subterráneas se han utilizado para mejorar la actividad social y económica

una Técnica fundamentada en principios claros de la Física y de la Química, evaluable matemática y económicamente.

Estos fundamentos científicos, junto al desarrollo de la técnica de perforación y de extracción (invención de la bomba de turbina), sentaron las bases de la extraordinaria difusión que ha experimentado la Hidrogeología, fundamentalmente desde la segunda mitad del siglo XX.



Antigua forma de extracción de agua mediante noria movida por tracción animal

Grandes núcleos de población como México D.F., Lima, Dakar o Yakarta, entre otros, son abastecidos con aguas subterráneas. Y países como Dinamarca, Holanda, Hungría, Italia, Barbados, Malta y Costa Rica, dependen casi exclusivamente de las aguas subterráneas para atender sus demandas. En los Estados Unidos de América, la mitad del agua suministrada para uso urbano es subterránea; al igual que en Francia y Gran Bretaña donde más de una tercera parte procede de los acuíferos.

Un caso que se repite con frecuencia es la relación del agua con el origen del nombre de las ciudades. Así, Madrid responde a la voz árabe *mayrit*, que a su vez parece proceder del latín, *matrix aquae* (madre del agua), y que se aplicaba a lo que hoy se conoce como *viajes de agua*: galerías que captaban y conducían las aguas subterráneas hasta las fuentes públicas. Posiblemente, sin esta riqueza en aguas subterráneas, Felipe II no hubiera trasladado la capital del reino a Madrid.

ZAHORÍ: persona que dice tener poderes para buscar agua subterránea utilizando una horquilla de madera o un péndulo, con lo que pone de manifiesto supuestos efluvios originados por la circulación de las aguas subterráneas. Sin embargo, no existe fundamento científico alguno que avale esta percepción.

El ciclo hidrológico

El *ciclo hidrológico* supone el constante movimiento del agua, tanto en la superficie de la Tierra, como por encima y debajo de la misma. Su correcto conocimiento es fundamental para una adecuada utilización y gestión del recurso hídrico.

El agua de los océanos, mares, lagos, ríos y embalses se evapora, con mayor intensidad cuanto mayor es la temperatura y más seco el ambiente. La vegetación también contribuye a su evaporación por transpiración. El agua en forma de vapor pasa a la atmósfera, cargando el aire de humedad. El vapor de agua, con el frío, puede condensarse en minúsculas partículas que dan lugar a las nubes y la niebla. El agua retornará a la superficie del terreno y a los océanos en forma de precipitación (lluvia, nieve o granizo, rocío o escarcha). Hay que tener en cuenta que no toda la precipitación alcanza la superficie del terreno, pues parte se evapora en su caída y parte es interceptada por la vegetación o por las superficies de edificios, carreteras, etc., y devuelta a la atmósfera al poco tiempo en forma de vapor de agua.

Del agua líquida que alcanza la superficie del terreno, una parte queda retenida en charcas o pequeños surcos, y en su mayoría vuelve a la atmósfera. Otra parte circula sobre la superficie (escorrentía superficial directa* y subsuperficial o hipodérmica*) y se concentra en

pequeños regatos que luego se reúnen en arroyos y más tarde desembocan en los ríos. Al mismo tiempo parte de la precipitación se infiltra en el terreno, dependiendo del tipo y humedad del suelo y de la intensidad y duración de la precipitación. El agua infiltrada* primeramente empapa el suelo y después percola* lentamente a través de la zona no saturada* dando lugar a la recarga* de la zona saturada* (escorrentía subterránea*). Cuando la intensidad de la precipitación excede a la capacidad de infiltración de un suelo se produce escorrentía superficial. Ésta y la escorrentía subterránea constituyen la escorrentía total*, que va a confluír a los ríos para terminar en lagos o en el mar.

Zona favorable a la evaporación. Laguna de Cañada del Hoyo, Cuenca



El ciclo hidrológico



Esquema que representa las diferentes fases del ciclo hidrológico: evaporación del agua de mar, transporte como nubes, precipitación (niebla, lluvia o nieve), escorrentía por ríos y arroyos, recarga de acuíferos, evapotranspiración, salidas al mar y de nuevo inicio del ciclo

ESCORRENTÍA SUPERFICIAL DIRECTA: parte del agua de lluvia que circula por la superficie del terreno, y confluye a los ríos, arroyos y otras masas de agua.

ESCORRENTÍA SUBSUPERFICIAL O HIPODÉRMICA: parte de la precipitación que se infiltra, circula por la parte superior del terreno sin llegar a la zona saturada y reaparece en superficie, incorporándose a la escorrentía superficial directa.

ESCORRENTÍA SUBTERRÁNEA: parte del agua infiltrada que recarga la zona saturada y circula por los acuíferos.

ESCORRENTÍA TOTAL: fracción de la precipitación caída en una cuenca vertiente que escapa a la evapotranspiración y circula superficial y subterráneamente.

INFILTRACIÓN: cantidad de agua precipitada que atraviesa la superficie del terreno y pasa a ocupar, total o parcialmente, los poros, fisuras y oquedades del suelo.

PERCOLACIÓN: movimiento del agua u otro líquido a través de los intersticios del terreno. Se suele aplicar al flujo vertical a través del medio no saturado.

RECARGA: parte del agua infiltrada que alcanza la zona saturada.

ZONA NO SATURADA: terreno comprendido entre la superficie del suelo y la zona saturada. En ella los poros están ocupados por aire y agua.

ZONA SATURADA: franja del terreno situada por debajo de cierta profundidad donde el agua ocupa la totalidad de los huecos.

HECTÓMETRO CÚBICO (hm³): equivale a un millón de metros cúbicos o a mil millones de litros.



Este esquema representa cómo es afectado el ciclo hidrológico por la intervención del hombre: contaminación atmosférica, contaminación y disminución de los caudales circulantes por los ríos, descenso de los niveles piezométricos y avance de agua de mar en los acuíferos (flecha roja)

ESTIMACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN LA HIDROSFERA¹

	Volumen ($\text{hm}^3 \times 10^6$)	% del agua total del planeta	% respecto del total de agua dulce	Tiempo medio de residencia
Océanos y mares	1.338.000	97,5	—	2.500 años
Glaciares y casquetes polares	24.064	1,74	68,7	9.700 años
Aguas subterráneas dulces	10.530	0,76	30,1	decenas a miles de años
Lagos de agua dulce	91,0	0,007	0,26	17 años
Lagos de agua salada	85,4	0,006	—	150 años
Ríos	2,12	0,0002	0,006	15-20 días
Biomasa	1,12	0,0001	0,003	algunas horas
Atmósfera	12,9	0,001	0,04	8-10 días

¹ Shiklomanov, Igor A. (1997). "Comprehensive assessment of the freshwater resources of the World". World Meteorological Organization, 88 pp.

¿Qué es el agua subterránea?

Es el agua existente bajo la superficie del terreno. En concreto, es aquella situada bajo el nivel freático y que está saturando completamente los poros y fisuras del terreno. Este agua fluye a la superficie de forma natural a través de manantiales, áreas de rezume, cauces fluviales, o bien directamente al mar. Puede también dirigirse artificialmente a pozos, galerías y otros tipos de captaciones. Se renueva de modo constante por la Naturaleza, merced a la recarga. Esta recarga procede principalmente de las precipitaciones, pero también puede producirse a partir de escorrentía superficial y cursos

superficiales de agua (sobre todo en climas áridos), de acuíferos próximos o de retornos de ciertos usos (destacan los retornos de los regadíos).

El agua subterránea se desplaza muy lentamente por los acuíferos. Su velocidad media normal puede variar entre unos pocos decímetros, a algunos centenares de metros al cabo del año; sólo en el caso de acuíferos kársticos* y rocas muy fracturadas, pueden existir conductos preferentes, por los que el agua puede circular a velocidad



NIVEL FREÁTICO: conforma el límite superior de la zona saturada en un acuífero libre. Es el lugar geométrico de los puntos de un acuífero libre que se encuentran a la presión atmosférica. Su altura en un acuífero libre viene determinada por la cota que alcanza el agua en un pozo poco penetrante en reposo.

En la imagen se observan las áreas de recarga y descarga, así como las líneas de flujo y tiempo de desplazamiento del agua en un acuífero desde que alcanza la zona saturada hasta su salida a la superficie según diferentes trayectorias. Los tiempos son meramente indicativos



Surgencia natural de aguas subterráneas en un macizo kárstico

des similares a la de las corrientes superficiales. Así, una gota de agua que cayera en una divisoria hidrográfica situada a 200 km de la costa y se incorporara a la corriente de un río, tardaría pocos días en alcanzar el mar; sin embargo, si esa misma gota se desplazara a través del subsuelo (en un acuífero detrítico), tardaría siglos e incluso miles de años en llegar al mar.

La lentitud de movimiento del agua a través de la zona no saturada y saturada, ayuda tanto a la gestión como al aprovechamiento de las aguas subterráneas y a su protección. En

El agua subterránea se desplaza muy lentamente por los acuíferos detríticos; su velocidad media normal puede ser de escasos metros a varios centenares de metros al cabo del año. En acuíferos kársticos puede alcanzar velocidades similares a la de las corrientes superficiales

este último caso, esa peculiaridad permite actuar antes de que un posible contaminante se extienda por todo el acuífero.

Un porcentaje muy significativo de lo que se llaman aguas superficiales tiene su origen en las aguas subterráneas. Éstas proceden de la recarga de las aguas de lluvia que, tras un cierto recorrido por los acuíferos, terminan en los ríos o en la superficie del terreno mediante zonas de rezume, manantiales y descargas difusas.

KARST: término morfológico que proviene de una región de Eslovenia, donde se describió por primera vez. Se refiere a paisajes, ambientes y procesos desarrollados por una serie compleja de fenómenos físico-químicos, pero en los cuales siempre está presente el de disolución de la roca por el agua. Estos fenómenos son frecuentes en varios tipos de rocas, como yesos, calizas, dolomías, rocas detríticas consolidadas con clastos* o cemento soluble. Sin embargo, son las rocas carbonáticas las que establecen el modelo de referencia, tanto por la complejidad del proceso, como por la gama de formas desarrolladas y que, por tanto, definen el paisaje kárstico en el sentido más estricto. En un proceso de karstificación hay una continua interferencia entre las aguas superficiales y las subterráneas. El proceso de karstificación se desarrolla mediante la acción selectiva a favor de los planos de debilidad de la roca, fracturas y superficies de estratificación. Se originan así un conjunto de formas exo y endokársticas, entre las que destacan las simas y cuevas, que condicionan la circulación subterránea del agua.

CLASTO: fragmento de una roca, mineral o fósil. Puede estar suelto o incluido en una roca formando parte constitutiva de la misma. Estos fragmentos se clasifican, en función de su tamaño de mayor a menor, en: bloques, cantos, arenas, limos y arcillas.

¿Qué es el agua subterránea?

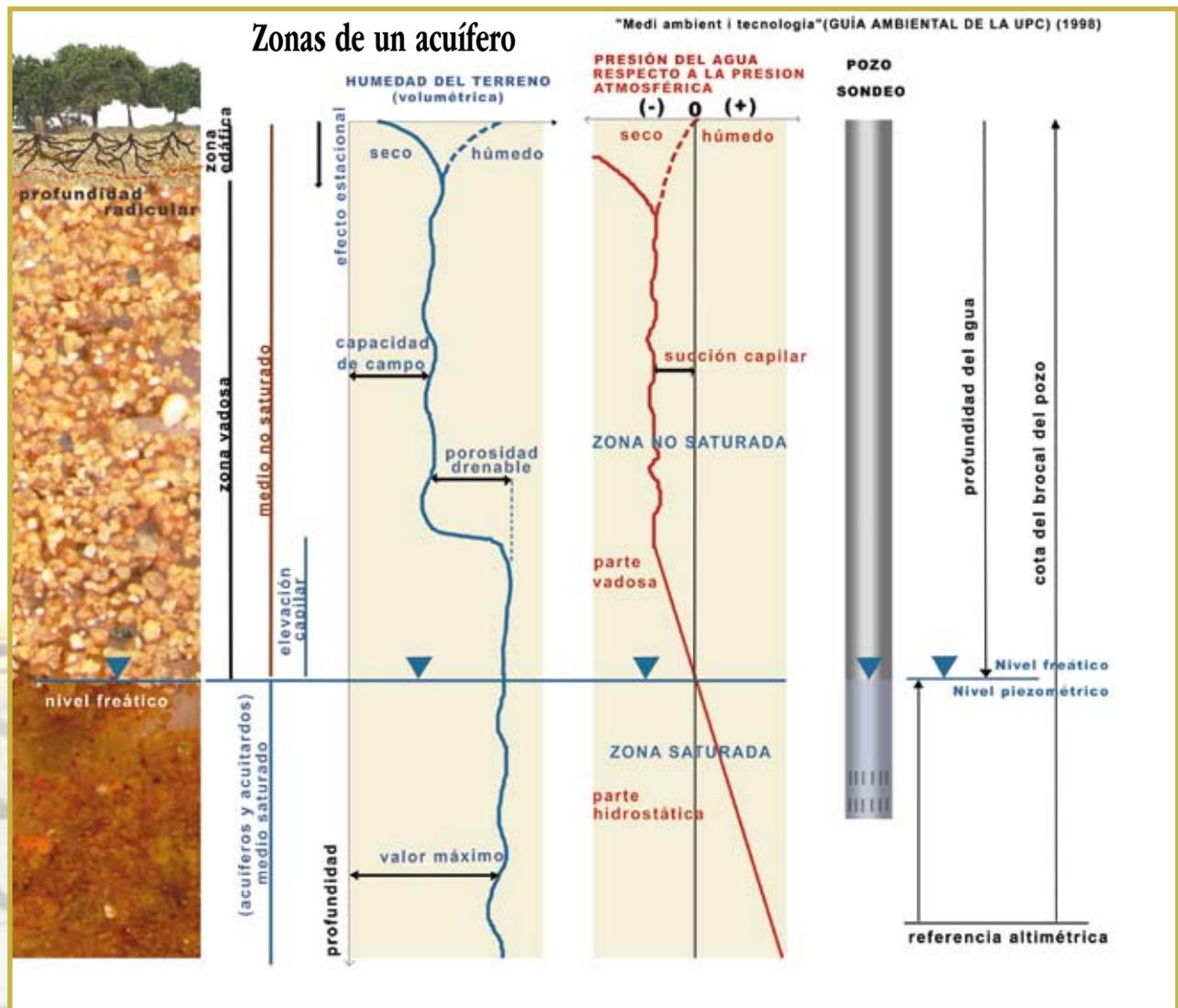
Zona no saturada (ZNS): en ella los poros contienen aire y agua. El agua está sujeta a tensiones capilares que la mantienen adherida al terreno, y esto hace que su presión efectiva sea inferior a la presión atmosférica.

La ZNS puede dividirse en tres partes: a) la subzona del suelo (o edáfica), que abarca desde la superficie del terreno hasta la profundidad alcanzada por las raíces. Está atravesada por raíces, por huecos dejados por raíces desaparecidas, y por pistas y canalículos abiertos por la fauna rápida (ratones, topos...) o lenta (anélidos y similares); en ella, la humedad del suelo varía mucho con los cambios estacionales de la vegetación; b) la subzona intermedia, que varía en espesor notablemente de un acuífero a otro (de centímetros a decenas de metros), o incluso puede no existir; en ella la humedad del suelo apenas cambia estacionalmente; c) la franja capilar, que se caracteriza por la existencia de poros, canalículos y fisuras llenas de agua que se mantienen por encima del nivel freático a causa de las tensiones capilares; la elevación es mayor cuanto más finos son los granos y fisuras.

Zona saturada (ZS): en ella los poros están completamente rellenos de agua. Aquí la presión

del agua es superior a la de la atmósfera y crece hidrostáticamente al aumentar la profundidad. El agua de esta zona se mueve de forma natural

hacia ríos, lagos, mar, manantiales, etc. y de forma provocada hacia las captaciones subterráneas especialmente por bombeos, drenajes o galerías.



¿Qué es un acuífero?

La Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, define *acuífero* como “una o más capas subterráneas de roca o de otros estratos geológicos, que tienen la suficiente porosidad* y permeabilidad* para permitir ya sea un flujo significativo de aguas subterráneas, o la extracción de cantidades significativas de aguas subterráneas”. Esta misma Directiva define como *masa de agua subterránea* “un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos”.

Un acuífero presenta dimensiones muy variadas, desde pocas hectáreas* de superficie a miles de kilómetros cuadrados; y desde escasos metros de espesor a cientos o miles de metros.

Las formaciones geológicas, cuando transmiten el agua muy lentamente y es difícil extraerla mediante captaciones en cantidades importantes, reciben el nombre de *acuitardo*. Sin embargo, pueden intercambiar importantes cantidades de agua con aquellos acuíferos con los que están en contacto horizontal, ya que la superficie de intercambio es muy grande.

Para definir aquellas formaciones geológicas que conteniendo agua en su interior no la transmiten y, por tanto, no permiten extraerla, se utiliza el término *acuicludo*; y *acuífugo*, cuando no contienen agua. En la práctica, no existen formaciones geológicas que puedan considerarse como acuífugos en sentido estricto.

Los acuíferos se pueden clasificar:

A) En función de la presión hidrostática* del agua contenida en ellos:

- **Acuíferos libres, no confinados o freáticos:** se definen como aquéllos en los que el límite superior de la masa de agua forma una superficie real que está en contacto con el aire de la zona no saturada y, por lo tanto, a presión atmosférica. Cuando se perfora un pozo desde la superficie del terreno, el agua aparece en el pozo cuando se corta o alcanza el nivel freático (del griego *phreatos* = pozo), y se mantiene a esa profundidad. La recarga de este tipo de acuíferos se realiza principalmente por infiltración de la precipitación a través del suelo, o por infiltración de agua de ríos o lagos.

¿Qué es un acuífero?

- **Acuíferos confinados, cautivos o a presión:**

son aquéllos que en su límite superior o techo*, el agua está a una presión superior a la atmosférica. Se comportan así los materiales permeables que están cubiertos por una capa confinante mucho menos permeable (por ejemplo, una capa arenosa bajo otra arcillosa). Durante la perforación de los pozos en acuíferos de este tipo, al atravesar el techo de los mismos se observa un ascenso rápido del nivel del agua hasta estabilizarse en una determinada posición. A este fenómeno se le solía llamar *artesianismo*, aunque el vocablo va cayendo en desuso. El pozo será surgente cuando el nivel piezométrico* esté situado a cota superior a la de la boca del pozo.

La recarga de un acuífero confinado procede principalmente de la lluvia que se infiltra directamente a través de la zona en la que aflora la formación acuífera, es decir, donde el acuífero se comporta como libre, o bien donde se puede considerar como semiconfinado y las condiciones sean favorables.

- **Acuíferos semiconfinados o semicautivos:** pueden considerarse como un caso particular de los acuíferos cautivos, en los que el muro*, el techo o ambos, no son totalmente impermeables sino que permiten la circulación vertical del agua. Este paso vertical de agua puede hacerse desde



Tipos de acuíferos según su comportamiento

o hacia el acuitardo, e incluso variar con el tiempo, según sean los valores relativos de los niveles piezométricos.

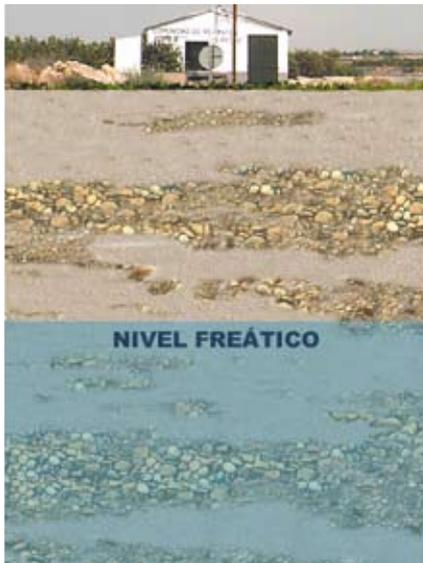
B) En función del tipo de materiales que constituyen el acuífero:

- **Depósitos no consolidados de materiales sueltos:** son formaciones geológicas constituidas por la acumulación de partículas transportadas por la gravedad, viento o hielo; en ambiente lacustre o marino. Suelen ser arenas y gravas de distinto origen geológico: fluvial, como los que forman los materiales aluviales de los ríos o las terrazas de los mismos; deltaico, si se trata de depósitos acumulados en la desembocadura de los ríos. Por lo general son de edades geológicamente recientes. Debido a sus buenas condiciones,

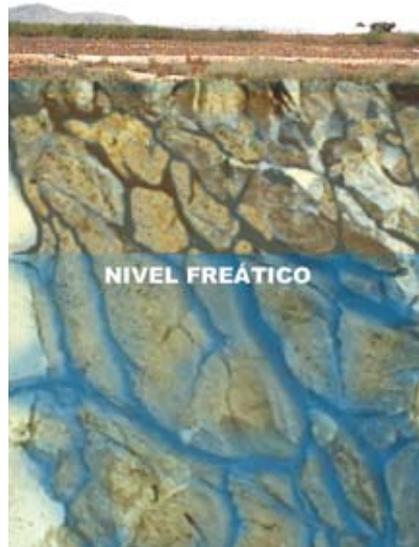
suministran notables caudales si se explotan convenientemente; son los casos, entre otros, del acuífero terciario detrítico de Madrid o de la zona de marismas del acuífero Almonte-Marismas (Huelva y Sevilla), en el que se ubica el Parque Nacional de Doñana.

• **Rocas sedimentarias consolidadas:** se trata de sedimentos que se han consolidado debido a procesos de compactación o diagénesis. Se pueden clasificar según su origen en: detrítico (conglomerados, areniscas, arcillas), químico (calizas, dolomías, margas), y orgánico (carbones e hidrocarburos naturales). Las más importantes son las calizas y dolomías. Varían mucho en densidad, porosidad y permeabilidad, según haya sido el ambiente sedimentario existente en su formación y el

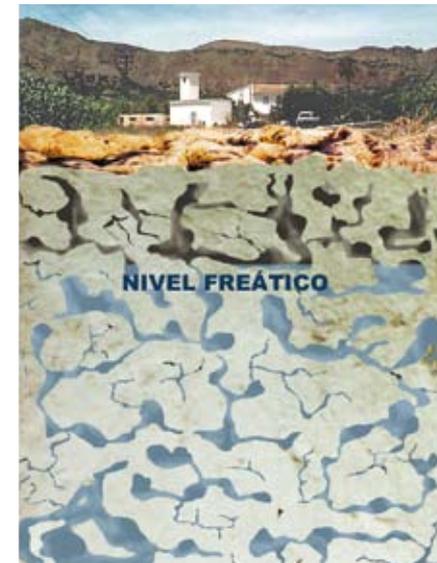
desarrollo posterior de zonas permeables producidas por disolución del carbonato, sobre todo en las calizas. Hay que tener en cuenta que si estas rocas no están karstificadas, son poco permeables. En España existen muchos acuíferos de este tipo, siendo algunos de los más conocidos el acuífero del Campo de Montiel (donde se ubican las Lagunas de Ruidera), el acuífero de La Mancha Occidental (donde se encuentran las Tablas de Daimiel), o el acuífero carbonatado de la Sierra de Cazorla, al igual que gran parte de los acuíferos del área Mediterránea Peninsular y de las Islas Baleares; todos ellos formados por calizas karstificadas y dolomías. Las areniscas (arenas consolidadas) y calcarenitas (areniscas de granos carbonáticos) suelen constituir también importantes acuíferos, como es el caso de las calca-



Acuífero detrítico



Acuífero fisurado



Acuífero kárstico

¿Qué es un acuífero?

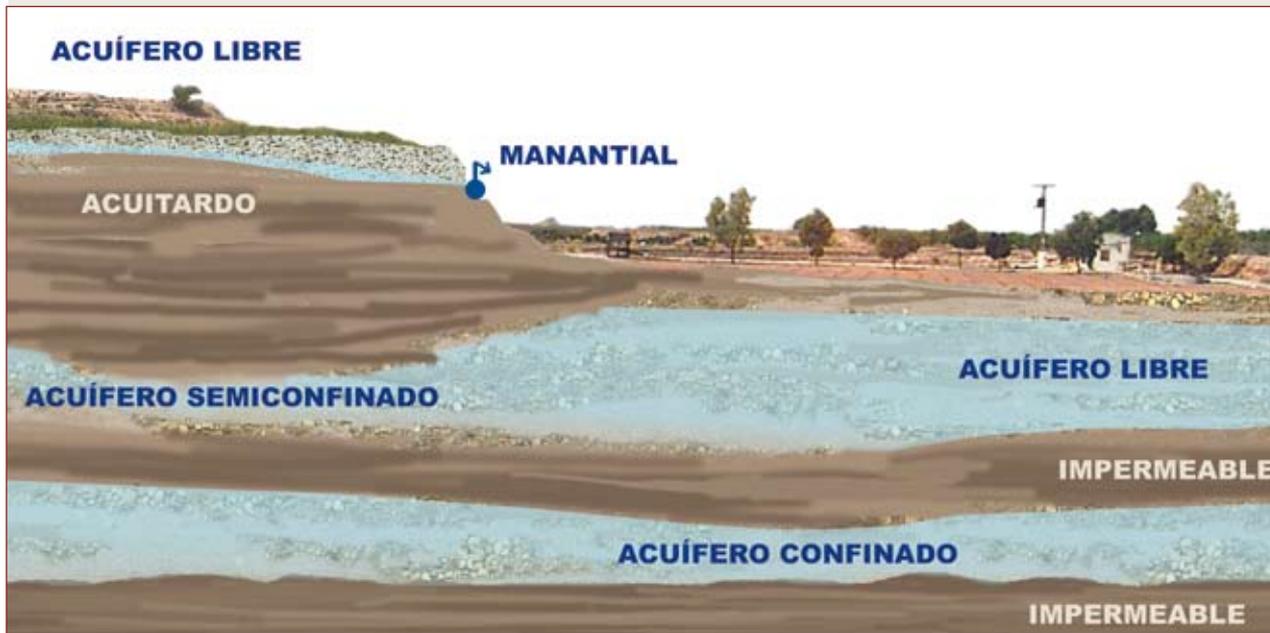
renitas que afloran en el entorno del pueblo sevillano de Carmona (Sevilla) o las areniscas cretácicas conocidas como *facies Utrillas*. Las rocas sedimentarias consolidadas contienen del orden del 75% de las aguas subterráneas continentales españolas.

- **Rocas ígneas y metamórficas:** las rocas ígneas se forman a partir del enfriamiento y consolidación de un magma. Pueden ser extrusivas (volcánicas) o intrusivas (plutónicas) según se consoliden en la superficie o en el interior de la corteza terrestre respectivamente (vg: granitos, gabros, etc.).

Las rocas metamórficas son las que han experimentado profundas transformaciones físicas y químicas, dando lugar a cambios en la propia estructura de la roca, ajustándose a las nuevas

condiciones de presión, temperatura y posibles aportes químicos (vg: pizarras, esquistos, etc.). Las posibilidades de formar acuíferos en estas rocas quedan reducidas a la zona alterada superficial o a las fracturadas por fallas y diaclasas*, que permiten una apreciable circulación de agua. Este tipo de acuíferos es frecuente en el NO de la Península Ibérica y en el Sistema Central. Tienen notable importancia para abastecimiento a pequeños núcleos de población y ámbito rural.

En las **rocas volcánicas**, es difícil definir su comportamiento hidrogeológico ya que pueden constituir o no importantes acuíferos; su comportamiento está entre las rocas consolidadas porosas y las fracturadas. Los niveles de escorias, piroclastos y grietas de retracción juegan un gran papel. Los factores principales que van a condicionar el flujo del agua subterránea son la composición, edad y, sobre todo, el grado de alteración. Estos acuíferos cubren prácticamente todo el territorio de las Islas Canarias.



Tipos de acuíferos en función de la presión hidrostática del agua contenida en ellos

Cuando existen lentejones o capas discontinuas de baja permeabilidad en la zona no saturada, en algunos casos se pueden llegar a formar *acuíferos colgados*. Estas capas retienen parte de la recarga durante un periodo más o menos largo, y dan origen a

zonas saturadas relativamente extensas *colgadas* sobre la zona saturada regional. El agua subterránea de estos acuíferos colgados descarga tanto hacia la zona saturada regional infrayacente, como da lugar a pequeños manantiales o zonas de rezume.

El movimiento del agua subterránea en las formaciones geológicas se basa en dos leyes físicas relativamente sencillas: Ley de Darcy* y Ley de Conservación de Masa. En las ecuaciones correspondientes intervienen sobre todo tres magnitudes que son: la permeabilidad* o conductividad hidráulica, la porosidad* y el coeficiente de almacenamiento*.

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO: agua que puede ser liberada por un prisma vertical del acuífero de sección igual a la unidad y altura equivalente al espesor saturado del mismo cuando se produce un descenso unidad del nivel piezométrico. Es un valor adimensional. En acuíferos libres su valor coincide con la porosidad drenable. En acuíferos cautivos está ligado a la compresibilidad del agua y del medio acuífero, y su valor suele oscilar entre 10^{-5} y 10^{-3} .

DIACLASA: fractura en una roca sin desplazamiento relativo de cada uno de sus lados.

GRADIENTE HIDRÁULICO: variación del nivel piezométrico por unidad de recorrido en el sentido del flujo del agua subterránea.

HECTÁREA: unidad de superficie utilizada en agronomía que equivale a 10 000 m².

LEY DE DARCY: expresa la proporcionalidad entre el caudal específico (q) de un líquido que circula a través de un medio poroso y el gradiente hidráulico (i)*

$q = -k \cdot i$. Sólo es válida cuando el flujo es laminar. El caudal específico (q) es el caudal por unidad de sección del medio. El coeficiente de proporcionalidad k se llama permeabilidad o conductividad hidráulica.

NIVEL PIEZOMÉTRICO: altura de la columna de agua que equilibra la presión del agua del acuífero en un punto determinado. Está referida a una altitud determinada. Representa la energía por unidad de peso de agua.

PERMEABILIDAD: también denominada conductividad hidráulica, es la medida de la facilidad con que un acuífero transmite agua. Las magnitudes que determinan la permeabilidad pueden ser intrínsecas o extrínsecas.

Las primeras son las propias del acuífero y dependen del tamaño de los poros (en igualdad de condiciones siempre tendrá mayor permeabilidad el medio cuyas partículas son de mayor dimensión). Las magnitudes extrínsecas son las que dependen del fluido, principalmente su viscosidad y su peso específico; los valores de ambas magnitudes dependen de la temperatura. La permeabilidad puede ser primaria o secundaria, según sea producida en el momento de la formación del medio sólido, o después de ella, causada por fracturas, meteorización de la roca o suelo, o disolución de las rocas. El producto de la permeabilidad horizontal por el espesor saturado del acuífero define la **transmisividad**.

¿Qué es un acuífero?

POROSIDAD: determina la capacidad de almacenar agua de un acuífero. Se define como el cociente entre el volumen de huecos (ocupados por aire o agua) y el volumen total de la roca. Existe una porosidad primaria, generada durante la formación de la roca, y una porosidad secundaria, producida con posterioridad a la formación de ésta (fracturas, meteorización, aberturas de disolución o grietas debidas a plantas y animales). La porosidad prima-

ria está controlada por la forma, grado de selección y empaquetamiento de los clastos, mientras que la porosidad secundaria va a depender de la distribución y número de fracturas abiertas y del grado de alteración. La *porosidad drenable* (también llamada *porosidad eficaz*) considera sólo la cantidad de agua que una roca o suelo saturado puede liberar por efecto de la gravedad. La diferencia entre porosidad total y drenable es la retención espe-

cífica de agua, que en agronomía se designa como capacidad de campo.

PRESIÓN HIDROSTÁTICA: presión ejercida por una columna de agua en reposo.

TECHO Y MURO DE UNA FORMACIÓN O ESTRUCTURA GEOLÓGICA: se denominan *techo* y *muro* respectivamente, a la superficie superior e inferior de una serie estratigráfica, capa o filón.



A la izquierda, panorámica general del acuífero de Almonte-Marismas en la zona del Asperillo (Mazagón-Matalascañas) donde se puede observar el frente de drenaje que se extiende a lo largo del acantilado. A la derecha detalle de la zona marcada en la panorámica de la izquierda, en la que se puede apreciar el frente de drenaje con proliferación de helechos

Composición natural de las aguas subterráneas

El agua constituye el disolvente más universal. Por tanto, es capaz de incorporar gran cantidad de sustancias al estar en contacto con los terrenos por los cuales circula. Las aguas subterráneas tienen mayor oportunidad de disolver materiales que las aguas superficiales debido a su prolongado contacto con las formaciones geológicas a través de las cuales se desplaza, a la presencia de dióxido de carbono (CO_2) y oxígeno (O_2) disueltos en el agua, y a la lenta velocidad con que se mueven. Por este motivo, en términos generales el agua subterránea suele presentar una concentración iónica mayor que la de escorrentía superficial del mismo origen.

La composición química natural de las aguas subterráneas es el resultado de los siguientes procesos: a) la evapo-concentración de las sales atmosféricas aportadas como aerosol* marino, polvo y sales disueltas en el agua de lluvia; b) la interacción del agua con los minerales del suelo, ya sea hidrolizándolos o por cambio en el estado de oxidación-reducción; c) la incorporación de aguas salinas residuales (relictas) que aún no han sido lavadas.

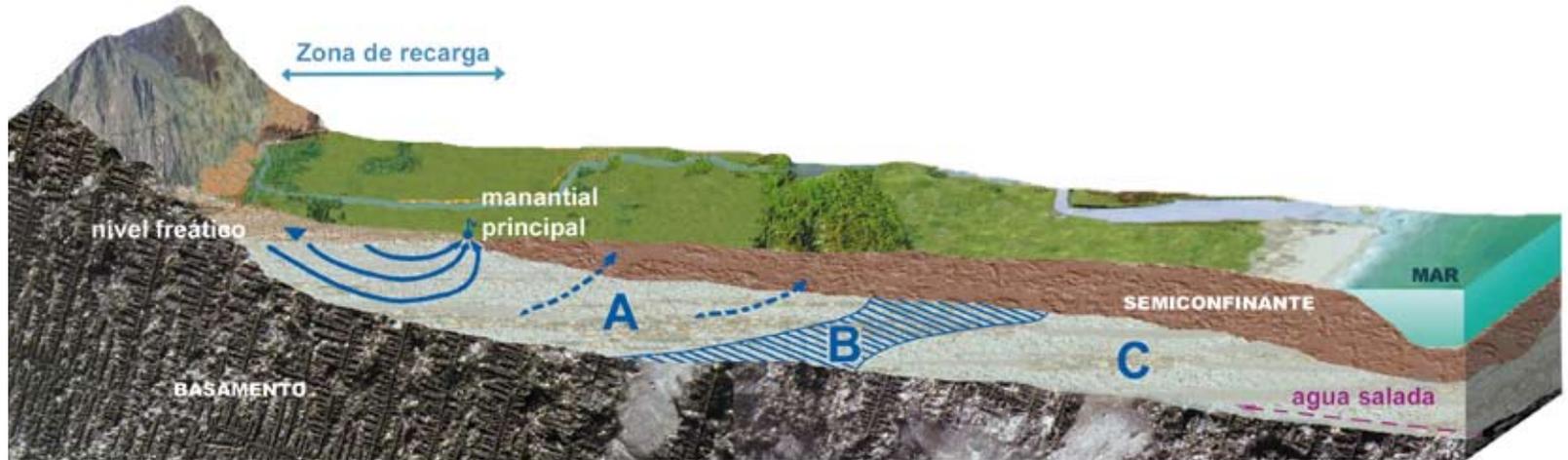
La composición natural de las aguas subterráneas puede verse modificada por causas naturales o por factores antrópicos*. Entre

las primeras figuran el clima, la temperatura, el tipo de terreno a través del cual se desplaza el agua subterránea, el tiempo de residencia del agua en el acuífero, y el aporte de gases reactivos, principalmente CO_2 y O_2 .

Respecto a los factores antrópicos, la actividad humana puede afectar —a veces con cierta intensidad— a la composición química del agua que se infiltra y a la recarga, modificando la temperatura, introduciendo solutos (sales, nitratos, etc.) y sustancias diversas (hidrocarburos, plaguicidas, disolventes halogenados, etc.), tanto en el terreno como en el agua. Su presencia puede suponer una degradación importante de las características naturales.

Además, hay que sumar procesos modificadores como son la precipitación química, el intercambio iónico (principalmente catiónico) y las reacciones de reducción-oxidación. Estos procesos pueden ser intensos cuando el agua se ve desplazada por otra de composición química diferente (buenos ejemplos se encuentran en los acuíferos costeros, en la zona de mezcla entre el agua dulce continental y el agua salada marina), o cuando el terreno contiene materia orgánica.

Composición natural de las aguas subterráneas



Ejemplo de evolución de la composición natural del agua subterránea en el interior de un acuífero: el agua de recarga con CO_2 de origen edáfico (del suelo) disuelve la roca carbonatada, lo que le confiere una dureza y facies bicarbonatada cálcica; en esta primera etapa el agua aún mantiene suficiente oxígeno disuelto para oxidar la materia orgánica del medio y metales en estado reducido —vg. Fe^{2+} — que encuentra a su paso. La mayor parte del agua descarga por el manantial principal y una pequeña cantidad lo hace por la zona cautiva a través del techo semiconfinante (A). En el caso que se muestra, no existe potencial suficiente para la descarga submarina y buena parte del acuífero cautivo contiene agua marina casi inmóvil, que aguas arriba pasa al agua dulce continental a través de una amplia zona de mezcla de salinidad variable (B). En A se puede haber consumido el O_2 disponible y la presencia de materia orgánica puede llevar a la reducción de sulfatos con producción de sulfuros (SH^- y SH_2) y/o la reducción del Fe^{3+} del medio a ión Fe^{2+} soluble, con disposiciones a veces complicadas, aumento de alcalinidad y posible precipitación de sulfuros metálicos. Si se trata de terrenos con agua salada previa, se produce intercambio catiónico que reduce la dureza y hace que el agua evolucione hacia bicarbonatada sódica. En B se produce una mezcla de agua dulce y salina, presumiblemente con carácter reductor e intercambios catiónicos que dependen de si la salinidad ha ido creciendo (endurecimiento y precipitación de carbonatos) o disminuyendo (ablandamiento, aumento de Na^+ y posible disolución de carbonatos). En C el agua es de composición próxima a la marina aunque de muy lenta renovación (vieja) y presumiblemente reductora (ausencia de SO_4^{2-} , presencia de SH^- y SH_2 , quizá CH_4 y Fe^{2+} y a veces NH_4^+)

AEROSOL: suspensión de partículas de tamaño muy fino, sólidas o líquidas, en un gas, normalmente aire.

ANTRÓPICO: procesos, acciones, materiales y formas resultantes de la actividad humana. En este sentido se considera al hombre como un agente geológico más, con capacidad de generar fenómenos que modifican la configuración de la geosfera. Todas las actividades de extracción de recursos, su comercialización y uso, las obras de ingeniería civil y la agricultura pueden considerarse como acciones paralelas a las de erosión, transporte y sedimentación, con la consiguiente transformación del paisaje y sus componentes geológicos.

La mayoría de las sustancias disueltas en el agua subterránea se encuentran en estado iónico. Algunos iones están presentes casi siempre y su suma representa casi la totalidad de los iones disueltos. Estos *iones mayoritarios* son los cationes: calcio, magnesio, sodio y potasio; y los aniones: bicarbonato, sulfato y cloruro. Es frecuente que el anión nitrato se considere dentro del grupo de iones mayoritarios, aun cuando su concentración es pequeña si los efectos antrópicos son poco importantes. La presencia del ión carbonato está condicionada a un pH > 8,3*, lo cual es poco frecuente. A pH bajo, una parte importante del carbono inorgánico disuelto está como ácido carbónico (CO₃H₂) ó CO₂ disuelto. Además, las aguas subterráneas suelen contener cantidades apreciables de ácido silícico no disociado, que se suele expresar como sílice disuelta.

El resto de iones y sustancias disueltas se encuentran por lo general en cantidades notablemente más pequeñas que las de los iones mayoritarios. Se llaman *iones menores* a aquellos que habitualmente no superan el 1% del contenido iónico total (concentraciones entre 0,0001 y 10 mg/L), y elementos traza a aquellos que, estando presentes, lo están en cantidades difícilmente medibles por medios analíticos usuales (concentraciones inferiores a 0,0001 mg/L).

Las especies químicas disueltas en las aguas subterráneas van a estar condicionadas, entre otros factores, por el pH, la temperatura y el oxígeno disuelto del agua subterránea. El pH suele variar entre 6,5 y 8. La temperatura del agua subterránea en la zona superior del acuífero es muy poco variable y responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar. Normalmente la temperatura aumenta 1°C por cada 33 m de profundidad. Respecto al oxígeno disuelto, la mayoría de las aguas subterráneas tienen entre 0 y 5 mg/L.

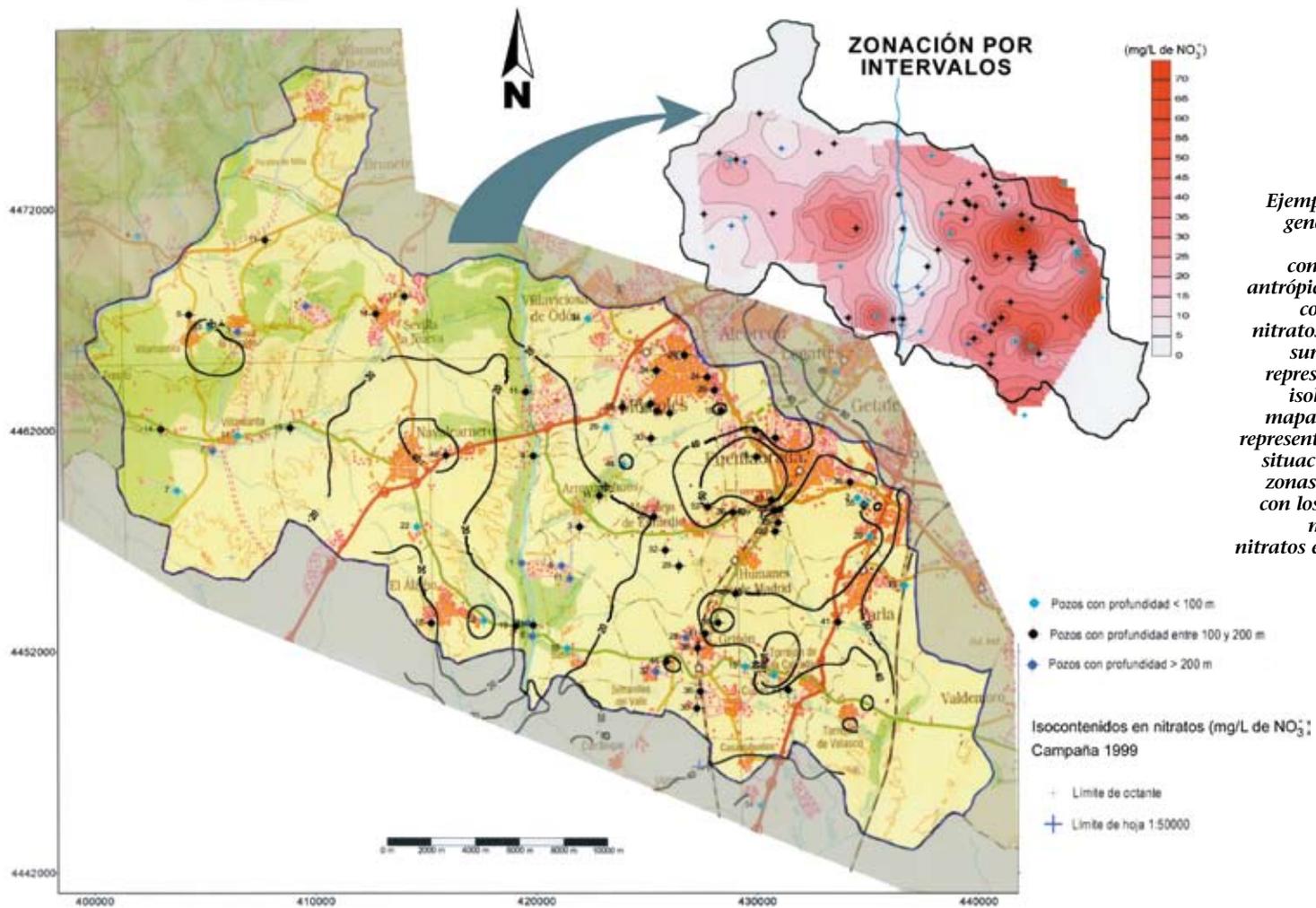
Las aguas superficiales y subterráneas, en función de la concentración de sustancias disueltas pueden ser clasificadas como dulces (contienen como máximo 1.000 - 2.000 mg/L de sustancias disueltas), salobres (hasta 5.000 mg/L), saladas (hasta 40.000 mg/L), o constituir auténticas salmueras (más de 40.000 mg/L, hasta la saturación alrededor de 350.000 mg/L).

La actividad humana puede afectar —a veces intensamente o con cierta gravedad— a la composición química del agua que se recarga a los acuíferos, modificando la temperatura e introduciendo solutos que pueden producir una degradación de las características naturales de las aguas subterráneas y de los terrenos.

MATERIALES EVAPORÍTICOS: rocas sedimentarias formadas por evaporación del agua y, por lo tanto, con componentes fácilmente solubles. Las principales rocas evaporitas son el yeso, la anhidrita y la sal común o halita.

pH: notación empleada para designar el logaritmo decimal de la inversa de la concentración del ión hidrógeno. Se emplea como un indicador de la acidez o de la alcalinidad de una disolución, según su valor sea menor o mayor de 7. El pH debe medirse en el campo; si se mide en el laboratorio puede variar debido a la pérdida de dióxido de carbono del agua de la muestra, o bien a la formación de precipitados de carbonato.

Composición natural de las aguas subterráneas



Ejemplo de mapa generado en un estudio de contaminación antrópica: mapa de contenidos en nitratos en la zona sur de Madrid, representados por isolíneas. En el mapa reducido se representa la misma situación pero por zonas coloreadas, con los contenidos más altos en nitratos en color rojo intenso

Las aguas subterráneas procedentes de los acuíferos carbonatados son mayoritariamente bicarbonatadas cálcicas y magnésicas. Presentan mineralizaciones ligeras o medias, con conductividad eléctrica de 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y concentraciones de iones mayoritarios que rara vez superan los valores admisibles de potabilidad para consumo público. Predominan estas aguas en los acuíferos ubicados en la cabecera de la Cuenca Cantábrica, en el área septentrional del Duero y en los bordes de la

La actividad humana puede afectar a la composición química del agua subterránea, modificando la temperatura y, sobre todo, introduciendo sustancias en el terreno y en el agua, que pueden degradar sus características naturales

Sierra del Guadarrama, en la Cuenca del Tajo. También se encuentran presentes en algunos acuíferos situados en las Cuencas del Alto Guadiana, Guadalquivir, Cuencas Mediterránea Andaluza, Júcar, Ebro y Cuencas Internas de Cataluña.

Los acuíferos de tipo detrítico se caracterizan por su baja mineralización y por la variabilidad en la composición química de sus aguas. En ellos coexisten facies bicarbonatadas cálcicas y magnésicas con sulfatadas o cloruradas cálcicas y sódicas. Como ejemplo, pueden citarse las cuencas detríticas del Duero y Tajo, las planas litorales levantinas, y los aluviales de los ríos Guadiana y Guadalquivir. Su calidad química suele ser aceptable para todos los usos, aunque pueden presentar

alguna vez contenidos en macroconstituyentes que exceden los límites admisibles de potabilidad.

La composición de las aguas subterráneas del archipiélago canario es muy heterogénea. En las zonas costeras, las aguas se encuentran muy mineralizadas, con predominio de cloruro y sodio, en buena parte por efecto de la aridez climática. En las zonas centrales de las islas altas (que alcanzan gran altitud), la salinidad es baja. Las emanaciones de dióxido de carbono de origen volcánico dan lugar, a veces, a la aparición, en algunos puntos, de aguas con bajo pH o bien de alta mineralización, del tipo bicarbonatado sódico o magnésico.

La existencia de materiales evaporíticos* en el terreno provoca un alto contenido en sulfatos, cloruros y sodio en el agua. Estas circunstancias se dan con cierta frecuencia en algunos lugares de España, aunque suelen estar muy localizados.



¿Cómo se extraen las aguas subterráneas?

Muchas poblaciones y ciudades se asentaron allí donde afloraban manantiales, o en llanuras aluviales donde fácilmente se podían abrir pozos excavados. La aparición de la máquina de vapor y el desarrollo de bombas capaces de elevar agua desde grandes profundidades, junto con los avances técnicos en maquinaria y útiles de perforación, condujeron a la construcción de numerosos sondeos y perforaciones durante el siglo XIX y, sobre todo, en el siglo XX.

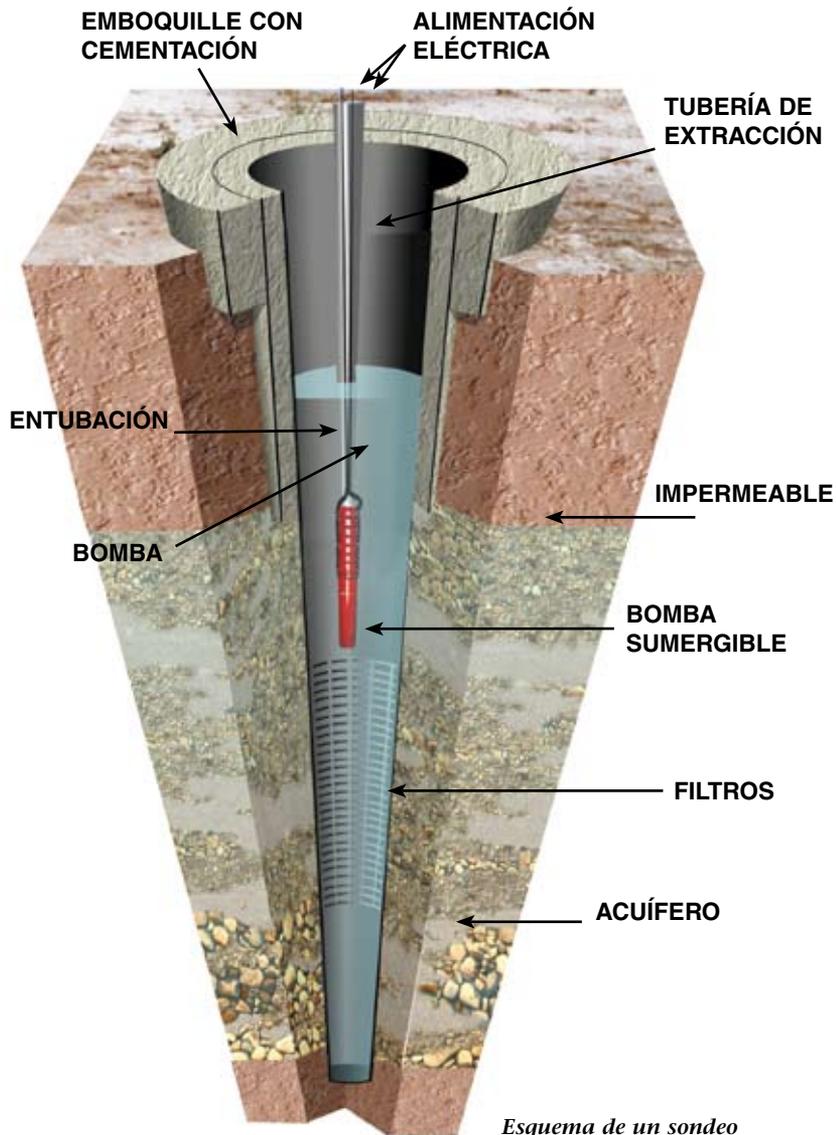
Los sistemas más antiguos de utilización del agua subterránea han sido el aprovechamiento directo de los manantiales o fuentes, y las obras de captación efectuadas a *pico y pala* (principalmente las excavaciones de pozos y la construcción de galerías horizontales). En el primer caso, y por lo general, se trata de obras de planta circular y pocos metros de profundidad, con un diámetro de uno a dos metros. El equipado consistía en una polea o sistema de impulsión por tracción animal (ejemplo de ello son las norias que salpicaban el paisaje de las llanuras de la Mancha), o eólico (molinos del entorno de Palma de Mallorca). En la actualidad, esta forma manual de abrir pozos ha sido sustituida por modernas máquinas perforadoras.

Las antiguas civilizaciones del Oriente construyeron sistemas de galerías para captar y conducir el agua hasta los puntos de

consumo; un sistema parecido abasteció a Madrid desde la época musulmana hasta la mitad del siglo XIX. En Barcelona existió una extensa y muy antigua red de galerías. Situación similar se ha dado en muchos lugares del Levante y Baleares. En el archipiélago canario está muy extendido el aprovechamiento de las aguas subterráneas por medio de largas y profundas galerías que drenan las formaciones volcánicas. En otras muchas zonas, se encuentran pozos excavados, con o sin galerías de fondo, y drenes laterales que favorecen la captación de aguas subterráneas.



Perforación de un pozo por el sistema de rotación con circulación de lodos



Esquema de un sondeo hidrogeológico y su equipado

Los pozos modernos requieren una sofisticada tecnología en la que se precisa un diseño técnico adecuado de la captación, así como un conocimiento detallado del acuífero. Con frecuencia se subestima la importancia que tiene un buen diseño y construcción de un pozo. La duración de un pozo y la eficacia son función directa de la calidad de los materiales empleados y de la tecnología utilizada. Algunos de los problemas que se suelen imputar a los abastecimientos servidos con aguas subterráneas son debidos, muchas veces, a una defectuosa construcción y/o mantenimiento inadecuado de las captaciones, y no a los acuíferos. Hoy día se cuenta con tecnología muy avanzada que hace de los pozos una verdadera obra civil, que requiere diseño, proyecto, mantenimiento y observación.

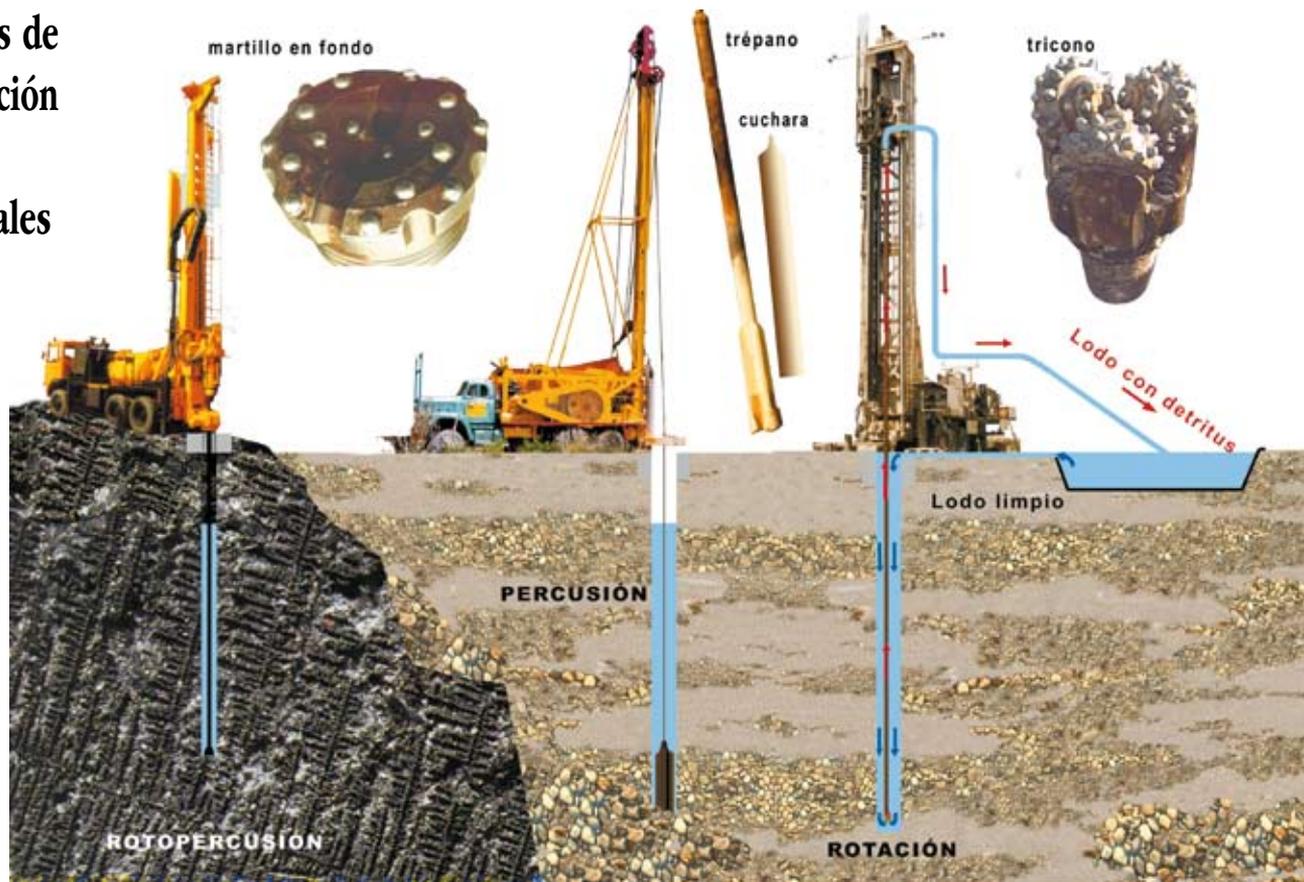
Los métodos de perforación más utilizados en la actualidad son la percusión, la rotación, y la rotopercusión:

- La perforación a percusión consiste en el golpeo repetido de la roca mediante un trépano* hasta machacar totalmente la roca, para luego ser extraída a la superficie mediante una herramienta denominada *cuchara*. Este sistema ha sido utilizado para pozos en cualquier tipo de material geológico aunque, dependiendo del tipo de roca, puede presentar mayor o menor dificultad de perforación. Está especialmente recomendado para perforaciones en acuíferos consolidados (mármoles, calizas, dolomías, areniscas cementadas, entre otros). Sin embargo, muchos pozos en formaciones no consolidadas constituidas por gravas, están contruidos con este sistema. El resultado de la perforación depende en gran medida de la experiencia del perforista.

- La perforación a rotación consiste en la trituración de la roca por medio de un útil de corte que normalmente contiene una cabeza giratoria que desgasta la roca. El material triturado es

¿Cómo se extraen las aguas subterráneas?

Métodos de perforación y útiles principales



extraído del sondeo mediante el arrastre con agua o lodo. Existen dos modalidades: circulación directa e inversa del fluido. La rotación está ampliamente extendida para abrir pozos en terrenos no consolidados como arcillas, arenas, limos y gravas.

- Para terrenos duros como las cuarcitas, granitos y pizarras, se emplea el método mixto de la rotoperCUSión, consistente en una

cabeza percutora que va girando. Los detritus* se extraen mediante la inyección de aire comprimido. La sencillez, rapidez de ejecución y economía de este método (en detrimento en ocasiones de la calidad constructiva y del diseño), se está imponiendo para otros tipos de materiales geológicos. Este método sólo permite una descripción aproximada de la columna litológica atravesada. En la actualidad, este sistema se combina con el de rotación.

Habitualmente los sondeos de captación de agua en España tienen entre 300 y 500 mm de diámetro y profundidades de hasta 300 m, aunque en la actualidad superan, en ocasiones, los 1.000 m. Para permitir el paso del agua en sondeos ubicados en acuíferos detríticos, se utilizan filtros de diverso diseño y naturaleza (metálicos o PVC, preferentemente), y cuya abertura de paso de agua se dimensiona con arreglo a la granulometría de los materiales detríticos atravesados por el sondeo. El anular existente entre las paredes del sondeo y la entubación se debe rellenar de grava silíceo calibrada para, entre otras funciones, impedir el paso al sondeo de materiales de pequeña granulometría.

Antes de dar por concluidas las obras de un pozo es necesario proceder a su limpieza y desarrollo. Se utilizan métodos mecánicos (pistón o aire comprimido), o químicos (nieve carbónica, polifosfatos, ácidos o hielo), o ambos. Con ello se consigue limpiar los residuos que puedan haber quedado en el interior de la perforación, como los finos contenidos en el macizo de grava, y aumentar la eficiencia del pozo mediante la extracción de finos en los primeros decímetros de la formación geológica atravesada por la perforación.

Para la construcción de pozos es muy importante contar con la presencia de un Director de Obra, encargado de la correcta ejecución de los



Desarrollo de un pozo con hielo o ácido carbónico sódico

trabajos contratados. El buen diseño de una obra de captación (pozo, sondeo, etc.), es cuestión fundamental para su duración (vida útil de la obra) y producción de agua, sin que ésta arrastre partículas procedentes de la formación geológica. Todo ello conduce a aumentar el rendimiento y a un menor gasto de explotación. El proyecto de un sondeo debe incluir: la selección del método de perforación; la profundidad estimada de la obra de acuerdo al estudio hidrogeológico previo; el diámetro de la perforación y entubación; la localización de los tramos de tubería que deben ir con rejillas filtrantes y con tubería ciega (sin ranurar); las zonas o secciones que deben ser aisladas por contener aguas de mala calidad o materiales con alto porcentaje de arenas finas y limos arcillosos que puedan ser arrastradas por el agua, etc. El proyecto debe incluir medidas de protección del pozo, tales como emboquille (o cabezal de cemento) y sellado de los primeros metros, y obturaciones donde convenga para evitar mezclas indeseables de agua.

Los pozos que extraen más de 7.000 m³/año requieren concesión administrativa y para ello, un estudio hidrogeológico debe demostrar que la captación es compatible con la sostenibilidad del acuífero y acorde con lo establecido en el Plan Hidrológico

¿Cómo se extraen las aguas subterráneas?

de la cuenca. En muchos casos requiere, además, la realización de un Estudio de Impacto Ambiental. Para pozos de abastecimiento humano, la legislación actual exige un perímetro de protección en el entorno de la captación, con el objetivo de preservar la calidad y cantidad del agua subterránea.

En los casos en que la perforación no consiga los objetivos previstos y se decida abandonarla, debe procederse a su sellado (con cemento u otros productos), con el fin de evitar la posible contaminación del acuífero o que se produzca un accidente.

DETRITUS O RIPIO: resto de la disgregación en partículas de una masa sólida obtenido por el útil de corte de la máquina perforadora.

TRÉPANO: herramienta de corte utilizada en la percusión. Consiste en una pieza de gran peso acabada en aristas cortantes, que realiza el trabajo de rotura, disgregación y trituración de la roca.



Operario trabajando en la perforación de un pozo



Ensayo de bombeo en Calderete (Alicante)



Gestión integrada de los recursos hídricos

La utilización exclusiva de las aguas superficiales o de las aguas subterráneas no ha cumplido en muchas situaciones con el objetivo de satisfacer plenamente las demandas creadas por los distintos usos, especialmente el urbano, el regadío agrícola o la industria, así como los relacionados con el medio ambiente hídrico.

La operación de uso integrado o conjunto contribuye a mejorar o satisfacer plenamente una demanda concreta de agua mediante el uso de las aguas superficiales y subterráneas, y más recientemente, las aguas residuales regeneradas y las aguas desaladas.

Este sistema aprovecha la complementariedad hidrológica de los embalses superficiales y los acuíferos. En los primeros, se dispone de un volumen capaz de retener la fuerte escorrentía que se genera en episodios de corta duración, mientras que, en los segundos, se almacena un volumen de agua varias decenas o centenares de veces superior a su recarga media, procedente también de la disponibilidad de recursos hídricos no convencionales.

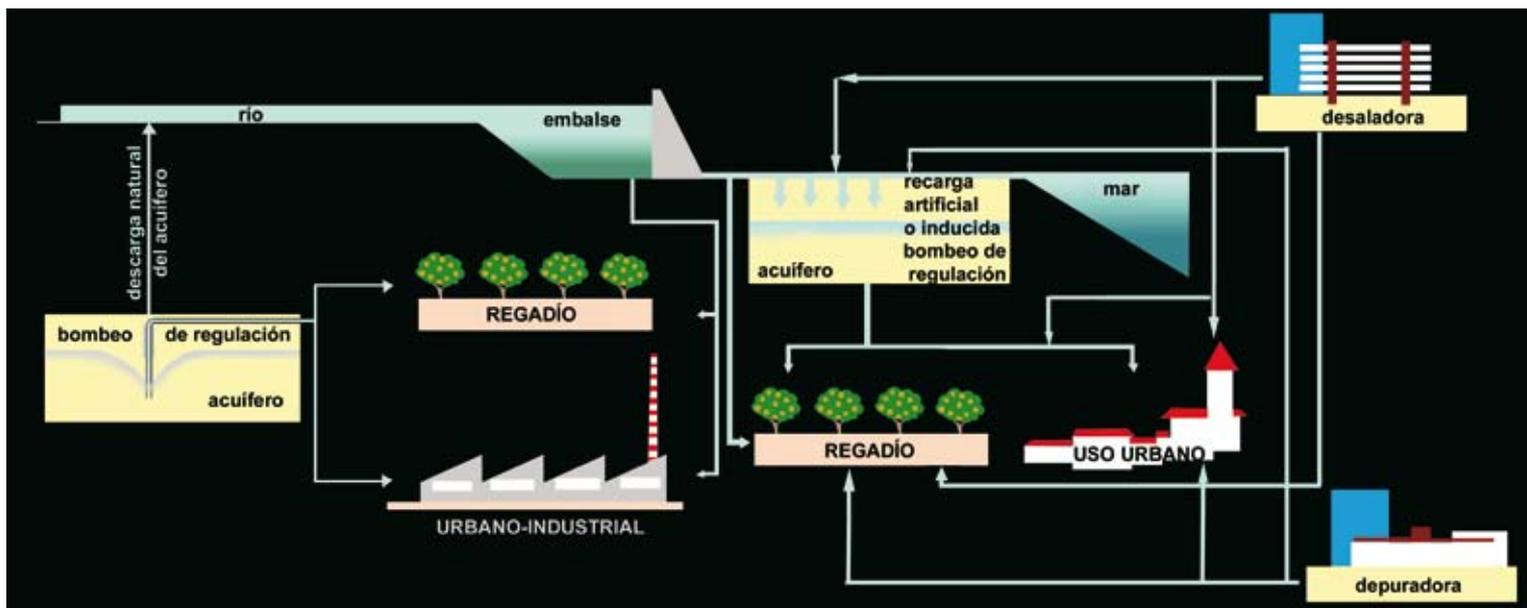
Los porcentajes en que se combinan las cantidades de agua de una y otra procedencia, varían en función de la época del ciclo hidrológico anual, de las reservas existentes en el sistema de

almacenamiento superficial y en los acuíferos, de la disponibilidad de aguas depuradas y de aguas desaladas, y de la calidad de cada una de ellas.

Con ello se consigue, en general, aprovechar una mayor cantidad de agua, ya que la explotación de los embalses puede alcanzar una mayor garantía al incorporarse los acuíferos y su capacidad de almacenamiento en el sistema de suministro, como un elemento adicional que proporciona seguridad.

En el uso integrado, las aguas subterráneas se aprovechan en los momentos y lugares donde la estrategia de gestión hídrica lo aconseje. Se fundamenta en un uso mayoritario de las aguas superficiales en los años húmedos y de las subterráneas en los secos.

En algunos esquemas de uso conjunto, la complementariedad que se pretende obtener no sólo radica en disponer de mayor cantidad de agua o mejorar el grado de garantía, sino en conseguir una mejor calidad del agua mediante la mezcla, en origen, de las diferentes fuentes (a través de recarga artificial), o en destino (mediante el uso de depósitos o canales), consiguiéndose una calidad final adecuada.



Esquema que representa un sistema de aprovechamiento conjunto de aguas superficiales, subterráneas, aguas regeneradas y desaladas. En él se observa la presencia de un embalse de superficie y de dos acuíferos, más una planta de desalación y una de regeneración de aguas residuales. Uno de los acuíferos está situado aguas arriba del embalse de regulación superficial. Asimismo, se representan las diferentes zonas de demanda (urbano-industrial y regadíos). En función de la disponibilidad hídrica existente en el embalse, una determinada demanda puede ser atendida a partir del agua superficial contenida en el mismo, conjuntamente con aguas subterráneas o exclusivamente con estas últimas. Este sistema se puede completar con actuaciones de recarga artificial que almacenen en el acuífero el agua circulante por el río, y los recursos no convencionales sobrantes

Las realizaciones existentes en España responden más a casuísticas locales que a una planificación programada con antelación. Dichas actuaciones fueron impulsadas y generadas, en su mayoría, por iniciativa privada de los usuarios, tanto a nivel individual como organizados en Comunidades de Usuarios. No obstante, las diferentes Administraciones han colaborado posteriormente en mejorar muchos de los sistemas que surgieron espontáneamente.

Las actuaciones más relevantes efectuadas en materia de utilización conjunta se relacionan probablemente con intervenciones que implican a las ciudades españolas de Madrid y Barcelona.

Para el abastecimiento de la ciudad de Madrid y gran parte de la Comunidad, se cuenta con el servicio de unos quince embalses que almacenan y regulan las aguas superficiales procedentes de las sierras de Guadarrama y Somosierra, y del orden de 120 pozos. La demanda anual es de unos 600 hm³. La estrategia empleada para su satisfacción se fundamenta en extraer aguas

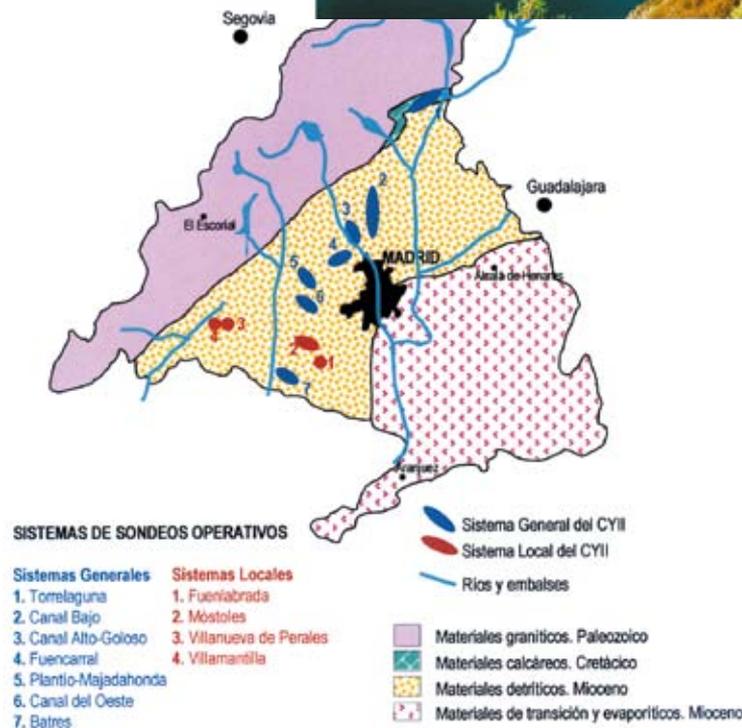
Gestión conjunta de aguas superficiales y subterráneas

del acuífero durante los años secos, que complementan al agua derivada de los embalses. Durante los años de pluviosidad normal o húmeda se utilizan casi exclusivamente los recursos almacenados en los embalses. En estas épocas es cuando se produce la recuperación del almacenamiento de agua del acuífero terciario detrítico de Madrid.

El sistema más utilizado y desarrollado en España es el del Llobregat, en Barcelona. Este sistema ha pasado por diferentes situaciones desde principios del siglo XX, en que se inició un incremento del abastecimiento a Barcelona y poblaciones limítrofes con agua subterránea. La sucesiva construcción de los embalses de Sant Ponç y La Baells en el río Llobregat, el escarificado del lecho del río, la llegada a Barcelona del canal del trasvase del Ter, la construcción de los pozos radiales de Abrera-Martorell, y la recarga artificial en el área de conexión entre el Valle Bajo y el Delta, han modificado periódicamente la cuantía en la que intervienen las aguas superficiales y subterráneas, en este esquema de gestión conjunta. A esto hay que añadir la gestión del acuífero del río Besós.

El sistema de abastecimiento a Barcelona es un ejemplo que pone de manifiesto que la integración de las aguas superficiales y subterráneas no es una utopía, sino que es una realidad comprobada y constatada.

Otras actuaciones de integración de las aguas superficiales y subterráneas en la gestión hídrica son las desarrolladas en zonas como el Valle del Guadalentín, Plana de Sagunto y río Palancia, Marina Baja y Delta del Adra entre otras. La realización más conocida, por la profusa bibliografía que ha generado, corresponde al sistema de explotación constituido por el acuífero de la Plana de Castellón y los ríos y embalses que con él se interrelacionan.



Uso conjunto aguas superficiales-subterráneas en el sistema de abastecimiento a Madrid gestionado por el Canal de Isabel II. Embalse de El Atazar y campo de pozos de extracción

Recarga artificial

Esta técnica permite, mediante una intervención programada y voluntaria, introducir agua en un acuífero, bien sea de forma directa o inducida. Con ello se consigue incrementar el volumen de agua disponible y el grado de garantía, así como actuar sobre su calidad.

Se designa como recarga artificial a un conjunto de técnicas que permiten, mediante intervención programada, la introducción directa o inducida de agua en un acuífero, incrementar el grado de garantía y disponibilidad de los recursos hídricos, así como actuar sobre su calidad

Su objetivo es contribuir, siempre que técnica y económicamente sea factible, a una gestión más racional de la potencialidad hídrica que presenta una determinada cuenca hidrográfica o sistema de explotación.

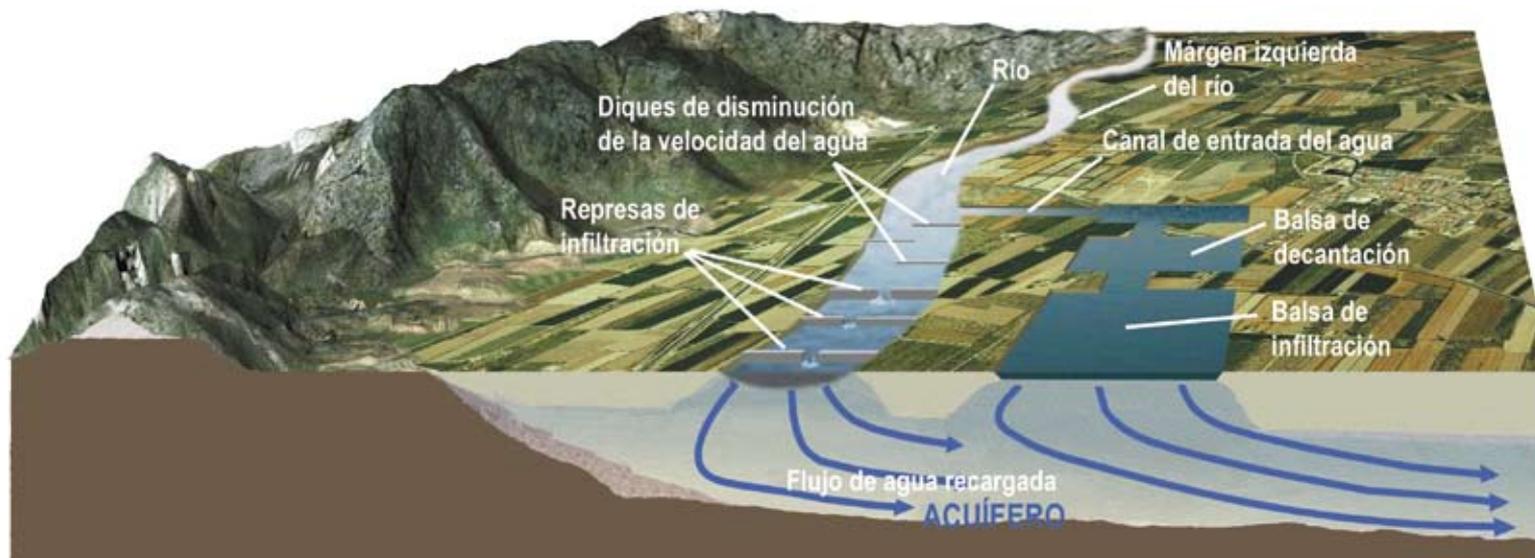
Desde el punto de vista de operación, es una técnica que presenta cierta complejidad de ejecución, especialmente si se compara con la sencillez tecnológica que ha presidido hasta la fecha la planificación de obras y actuaciones en hidrogeología. La programación de intervenciones fundamentadas en esta tecnología debería reservarse princi-

palmente a áreas que presentan escasa regulación de recursos hídricos y fuerte demanda; a zonas con explotación agrícola bien desarrollada y de alto rendimiento; a comarcas donde la rentabilidad del agua es muy elevada; y a sectores (especialmente costeros) donde no es posible la construcción de obras clásicas de regulación por condicionantes topográficos.



Operación de escarificado en el lecho del río Llobregat (Barcelona) para favorecer que el agua circulante por el cauce recargue al acuífero

Recarga artificial



Recarga artificial de un acuífero utilizando dos sistemas diferentes: el primero, favoreciendo la infiltración del agua circulante por el río mediante la construcción en su lecho de represas de infiltración; y el segundo, por balsas construidas en la margen izquierda del río

Las aplicaciones más usuales de la recarga artificial están dirigidas a:

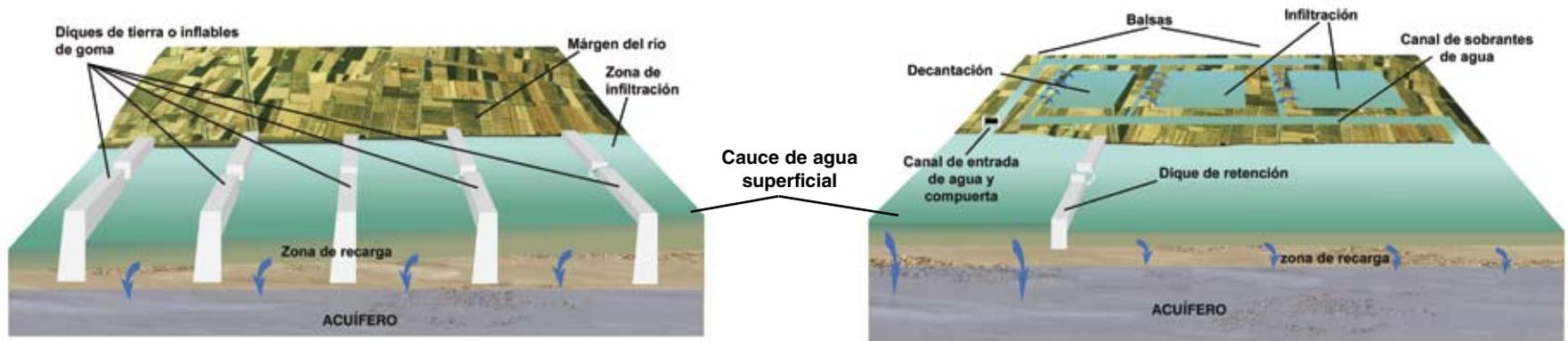
- Almacenamiento subterráneo de escorrentías superficiales no reguladas.
- Reducción o eliminación del descenso piezométrico.
- Apoyo a determinados esquemas de utilización conjunta.
- Mantenimiento hídrico de enclaves ecológicos o medioambientales.
- Reducción de costes de transporte, almacenamiento o bombeo.
- Actuaciones sobre problemas de subsidencia del terreno.

Su objetivo es contribuir, siempre que técnica y económicamente sea factible, a una gestión más racional de la potencialidad hídrica que presenta una determinada cuenca hidrográfica o un sistema de explotación

- Disminución o corrección de problemas de intrusión marina.
- Aprovechamiento de las propiedades del suelo y de la zona no saturada como elemento de filtración o tratamiento, tanto para aguas potables como residuales.

Un condicionante necesario para acometer cualquier tipo de operación de recarga artificial de acuíferos es disponer de recursos hídricos con buena calidad, que básicamente pueden proceder de agua superficial de corrientes continuas o discontinuas, de agua residual urbana regenerada, o de agua procedente de otro acuífero, entre otras posibles fuentes.

ALGUNOS EJEMPLOS DE DISPOSITIVOS DE RECARGA ARTIFICIAL DE TIPO SUPERFICIAL



Recarga por represas. En la imagen superior, sistema de diques que retienen el agua, para posteriormente recargar el acuífero; abajo, experiencia piloto en el lecho de un río



Recarga por balsas. En la imagen superior, esquema de dispositivo operativo; abajo, experiencia piloto en el aluvial de un río

Perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas

La delimitación de perímetros de protección tiene por objetivo salvaguardar la calidad de las aguas subterráneas que se extraen de las captaciones de abastecimiento urbano; adquiere una trascendental importancia ante el riesgo potencial que supone la actividad antrópica en los alrededores de dichas captaciones.

El perímetro de protección delimita un área en el entorno de la captación en la cual, de forma graduada, se restringen o prohíben las actividades o instalaciones susceptibles de contaminar las aguas subterráneas.

Los perímetros de protección deben compatibilizar la actividad socioeconómica en la zona circundante a la captación, con la protección del agua subterránea empleada, especialmente para el abastecimiento a núcleos de población.

El sistema de protección más utilizado consiste en dividir el entorno de las captaciones en diferentes zonas, graduadas de mayor a menor riesgo e importancia en cuanto a las restricciones de actividad a imponer.

Para la delimitación de estas zonas es necesario conocer con detalle las características tanto del acuífero donde se ubica la cap-

tación, como el diseño y características de ésta. Para la protección de la calidad de las aguas subterráneas se consideran generalmente tres zonas:

Zona inmediata o de restricciones absolutas: el criterio de delimitación suele ser un tiempo de tránsito* del agua de 24 horas o un área fijada de forma arbitraria de pequeña extensión (100-400 m²). En esta zona se suelen prohibir todas las actividades que no estén relacionadas directamente con las operaciones de extracción. Se recomienda que estén cercadas por una valla que impida el acceso a su interior.

Zona próxima o de restricciones máximas: se dimensiona generalmente en función de un tiempo de tránsito del agua desde la superficie del terreno de 50-60 días para proteger contra la contaminación microbiológica.

Zona alejada o de restricciones moderadas: el criterio más adecuado para su dimensionado es un tiempo de tránsito del agua de varios años, complementándolo con criterios de tipo hidrogeológico para proteger la captación frente a contaminantes de larga persistencia.

Perímetros de protección de captaciones de aguas subterráneas



Esquema que representa las diferentes zonas de protección de la calidad del agua subterránea en un pozo destinado al abastecimiento urbano



La legislación prevé dos posibilidades a la hora de la determinación del perímetro de protección, ya sea a través de los planes hidrológicos (art. 42 Texto Refundido de la L. A.) o, en su ausencia o para completar sus determinaciones, por el Organismo de cuenca (art. 56.3 T. R. de la L. A.). El procedimiento puede iniciarse de oficio en las áreas de actuación del Organismo de cuenca, a solicitud de la autoridad medioambiental; a solicitud de la autoridad municipal; o a solicitud de cualquier otra autoridad sobre la que recaigan competencias sobre la materia.

La delimitación del perímetro corresponde a la Junta de Gobierno del Organismo de cuenca previo informe de su Consejo del Agua. Las actividades que pueden ser restringidas o prohibidas en el área definida por el perímetro de protección están desglosadas en el artículo 173.6 del Reglamento del Dominio Público Hidráulico y afectan a obras de infraestructuras, actividades urbanas, actividades agrícolas y ganaderas, actividades industriales y actividades recreativas.

La protección del agua es un objetivo prioritario en la política medioambiental europea, reflejado específicamente en la Directiva Marco del Agua (DMA), Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000 y en la Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.

La DMA contempla establecer (opcionalmente) zonas de salvaguarda en cuyo ámbito se centran las medidas para proteger las aguas subterráneas, con el objetivo de limitar el deterioro de su calidad y reducir el nivel de tratamiento de purificación requerido en el agua de consumo humano, opción muy recomendable debido al tamaño con que han sido delimitadas numerosas masas de agua en diversos Estados.

Equivalen, por tanto, a perímetros de protección de masas de agua subterránea destinada al consumo humano, según el artículo 7.3 de la DMA. Estos no han sido aún objeto de transposición a la legislación española. Para su delimitación, puede emplearse una metodología que considere específicamente el riesgo de contaminación al delimitar las zonas de salvaguarda.

Muchos Estados ya utilizan perímetros de protección de captaciones, con principios muy similares a los indicados. Estos pueden ser empleados al delimitar zonas de salvaguarda para cumplir los requerimientos del artículo 7.3.



Al realizar la planificación de un territorio es conveniente establecer los perímetros de protección de cada uno de los municipios ubicados en dicha área. Los estudios previos proporcionarán la información necesaria para definir en cada captación qué criterios (distancia, descenso, tiempo de tránsito, criterios hidrogeológicos, poder autodepurador del terreno), y qué métodos (analíticos, modelos matemáticos, estudios hidrogeológicos), son los óptimos para definir cada una de las zonas que componen el perímetro de protección.

TIEMPO DE TRÁNSITO: tiempo que tarda una partícula de agua desde que alcanza la zona saturada hasta que llega a la captación por el camino más rápido, o hasta que sale a la superficie de forma natural.

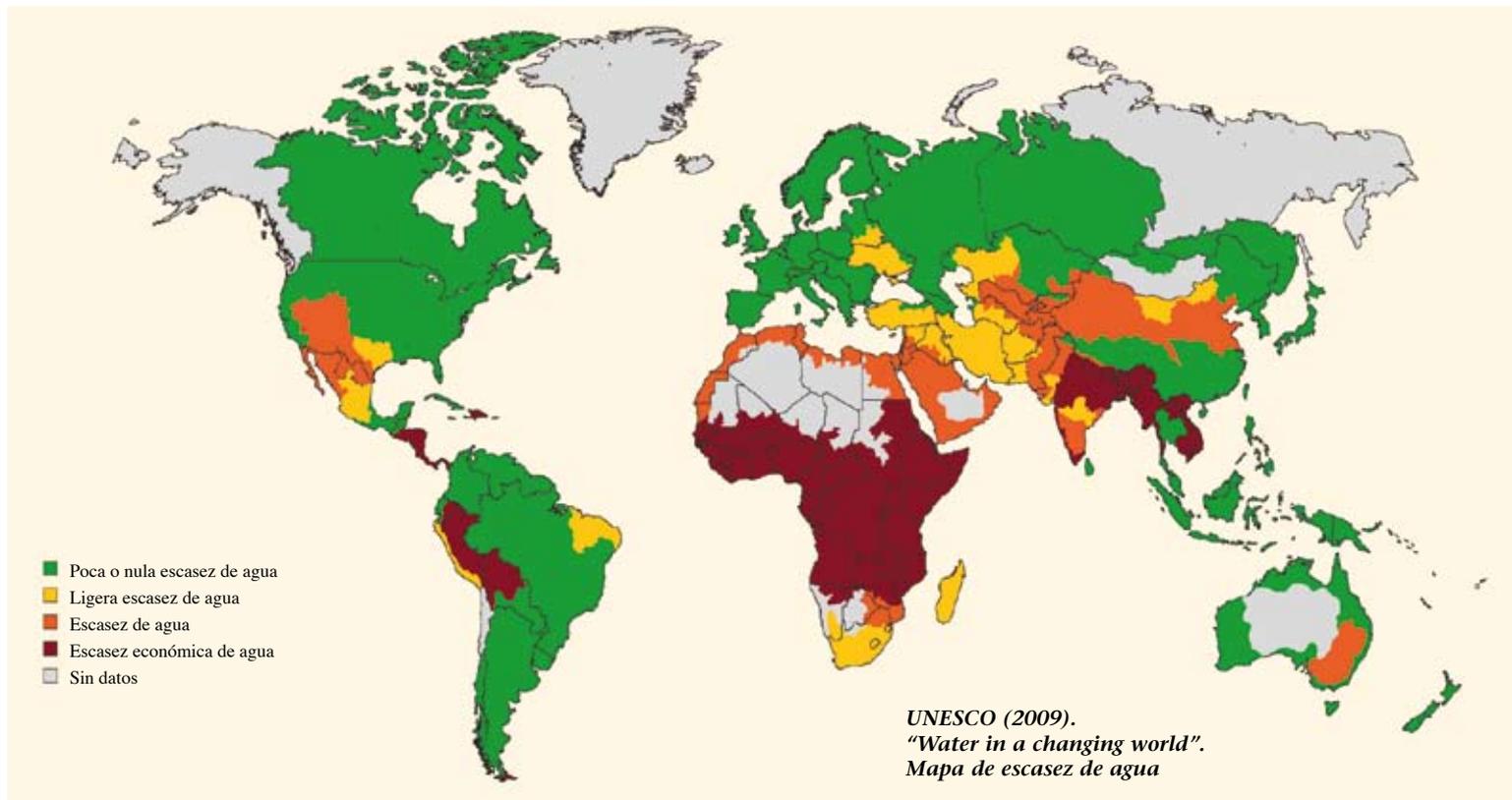
La protección de las captaciones destinadas al abastecimiento humano requieren la delimitación de perímetros de protección. En la imagen se puede observar un pozo bombeando agua de un acuífero, rodeado de cultivos muy próximos que pueden utilizar fertilizantes para mejorar su producción, lo que podría dar lugar a la contaminación de las aguas subterráneas

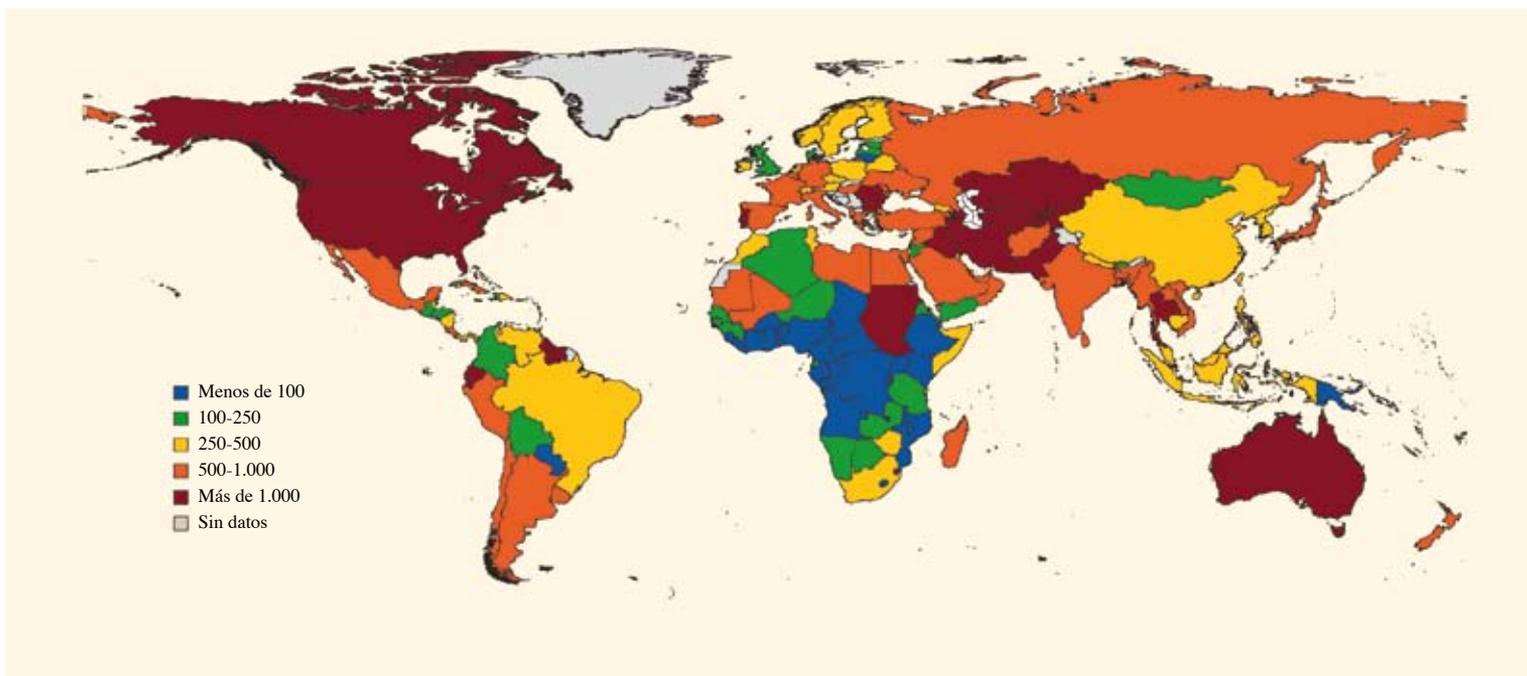
El agua subterránea en el Mundo

AGUA Y VIDA

El agua, además de ser esencial para la vida y tener un valor económico o utilitario muy importante, tiene también un valor intangible que a veces es definido como simbólico, cultural, religioso o

patrimonial. Esta característica del agua hace prácticamente imposible que este recurso pueda ser tratado como cualquier otro bien de consumo humano.





A escala mundial, existe suficiente cantidad de agua para todos. Así lo afirma el segundo Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo, elaborado en 2006. Por tanto, se puede afirmar que no hay una crisis mundial de escasez de agua, pese a que los recursos hídricos no estén homogéneamente distribuidos y haya regiones con conflictos hídricos. El problema no radica en la escasez física del agua sino, como afirma las Naciones Unidas, en la gobernabilidad, es decir, en cómo compartir el agua de forma equitativa asegurando la sostenibilidad de los ecosistemas naturales. Hasta el día de hoy, no se ha alcanzado dicho equilibrio.

Durante la Cumbre del Milenio de la Asamblea General de las Naciones Unidas que tuvo lugar en 2000, y reconociendo la urgencia de una lucha común contra la pobreza, la desigualdad, el ham-

*UNESCO (2009).
"Water in a changing world".
Utilización de agua por persona
en el año 2000 (m³/año)*

bre y la enfermedad, se establecieron ocho objetivos con propósitos específicos cuantificables que, tomando como referencia el año 1999, debían alcanzarse en 2015. Las aguas subterráneas están jugando un papel decisivo en el logro de dos de ellos: la reducción a la mitad tanto del número de personas sin fácil acceso al agua potable (1.100 millones aproximadamente), como del número de personas que no tienen acceso al saneamiento básico (cerca de 2.600 millones de personas).

El agua subterránea en el mundo

Región	Recursos renovables de agua	Utilización total de agua	Utilización de agua						Porcentaje del uso del agua respecto al recurso renovable
			Agricultura		Industria		Doméstico (urbano)		
			Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	Cantidad	Porcentaje	
África	3.936	217	186	86	9	4	22	10	5,5
Asia	11.594	2.378	1.936	81	270	11	172	7	20,5
América Latina	13.477	252	178	71	26	10	47	19	1,9
Caribe	93	13	9	69	1	8	3	23	14,0
Norteamérica	6.253	525	203	39	252	48	70	13	8,4
Oceanía	1.703	26	18	73	3	12	5	19	1,5
Europa	6.603	418	132	32	223	53	63	15	6,3
Mundo	43.659	3.829	2.663	70	784	20	382	10	8,8

UNESCO (2009). "Water in a changing world". Utilización de agua en el mundo (km³/año)

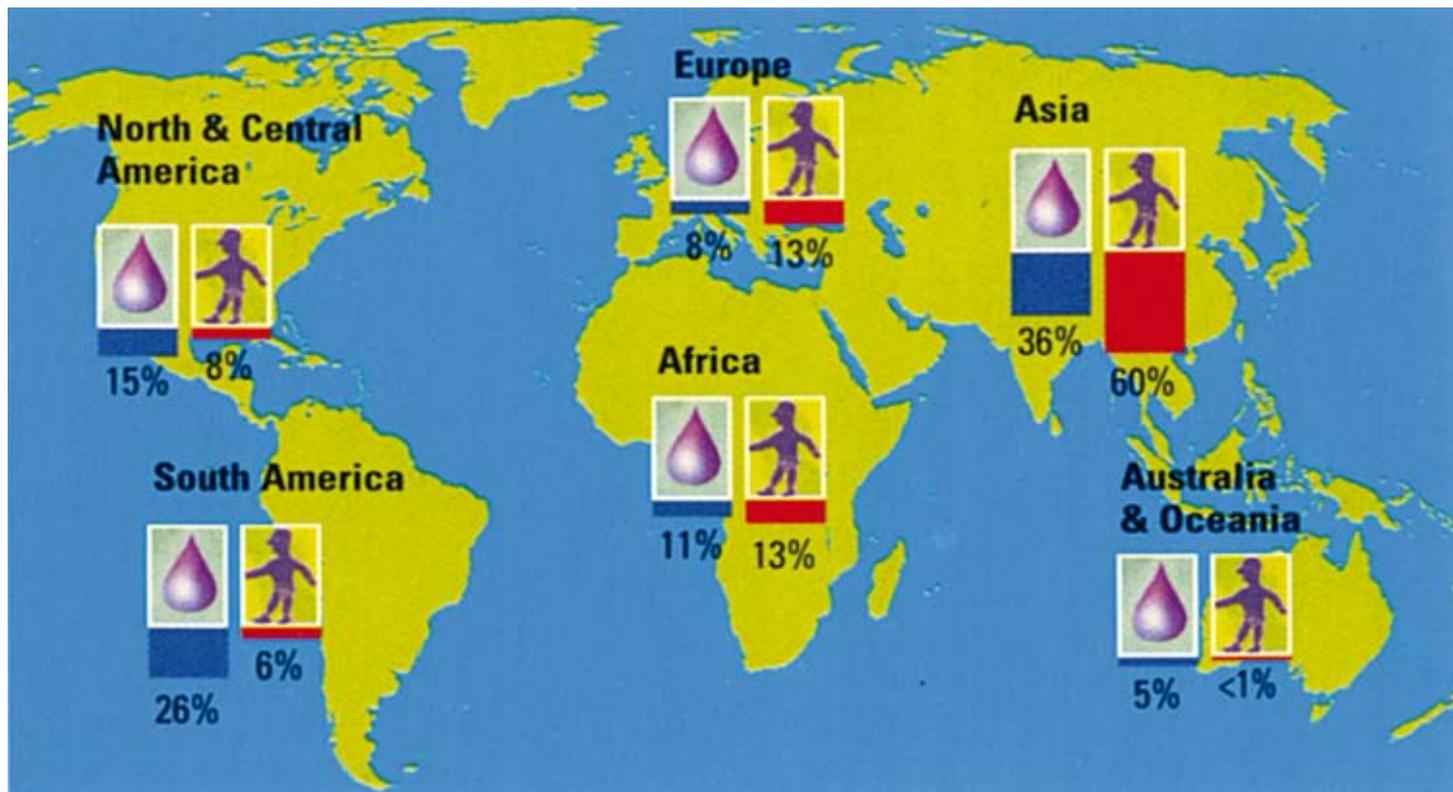
Para promover las actividades encaminadas a cumplir estos compromisos contraídos en relación con el agua, la Asamblea General de las Naciones Unidas, basándose en el título del primer Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo "Agua para todos, Agua para la vida", proclamó en diciembre de 2003, el Decenio Internacional para la Acción "El agua, fuente de vida" (2005-2015), empezando el Día Mundial del Agua (22 de marzo de 2005). El objetivo principal del Decenio es ocuparse más a fondo de las cuestiones relativas al agua a través de la ejecución de programas y proyectos, con el fin de ayudar a alcanzar los objetivos relativos al agua acordados a nivel internacional y contenidos en el Programa 21, los Objetivos de Desarrollo de la ONU para el Milenio, y el Plan de Aplicación de Johannesburgo. Así, entre los temas que ocupan un lugar fundamental en el Decenio se encuentran: la escasez, el acceso al saneamiento, la prevención de los desastres, la contaminación, las cuestiones relativas a las aguas transfronterizas, el

fomento de la capacidad, la financiación, la valoración y la ordenación integrada de los recursos hídricos, y el continente africano como una región que requiere medidas prioritarias.

DESARROLLO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La rápida expansión de la utilización de las aguas subterráneas se produjo entre 1950 y 1975 en la mayoría de los países industrializados, y entre 1970 y 1990 en la mayor parte de los países en vías de desarrollo. Las principales causas de este desarrollo pueden concretarse en las siguientes:

- Las mejoras en las técnicas de perforación, que han permitido construir pozos de forma cada vez más sencilla y con bajos costes.

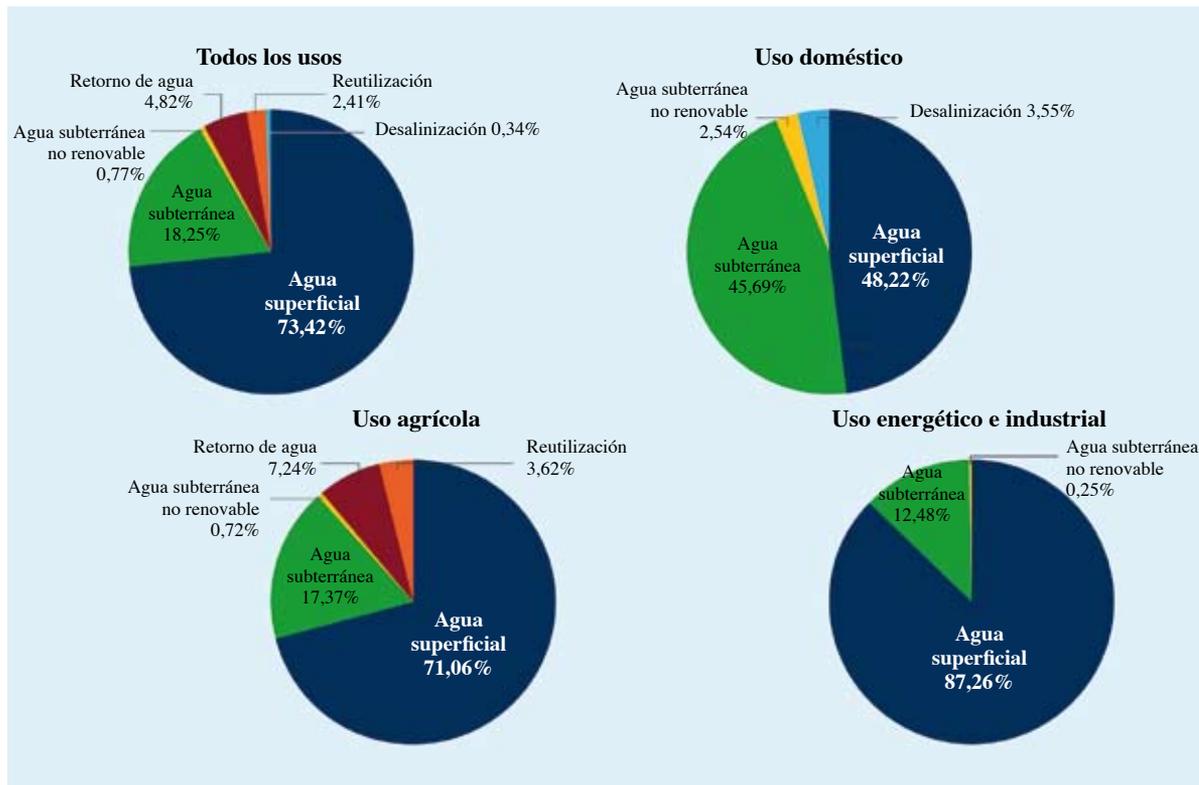


UNESCO (2003). "Water for People, Water for Life". Mapa de la disponibilidad de agua respecto a la población por continentes

- El invento y la comercialización de los equipos motobomba sumergibles, que permiten extraer de un pozo de menos de un metro de diámetro, caudales suficientes para regar una superficie de un kilómetro cuadrado, o para abastecer una población de 50.000 habitantes.
- El efecto de contagio producido entre los usuarios (principalmente agricultores), al ver las importantes ventajas y beneficios económicos obtenidos por otros usuarios de aguas subterráneas, con costes asequibles.
- El avance de la Hidrogeología científica, que ha mejorado el conocimiento sobre el origen, localización, existencia y funcionamiento de las aguas subterráneas, superando así su consideración como algo misterioso e inabordable.

Las aguas subterráneas, comparadas con las aguas superficiales, ofrecen mayores beneficios económicos por unidad de volumen, debido a su cercanía al área de suministro, a su garantía de uso en periodos de sequía, y a su buena calidad química que ape-

El agua subterránea en el mundo



UNESCO (2009). "Water in a changing world". Usos del agua en el año 2000

nas exige tratamiento, entre otros factores. Sin embargo, los valores sociales, económicos y medioambientales asociados a las aguas subterráneas son con frecuencia desconocidos e infravalorados por los gestores del agua y por el público en general. Las aguas subterráneas constituyen la fuente de abastecimiento más segura de agua potable, a la vez que ofrecen el soporte de un amplio abanico de servicios para la humanidad, especialmente los relacionados con el medioambiente, la agricultura y la industria. De estos, la agricultura constituye el principal consumidor de

agua subterránea (el 60% del agua subterránea extraída en el planeta se destina a regadío).

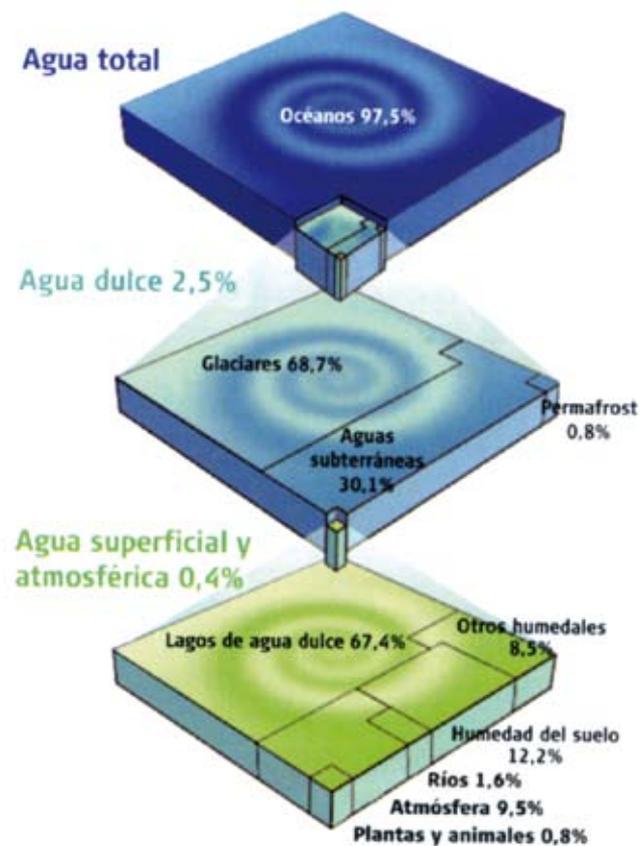
La mayor parte de las aguas subterráneas renovables son de buena calidad y, por tanto, adecuadas para el uso doméstico, el regadío y otros usos, y apenas precisan de tratamiento. Existen, sin embargo, amplias zonas como el Sudeste de Asia, donde hay numerosos problemas derivados de la presencia de arsénico y flúor en el agua potable. En Bangladesh por ejemplo, se conocen 200.000

casos de envenenamiento por arsénico en las aguas subterráneas. También se han dado casos similares, aunque en menor cantidad, en otros países como México, Argentina, Chile, Taiwán, Mongolia, China, Japón e India. Este arsénico proviene de las formaciones geológicas que existen en los diferentes lugares.

La protección de las aguas subterráneas frente a la contaminación se está convirtiendo en motivo de creciente preocupación mundial, tal y como se refleja en la directiva de la Comisión Europea, que se centra más en la prevención que en la limpieza de la contaminación. Aunque las aguas subterráneas son menos vulnerables a la acción del hombre que las aguas superficiales, una vez que están contaminadas, su limpieza (remediación) lleva relativamente mucho tiempo (años), requiere unas técnicas exigentes, y puede resultar mucho más costosa. Por este motivo, se están desarrollando métodos de evaluación de la vulnerabilidad de las aguas subterráneas. Los mapas a gran escala de vulnerabilidad de las aguas subterráneas (por ejemplo, Francia, España, Alemania, Italia, República Checa, Polonia, Rusia y Australia) sirven de directrices para la acotación de los usos del suelo a nivel nacional o regional.

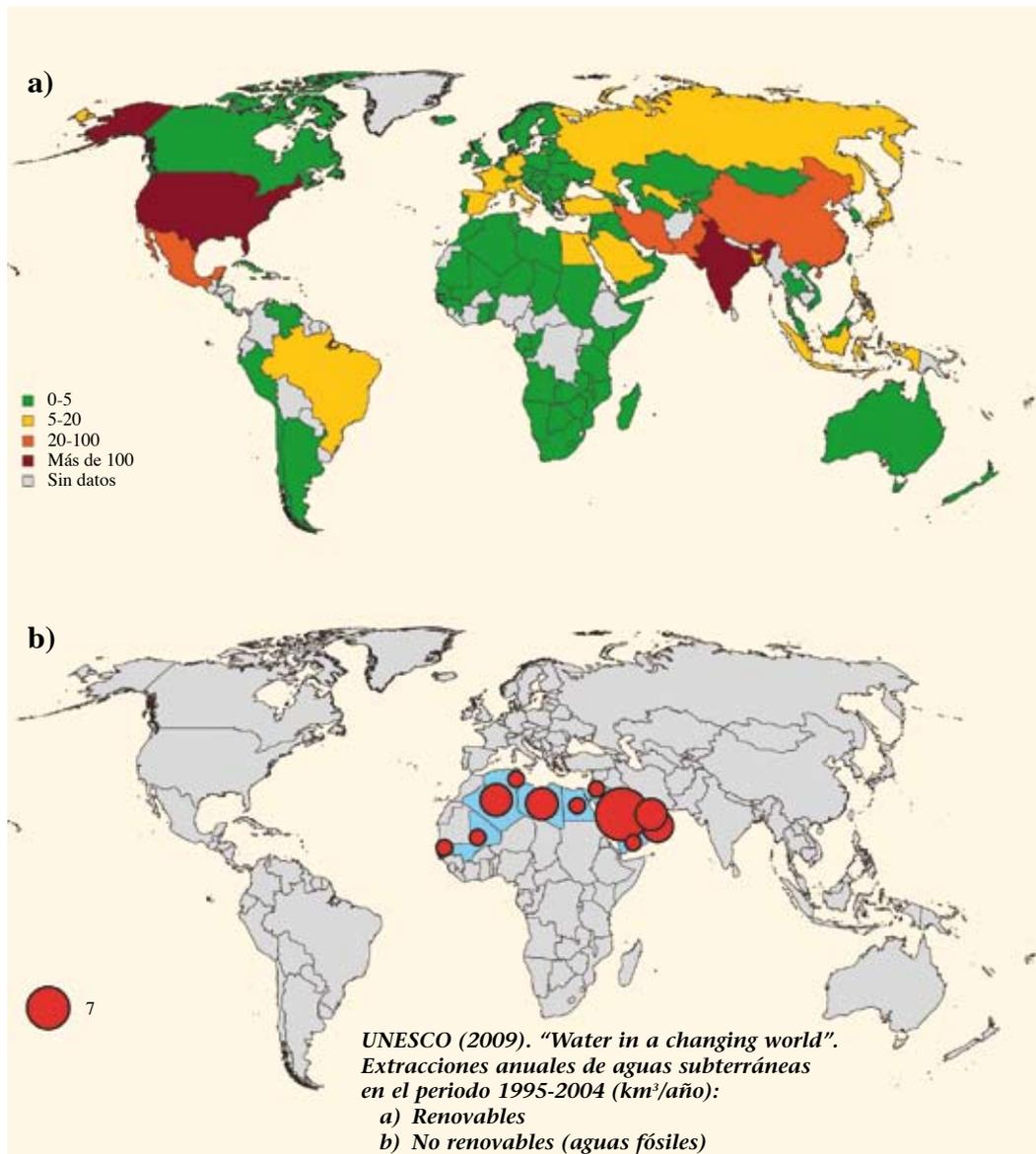
AGUAS SUBTERRÁNEAS Y ALIVIO DE LA POBREZA

El consumo de agua casi se ha duplicado en los últimos cincuenta años. Se estima que de los 4.000 km³/año de agua que utiliza la humanidad, 600-700 km³/año corresponden a las aguas subterráneas, es decir, entre el 15% y el 18% del agua total. Tanto la contaminación de las aguas como la escasez de recursos hídricos, pueden contribuir sustancialmente a una mayor pobreza. Así, las enfermedades diarreicas representan el 21% de todas las muertes de niños menores de cinco años en los países en vías de desarrollo.



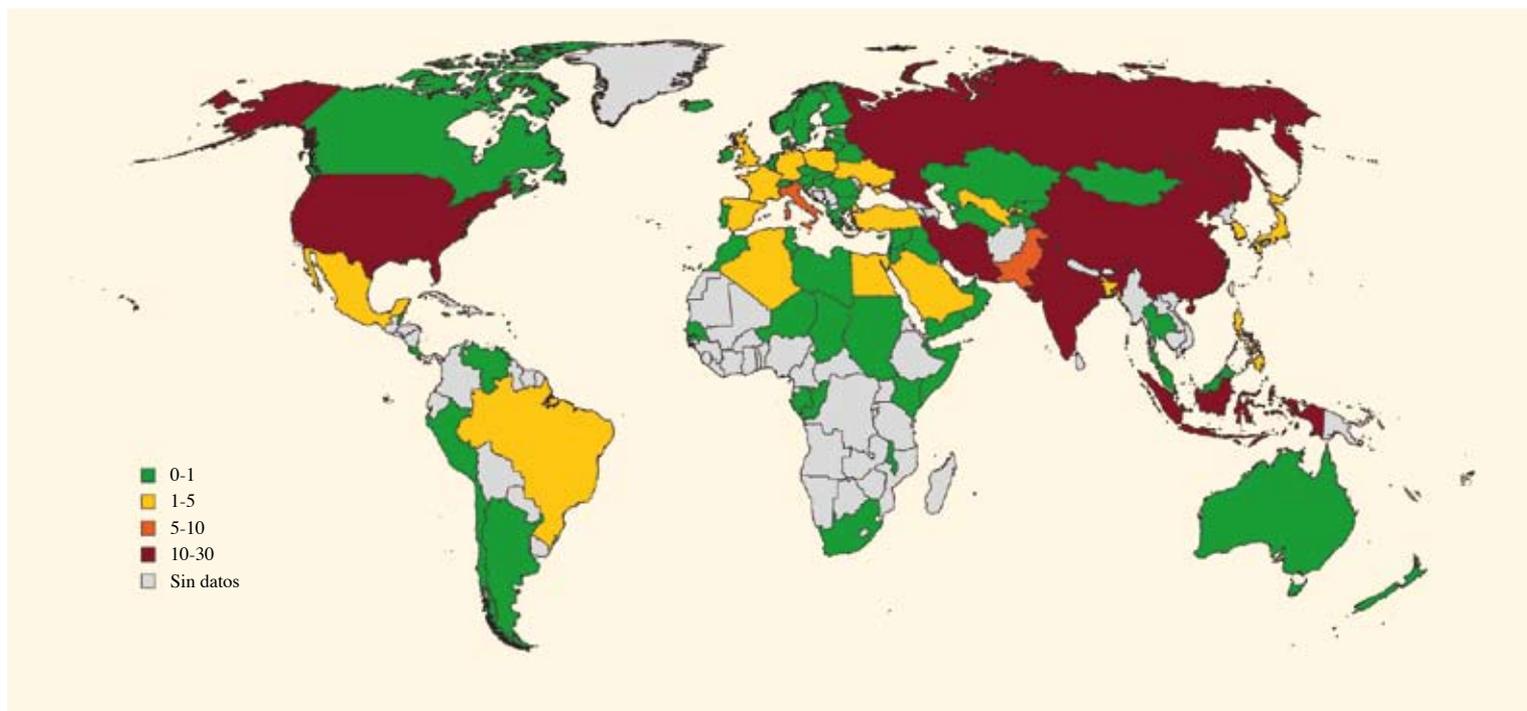
Shiklomanov y Rodda (2003). "World Water Resources at the Beginning of the 21st Century". Distribución global del agua en el mundo. Volumen total de agua: 35,2 millones de km³

El agua subterránea en el mundo



Según la UNESCO, muchas de las megalópolis del planeta (Mexico D. F., Teherán, Shanghai, Lima, Lusaka, Karachi, Dhaka, Manila, El Cairo, Londres, Beijing), y miles de otras ciudades de tamaño medio en todos los continentes, dependen de las aguas subterráneas o consumen un gran volumen de las mismas. Otras, sin embargo, han disminuido el uso de las aguas subterráneas, debido a problemas de subsidencia del terreno (Bangkok), intrusión marina (Buenos Aires) o contaminación de las aguas subterráneas (Jakarta). Además, las pequeñas ciudades y las comunidades rurales utilizan con frecuencia este recurso subterráneo para su abastecimiento doméstico. Los 10 países que, según la UNESCO, utilizan más agua son India, China, Estados Unidos, Pakistán, Japón, Tailandia, Indonesia, Bangladesh, México y Rusia.

Las Naciones Unidas abogan por un mayor desarrollo de las aguas subterráneas, sobre todo en aquellas regiones áridas o semiáridas donde la escasez de recursos hídricos superficiales alcanza niveles preocupantes. Buena parte de las aguas subterráneas que se extraen en esas zonas áridas —norte de África, la Península Arábiga, este de Australia, etc.—, proceden de las que se infiltraron en tiempos



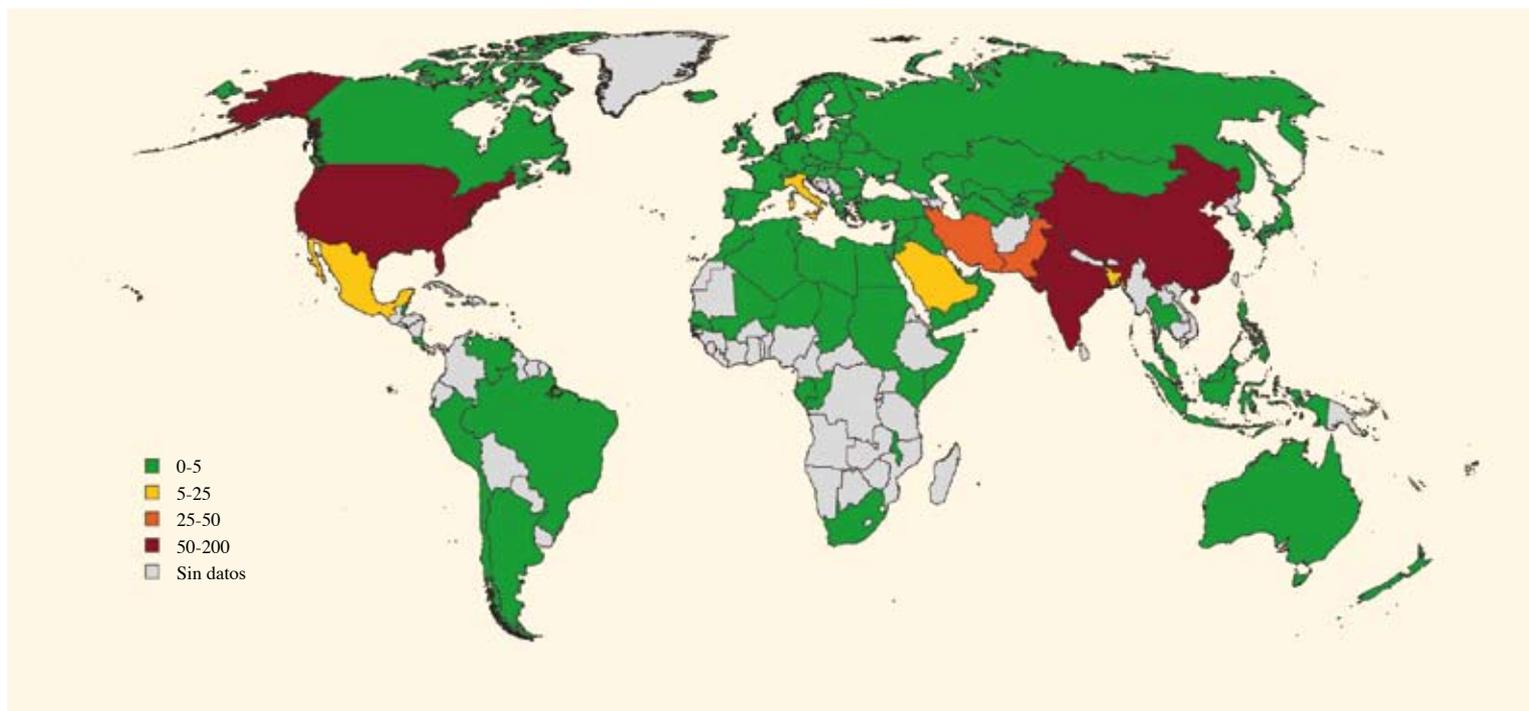
remotos, cuando las condiciones climáticas favorecían las precipitaciones. La tasa actual de recarga de estos acuíferos es prácticamente inexistente debido a sus condiciones climáticas de aridez extrema. La extracción actual de este recurso subterráneo no renovable (*aguas fósiles*) asciende a 30 km³.

Recientemente ha surgido una polémica sobre la conveniencia de emplear estos recursos hídricos subterráneos no renovables o también llamados fósiles, ya que se entiende que el desarrollo sostenible de las aguas subterráneas lleva implícito la no extracción de las reservas. Así, por ejemplo, los Profesores Ramón Llamas y Jerome Delli Priscoli, Coordinador y Coordinador Adjunto respectivamente

UNESCO (2009). "Water in a changing world".
Uso doméstico de aguas subterráneas en el periodo 1995-2005 (km³/año)

del Grupo de Trabajo sobre Ética de los usos del agua dulce de la UNESCO, argumentan que puede ser ético explotar recursos subterráneos no renovables siempre y cuando se cumplan los siguientes requisitos: evidencia hidrogeológica de que los recursos del acuífero pueden ser explotados durante un largo periodo de tiempo (100 años por ejemplo); que los impactos negativos de esta explotación sean inferiores a sus beneficios socioeconómicos; que tanto usuarios

El agua subterránea en el mundo



como gestores sean conscientes del futuro agotamiento del recurso; y buscar fuentes alternativas para cuando esto ocurra.

Las aguas subterráneas, por tanto, pueden jugar un importante papel en el alivio de la pobreza, la salud y la marginación social, puesto que se trata de un recurso muy abundante —el volumen global de aguas subterráneas almacenado bajo la superficie terrestre, representa el 96% del agua dulce no congelada de todo el planeta—, cuya captación supone un coste relativamente bajo. De hecho, existe una buena correlación espacial entre la densidad de población y el uso de aguas subterráneas, tanto en los países desarrollados como en los que están en vías de desarrollo. El regadío con aguas subterráneas ha contribui-

*UNESCO (2009). "Water in a changing world".
Uso agrícola de aguas subterráneas en el periodo
1995-2005 (km³/año)*

do en muchas regiones no sólo a erradicar la pobreza, sino también a producir una elevación del nivel económico, tecnológico, educativo y asociativo de los agricultores. Quizá el caso más paradigmático sea la India, donde se han puesto en regadío con aguas subterráneas más de 40 millones de hectáreas en los últimos cuarenta años. Y ese país ha pasado de padecer hambrunas frecuentes y generalizadas, a convertirse en un importante exportador de grano.

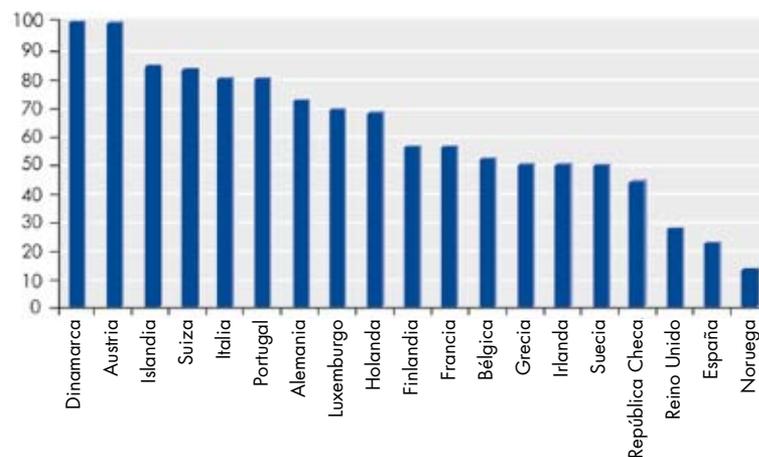
Si se tienen en cuenta, además, los nuevos escenarios producidos por el cambio climático, de aumento de las temperaturas y disminución y mayor concentración de las precipitaciones en algunas zonas como el área mediterránea, se comprende que las aguas subterráneas constituyan un recurso estratégico indiscutible para mitigar los efectos negativos que el cambio climático va a producir en los recursos hídricos.

ALGUNOS EJEMPLOS DE UTILIZACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Si se compara la tasa de extracción de aguas subterráneas respecto a la recarga media anual, se comprueba que en muchos países de Oriente Medio, del sur y norte de África, de Asia, en algunos países de Europa y en Cuba, se están registrando altos niveles de explotación. También se observa un uso intensivo de las aguas subterráneas en algunas regiones de China, India, México, Pakistán y Estados Unidos, que generalmente presentan una gran aridez y una alta densidad de población.

La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA), destaca la importancia que las aguas subterráneas tienen en Europa como fuente de abastecimiento público. Así, en muchos países de Europa, la utilización de aguas subterráneas para usos urbanos es superior al 70%. La EEA reconoce, por tanto, su enorme importancia como fuente de bajo coste y de gran calidad. En España, este porcentaje oscila entre el 20 y 30% en función de las condiciones climáticas, que es uno de los más bajos de los países de Europa.

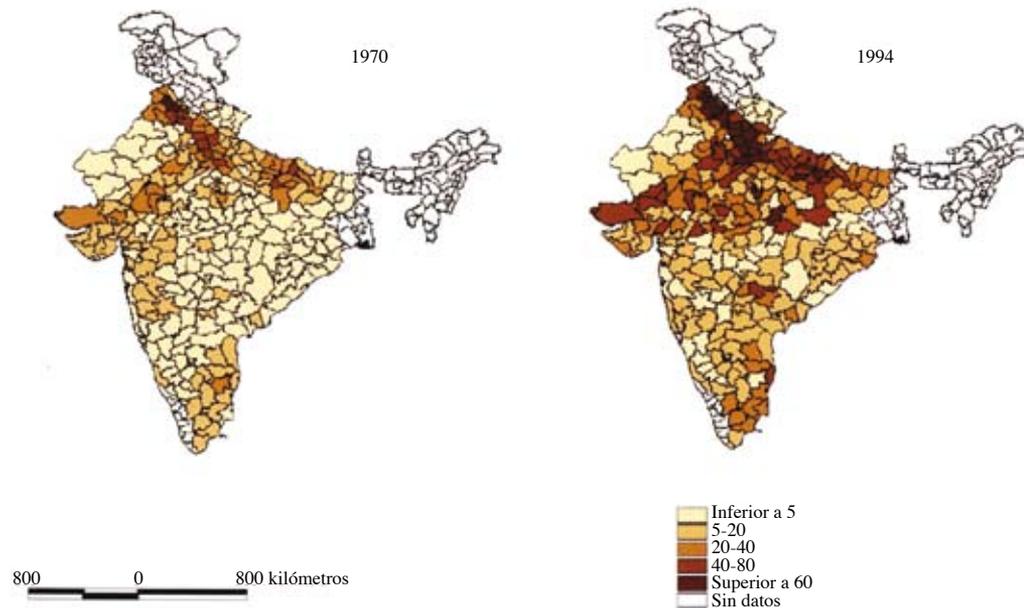
Tailandia, con una superficie de 513.000 km² y una población de 63 millones de habitantes, posee abundantes recursos hídricos. El total de recursos hídricos renovables asciende a 200 km³. El acceso a



Llamas, R., Fornés, J. M., Hernández-Mora, N. & Martínez Cortina, L. (2001). "Aguas subterráneas: retos y oportunidades". Porcentaje de agua subterránea que se utiliza para abastecimiento urbano, en diferentes países europeos

un agua segura y a un abastecimiento básico, se sitúa por encima del 90%, tanto en zonas rurales como urbanas. La superficie cultivada, 30.000.000 ha, representa casi el 60% de la superficie total del país; la mitad de la superficie cultivada corresponde al arroz.

En México, con una población próxima a los 100 millones de habitantes en 1998, se utilizaron 72,2 km³ de agua, de los cuales el 40% era de origen subterráneo (28,5 km³). Las aguas subterráneas suponen el 34% del agua total utilizada en la agricultura, el 70% del agua potable para suministro urbano, y el 60% del agua destinada a la industria. En la ciudad de México, con una población próxima a los 9 millones de habitantes, el 55% del agua potable para uso doméstico es de origen subterráneo.



Deb Roy, A. & Shah, T. (2003). "Intensive use of groundwater. Challenges and opportunities". Porcentaje de la superficie regada con aguas subterráneas respecto a la superficie total cultivada, en 1970 y 1994

Estados Unidos, con una población de 300 millones de habitantes, utilizaba 471 km³ de agua en 1995, de los cuales el 22% era de origen subterráneo (105 km³). La mayor parte del agua subterránea se destina a la agricultura y ganadería (67,3%), mientras que para abastecimiento a la población se requiere el 20% y para la industria el 7,5% del total de agua subterránea.

El caso de la India merece una mención especial ya que cerca del 80% del agua potable para abastecimiento de poblaciones en zonas rurales, es de origen subterráneo. Las aguas subterráneas constituyen la columna vertebral de la agricultura de regadío en la India. Así, gracias a la Revolución Verde, el 70% de la producción agrícola nacional está sostenida por las aguas subterráneas. En términos absolutos, la superficie de los cultivos de regadío con aguas

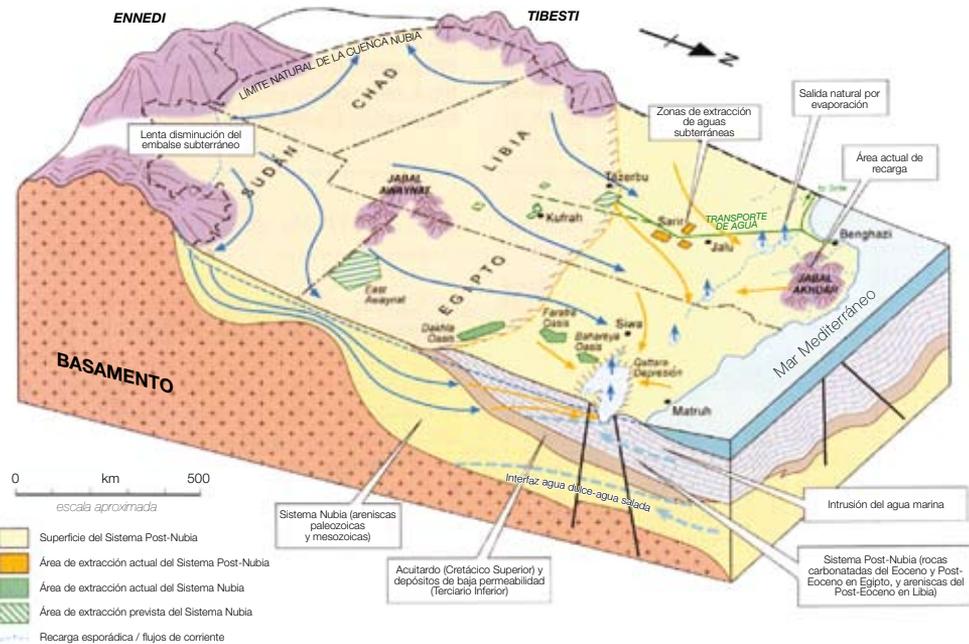
subterráneas ha aumentado de 13.000.000 ha a 27.000.000 ha, en el periodo 1970-1990, es decir, ha experimentado un incremento del 105%. En ese mismo periodo de tiempo, la superficie de los cultivos de regadío con aguas superficiales ha aumentado de 16.000.000 ha a 21.000.000 ha, lo que supone un incremento del 28%. Actualmente se riegan casi 50 millones de hectáreas con aguas subterráneas en la India.

Japón utilizó cerca de 92 km³ de agua en 1994, de los cuales el 84% procedía de agua superficial y el 16% de las aguas subterráneas. El principal uso de las aguas subterráneas fue el industrial (32%), seguido del abastecimiento a poblaciones (25,7%), agricultura (24,6%), piscicultura (11,4%) y construcción (6,2%).

ACUÍFEROS COMPARTIDOS

Las aguas subterráneas no respetan las fronteras administrativas. La mayor parte de los recursos hídricos subterráneos no renovables se encuentran en acuíferos transfronterizos de gran tamaño.

El sistema acuífero de areniscas de Nubia se extiende a lo largo de una superficie de 2.000.000 km² que abarca varios países: este de Libia, Egipto, noreste de Chad y norte de Sudán. Se denomina “sistema” porque consiste en una serie de depósitos continentales paleozoicos, mesozoicos y cenozoicos, interconectadas lateral y verticalmente. Estas formaciones geológicas almacenan agua dulce aunque pueden llegar a ser muy salinas hacia el norte. La dirección del flujo subterráneo es desde el sur hacia el norte, y las descargas naturales del agua subterránea se producen en numerosas depresiones a lo largo de las regiones costeras del Mar Mediterráneo.



Puri, S. & El Naser, H. (2003). “Intensive use of groundwater. Challenges and opportunities”.
Bloque diagrama del sistema acuífero de areniscas de Nubia

Nombre	Área (millones km ²)	Volumen (1.000 millones m ³)	Continente
Sistema acuífero de areniscas de Nubia	2.0	75.000	África
Sistema acuífero del Sahara Norte	0.78	60.000	África
Sistema acuífero de las Llanuras Altas	0.45	15.000	América del Norte
Sistema acuífero Guaraní	1.2	30.000	América del Sur
Sistemas acuíferos de la Llanura del Norte de China	0.14	5.000	Asia
Gran Cuenca Artesiana	1.7	20.000	Australia

UNESCO (2003). “Water for People, Water for Life”. Acuíferos transfronterizos de gran tamaño

El agua subterránea en ESPAÑA



ACUÍFEROS Y MASAS DE AGUA SUBTERRÁNEA*

En función de las características litológicas e hidrológicas del territorio peninsular e insular, los acuíferos se han agrupado en:

- a) *Acuíferos detríticos*: compuestos por materiales sueltos o semiconsolidados, tales como gravas, arenas y limos, que tapizan los fondos de valle de los principales ríos, como el Ebro y Guadalquivir, y los depósitos de similar naturaleza que se extienden por las grandes mesetas del Duero y Tajo, y por las zonas litorales tales como los deltas del Llobregat o del Ebro, o las planas de Castellón o Valencia, entre otras. Estos son aprovechados para abastecimiento a las poblaciones e industrias y especialmente en la agricultura de regadío.
- b) *Acuíferos carbonatados*: se trata de materiales calizos más o menos karstificados. Afloran en el sector oriental y meridional de la península e Islas Baleares.
- c) Por último, en el sector occidental de la península aparecen materiales catalogados genéricamente como *impermeables* o de muy baja permeabilidad, pero que contienen acuíferos de interés local. En su gran mayoría, se trata de terrenos con rocas ígneas (granitos y rocas afines) y metamórficas (pizarras y similares). Hay decenas de miles de manantiales y pozos en esas zonas, que abastecen a pequeños núcleos de población e industrias agropecuarias y de otro tipo; tienen por ello, una gran importancia.

MASA DE AGUA SUBTERRÁNEA: según la Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, es “un volumen claramente diferenciado de aguas subterráneas en un acuífero o acuíferos”.

Terraza fluvial (Teruel)

En las Islas Canarias los acuíferos están vinculados a rocas de naturaleza volcánica. Una gran parte del agua que se utiliza en estas islas es de origen subterráneo. En el interior de la península también aparecen formaciones volcánicas acuíferas, aunque de menor entidad, en Olot y en el Campo de Calatrava.

RESERVAS Y RECURSOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

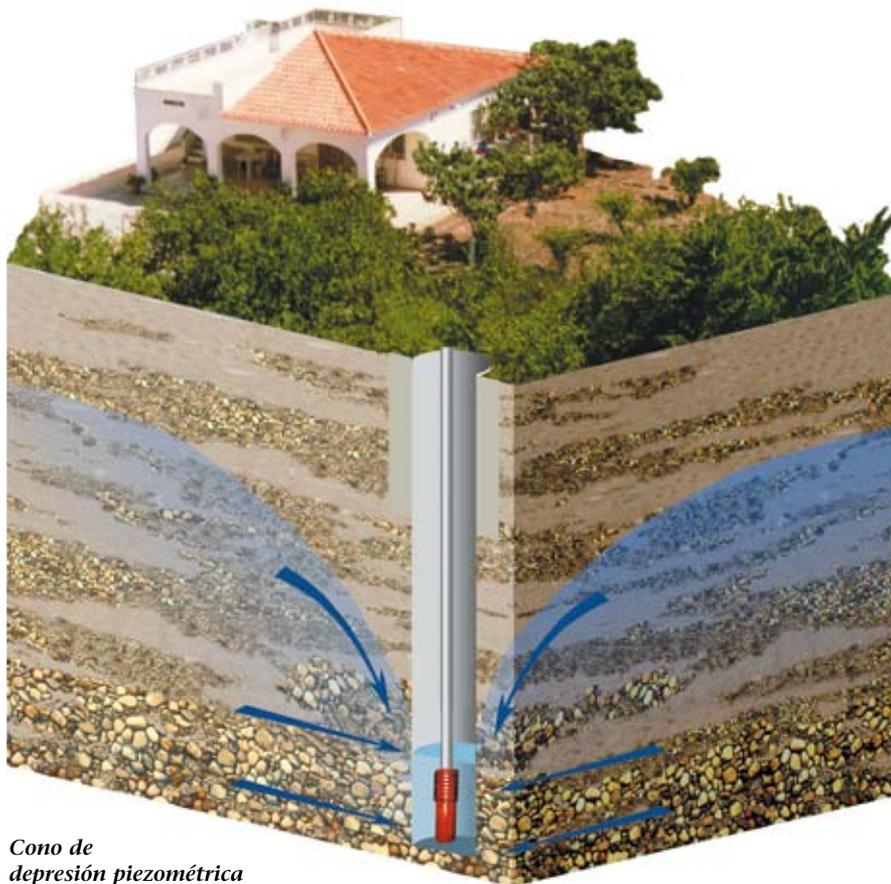
En cierto modo, un acuífero podría asimilarse a un embalse superficial en el que se pueden cuantificar flujos de entrada y de salida, y un almacenamiento. Sin embargo, hay diferencias notables entre uno y otro:

1ª Los acuíferos, en general, soportan los periodos de sequía más favorablemente que los embalses superficiales, debido a su elevada capacidad de almacenamiento con respecto a la renovación anual, o lo que es equivalente, al mayor tiempo medio de residencia* del agua en el acuífero. La cantidad de agua subterránea



dulce y extraíble que hay en España, teniendo en cuenta sólo el agua almacenada hasta profundidades de 100 ó 200 metros en los principales acuíferos, es de unas 3 a 6 veces mayor (180.000 a 300.000 hm³) que la capacidad de almacenamiento de las más de 1 200 presas que existen actualmente en España (más de 55.000 hm³).

El agua subterránea en España



Cono de depresión piezométrica en un bombeo

2ª La amplia distribución de las masas de agua subterránea, que cubren más de dos tercios de todo el territorio peninsular e insular, permite atender las demandas con un menor coste de infraestructura de captación y transporte al lugar de utilización, y sin necesidad de grandes obras de regulación. A estas condiciones favorables

hay que añadir, además, el que no suele ser necesaria la instalación de plantas de tratamiento debido a la buena calidad química y bacteriológica de estas aguas, lo que disminuye su coste de aprovechamiento.

Hay que tener en cuenta que muchas áreas españolas definidas como *zonas sin acuíferos*, están constituidas por materiales de reducida permeabilidad que localmente pueden tener un gran interés, tanto para abastecer a pequeños núcleos de población, como para usos agrícolas e industriales; claros ejemplos son los casos de Galicia, Extremadura o la Sierra de Madrid, donde existe un número relevante de pequeños acuíferos. Se puede, pues, afirmar que España es un país con importantes recursos en aguas subterráneas, tanto en cantidad como en calidad.

Las aguas subterráneas renovables están estimadas, para la totalidad de los acuíferos españoles, entre 20.000 y 30.000 hm³ por año; esta cifra representa respectivamente entre el 18% y el 27% de la aportación hídrica* total (escorrentía total), estimada en 110.000 hm³/año.

APORTACIÓN HÍDRICA: volumen de agua recibido por una cuenca vertiente en un determinado periodo de tiempo. En régimen natural, dicha aportación coincide con el volumen total de agua descargado en un lugar determinado de dicha cuenca.

TIEMPO DE RESIDENCIA: tiempo medio que permanece el agua subterránea en un acuífero. Equivale al cociente entre el volumen de agua almacenada y la recarga anual.

ADMINISTRACIÓN PÚBLICA DEL AGUA

En la Ley de Aguas de 1879, el propietario del agua subterránea era quien la alumbraba, fuese o no propietario del terreno; nadie podía alumbrarla en terreno ajeno sin permiso de su propietario. Esto se mantuvo hasta la promulgación de la Ley 29/1985, de Aguas. En esta Ley, las aguas subterráneas son consideradas públicas, con las excepciones hechas en las Disposiciones Transitorias, dirigidas a la preservación de situaciones jurídicas anteriores a su entrada en vigor. La práctica ha permitido constatar las dificultades de aplicabilidad en ciertos casos.

De ahí que, las Cortes aprobaran la Ley 46/1999 que modifica la Ley 29/1985, en aquellos aspectos donde se detectaron carencias o dificultades (ver Texto Refundido de la Ley de Aguas, aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio).

A raíz de la experiencia de la sequía padecida en España en los primeros años del decenio de 1990, se impone la búsqueda de otras opciones que permitan, de un lado, incrementar la producción de agua mediante la utiliza-

ción de nuevas tecnologías (desalación y reutilización de aguas residuales) y, de otro, potenciar la eficiencia en el empleo del agua, para lo que sería necesario la flexibilización del régimen concesional existente a través de la introducción del contrato de cesión de derechos al uso del agua. Asimismo, se incentivan políticas de ahorro de agua, estableciendo la obligación general de medir los consumos de agua mediante sistemas homologados de control, o por medio de la fijación administrativa de consumos de referencia para regadíos.

El gran volumen de agua que por lo general almacenan los acuíferos, permite habitualmente mantener cubierta una demanda, e incluso atender incrementos temporales de la misma con mayor elasticidad y garantía que con embalses superficiales, sujetos en mayor medida a la incertidumbre de las épocas de lluvias



Mapa con la distribución de las demarcaciones hidrográficas en relación con los límites de las Comunidades Autónomas españolas (mayo 2009)

La organización de la Administración Pública del Agua se fundamenta principalmente en la demarcación hidrográfica, en los órganos de gobierno, en el Consejo Nacional del Agua, y en el Comité de Autoridades Competentes. Esto es así cuando la cuenca hidrográfica excede el ámbito territorial de una Comunidad Autónoma (se denomina cuenca intercomunitaria*). En caso contrario, es decir, cuando la cuenca sea intracomunitaria*, la organización corresponde a la Comunidad Autónoma, correspondiente.



Regadío por goteo con aguas subterráneas en la provincia de Huelva

CUENCAS INTERCOMUNITARIAS: cuencas hidrográficas cuyo ámbito territorial se encuentra comprendido en más de una Comunidad Autónoma.

CUENCAS INTRACOMUNITARIAS: cuencas hidrográficas comprendidas íntegramente en el ámbito territorial de una sola Comunidad Autónoma.

REGISTRO Y CATÁLOGO DE APROVECHAMIENTOS DE AGUA

Los registros administrativos son una de las formas básicas de protección del dominio público hidráulico. Tienen como objetivo favorecer la seguridad jurídica, constituir un medio de prueba y dispensar protección a los aprovechamientos en ellos inscritos. Disponer de un inventario* completo de las captaciones de aguas subterráneas es un mandato legal de utilidad fundamental para la administración y gestión de los recursos hídricos, de acuerdo con los planes hidrológicos. A través de su actualización permanente se contribuye a tener un mayor conocimiento hidrogeológico y funcional de los acuíferos.

El antecedente más significativo del actual Registro de Aguas es el Registro de Aprovechamientos de Aguas Públicas creado en 1901. La finalidad de este antiguo registro, de carácter obligatorio y declarativo, era que se inscribiesen en él todos los aprovechamientos privativos de aguas públicas, de forma que la Administración pudiese tener constancia efectiva de los derechos de los diferentes usuarios a la utilización de las aguas, y se dispusiese ordenadamente de la información relativa a la constitución, modificación y extinción de los aprovechamientos para evitar abusos y la pérdida de la riqueza que representa el agua.

En las disposiciones transitorias de la Ley de Aguas, se estableció un plazo de tres años, que concluyó el 31 de diciembre de 1988, para adecuar al nuevo marco jurídico los aprovechamientos existentes en el momento de su entrada en vigor, y que eran considerados como privados por la legislación anterior. En dicho plazo, se establecía la opción de inscribir el aprovechamiento como temporal de aguas privadas por un plazo máximo de 50 años, respetándose sus derechos,

siempre que se mantuviera el mismo sistema de explotación existente en 1985, al final de cuyo plazo se tendría preferencia para obtener la correspondiente concesión. En caso de no aceptar esta opción, se establecía la inclusión en el Catálogo de Aguas Privadas, aunque en este caso no se dispusiera de protección administrativa. Con la entrada en vigor de la Ley del Plan Hidrológico Nacional, se cerró definitivamente el plazo de nuevas solicitudes de inclusión en el Catálogo, el 26 de octubre de 2001.

INVENTARIO DE CAPTACIONES SUBTERRÁNEAS O PUNTOS DE AGUA: relación del conjunto de manantiales, surgencias naturales, pozos y sondeos entre otros, ubicados en un determinado ámbito geográfico, tanto si se explotan como si no, y cuyos datos son recogidos en estadillos que reflejan su situación administrativa, técnica e hidrogeológica.

De acuerdo con lo dispuesto en el Reglamento del Dominio Público Hidráulico (el actualmente vigente fue aprobado por el Real Decreto 9/2008, de 11 de enero de 2008, por el que se modifica el anterior Reglamento del Dominio

Público Hidráulico de 1986), las diferentes situaciones registrales se estructuran en las siguientes:

A) Registro de aguas:

- Sección A: concesiones de aguas superficiales o subterráneas.
- Sección B: pozos y manantiales con caudal inferior a 7.000 m³/año.
- Sección C: explotaciones de aguas subterráneas anteriores a 1986 y que optaron por la inscripción en el Registro de aguas como aprovechamientos temporales de aguas privadas durante 50 años, pero con vocación de públicas.

B) Catálogo de aprovechamientos de aguas privadas: se inscriben los aprovechamientos en los que se mantiene la titularidad privada.



Captaciones subterráneas más frecuentes: a la izquierda, surgencias naturales (manantiales); en el centro, pozo de gran diámetro; y a la derecha, sondeo instalado de explotación (en éste se observa el dispositivo para el control del nivel piezométrico y la sonda de control)

El agua subterránea en España

USOS DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Los usos del agua pueden ser consuntivos o no. Los primeros son aquellos que su utilización implica la pérdida de una parte del agua empleada. Entre estos se encuentran los abastecimientos urbanos, que devuelven al ciclo hidrológico del orden del 80% del agua servida, y los regadíos, cuyo retorno se estima en un 20%. Por el contrario, los usos no consuntivos devuelven casi todo el volumen empleado, aunque, por lo general, la calidad y el régimen de disponibilidad pueden verse alterados. Como ejemplo de estos se puede resaltar la producción de energía eléctrica, la acuicultura, la navegación, los caudales con fines ambientales y paisajísticos, entre otros, y en cierta medida, la refrigeración.

Para estimar los volúmenes realmente suministrados y consumidos en los diferentes usos, el procedimiento indirecto es el más común. Consiste en aplicar a las

poblaciones, industrias y superficies de riego, unos valores teóricos de dotación (establecidos por los Planes Hidrológicos de cuenca), en función de determinados factores como pueden ser el tamaño de la población, los tipos de industrias, las clases de cultivo, las características climáticas y el estado de las infraestructuras. Se supone que las cantidades así obtenidas se corresponden con los consumos reales.

Hay una notable carencia de estadísticas sobre usos*, demandas* y necesidades* de agua, lo que dificulta la estimación de los volúmenes reales utilizados.

En España, la demanda total de agua (superficial más subterránea) para usos consuntivos supera los 30.000 hm³/año. Ésta se reparte entre los usos municipales, la agricultura de regadío y la industria.

La agricultura demanda al año unos 24.500 hm³, es decir, aproximadamente el 80% del total. El abastecimiento urbano, incluyendo las industrias conectadas a la red de la ciudad, consume alrededor del 15% del total; el 5% restante corresponde a los usos industriales y de generación energética no incluidos en la red urbana.



• **Abastecimiento urbano:** el abastecimiento de agua a las poblaciones es un servicio básico incuestionable para la sociedad de nuestros días y de obligada e irrenunciable prestación por los poderes públicos. La Ley de Aguas así lo manifiesta y considera siempre como prioritario el uso del agua para esta finalidad.

ABASTECIMIENTO URBANO
CON AGUAS SUBTERRÁNEAS (2005)

Comunidad Autónoma	hm ³ /año
Andalucía	214,5
Aragón	13,1
Canarias	98,0
Cantabria	8,5
Castilla y León	90,1
Castilla-La Mancha	108,1
Cataluña	213,6
Comunidad de Madrid	20,6
Comunidad Foral de Navarra	45,0
Comunidad Valenciana	292,0
Extremadura	28,5
Galicia	72,6
Islas Baleares	97,6
La Rioja	4,5
País Vasco	27,9
Principado de Asturias	15,0
Región de Murcia	17,0
Ceuta y Melilla	12,3
Total	1.378,9

El volumen de agua utilizado en España para suministro de población, incluyendo las industrias conectadas a la red urbana, se sitúa en torno a 4.700 hm³/año, de los cuales entre 1.300 y 1.500 hm³ son de origen subterráneo. Con agua subterránea se abastecen del orden de 13 millones de habitantes, es decir, casi el 30% de la población nacional. Existen muchas ciudades donde todo o gran parte del suministro urbano está cubierto por aguas subterráneas: Castellón, Palma de Mallorca o Almería, entre otras. En términos generales, el 70% de los núcleos urbanos se abastece con aguas subterráneas. El valor medio del consumo doméstico se encuentra próximo a los 170 L/hab/día.

Las pérdidas de agua que se producen a lo largo de las infraestructuras de distribución, pueden superar en algunos núcleos el 35%, y ser del 20% en el mejor de los casos. Existe, además, poco control del agua utilizada para el riego de calles y jardines en pueblos y ciudades.

• **Uso industrial:** se trata del agua empleada para la producción industrial, que comprende la utilización específica en los productos y en los procesos de fabricación, refrigeración, acondicionamiento y conservación. También incluye la satisfacción de las necesidades inducidas por las correspondientes actividades auxiliares, tales como alimentación e higiene del personal, mantenimiento, seguridad de las instalaciones, y otros. Por otra parte, hay que tener en cuenta el agua que se utiliza para la refrigeración de centrales eléctricas. El abastecimiento industrial con aguas subterráneas es de unos 890 hm³/año. La mayor utilización del agua subterránea en la industria no conectada a redes urbanas corresponde a las Cuencas Internas de Cataluña, Júcar y Ebro.

El agua subterránea en España

ABASTECIMIENTO INDUSTRIAL CON AGUAS SUBTERRÁNEAS (2006)

Comunidad Autónoma	hm ³ /año
Andalucía	106,6
Aragón	86,8
Canarias	15,5
Cantabria	6,9
Castilla y León	65,7
Castilla-La Mancha	31,5
Cataluña	251,1
Comunidad de Madrid	24,9
Comunidad Foral de Navarra	27,0
Comunidad Valenciana	217,9
Extremadura	0,6
Galicia	12,5
Islas Baleares	4,1
La Rioja	1,3
País Vasco	4,1
Principado de Asturias	17,2
Región de Murcia	16,0
Total	889,7

• **Usos agrarios:** comprenden los propiamente agrícolas y los ganaderos. Existen algo más de 3,6 millones de hectáreas de regadío, de las cuales se estima que el 62% se riegan con agua superficial (2.263.000 ha), el 34% con agua subterránea (1.232.000 ha), y el 4% tiene un origen mixto (145.000 ha).

El total de agua demandada para regadío es del orden de 24.500 hm³/año, de los cuales aproximadamente 20.200 hm³/año corresponden a aguas superficiales y 4.300 hm³/año a aguas subterráneas. En España, la demanda hídrica ganadera es muy poco significativa en comparación con la demanda agrícola.

A igualdad de agua disponible, el volumen de inversiones en infraestructura de aguas subterráneas es más reducido que el de las grandes obras hidráulicas. La libertad en la explotación y gestión hasta la Ley de Aguas de 1985, y el desarrollo técnico en los sistemas de impulsión y electrificación rural, han sido factores que han propiciado su aprovechamiento.

La iniciativa privada ha sido la gran impulsora del desarrollo del regadío con aguas subterráneas. El 89% de la superficie regada con estas aguas corresponde a la iniciativa privada, frente al

37% en el regadío con aguas superficiales.



El regadío con aguas subterráneas es, en general, más eficiente debido al mejor uso y ahorro del agua como consecuencia de un mayor ajuste entre el coste real

La explotación minera requiere en ocasiones el bombeo de agua para el desarrollo de su actividad. Este agua subterránea es utilizada en sus diferentes procesos productivos

REGADÍOS CON AGUAS SUBTERRÁNEAS
(CENSO AGRARIO 1999)

Comunidad Autónoma	Superficie (ha)	Dotación (m ³ /ha/año)	Volumen (hm ³ /año)
Andalucía	310.504	2.998	930,9
Aragón	24.305	3.146	76,5
Canarias	20.914	10.003	209,2
Cantabria	79	2.000	0,2
Castilla y León	161.969	2.797	453,0
Castilla- La Mancha	365.242	2.500	913,1
Cataluña	53.534	4.474	239,5
Comunidad de Madrid	5.207	6.430	33,5
Comunidad Foral de Navarra	2.979	2.856	8,5
Comunidad Valenciana	146.816	6.376	936,1
Extremadura	27.012	2.000	54,0
Galicia	11.399	1.500	17,1
Islas Baleares	17.815	5.950	106,0
La Rioja	4.567	3.000	13,7
País Vasco	982	1.935	1,9
Principado de Asturias	877	2.509	2,2
Región de Murcia	77.420	3.892	301,3
Total	1.231.621	3.786	4.296,7

de la inversión y el precio del agua. Esto no ocurre en el caso de las aguas reguladas superficialmente, cuyo precio dista mucho de su coste real. Otro factor a tener en cuenta es que la gran mayoría de los regadíos con aguas subterráneas se han desarrollado a partir de la década de 1960, lo que ha permitido utilizar sistemas más modernos de riego.

La presencia de aguas subterráneas en zonas de clima favorable para la agricultura, como el caso del litoral mediterráneo, ha dado lugar a la puesta en regadío de importantes extensiones de terreno con cultivos de alta rentabilidad económica.

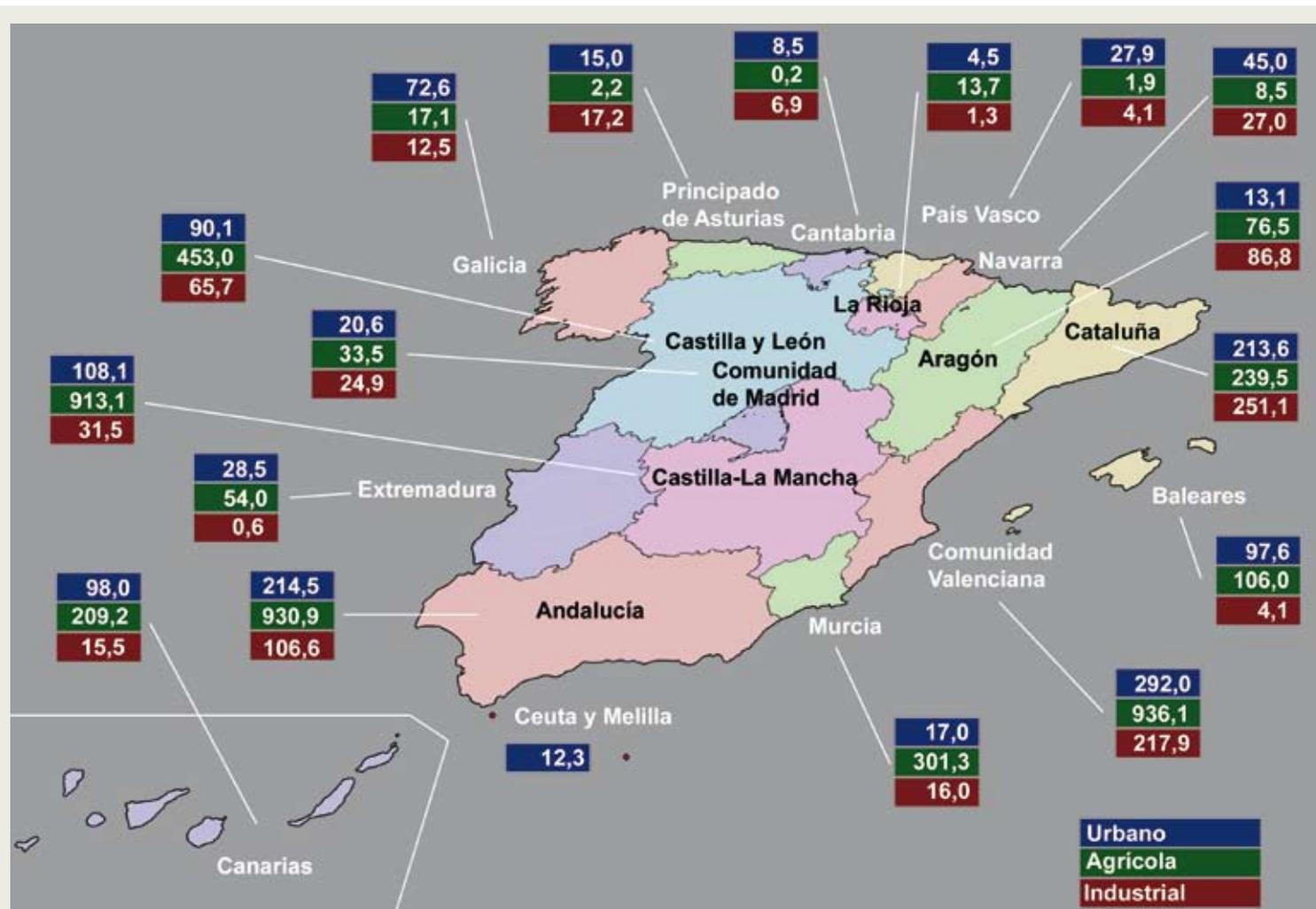
En España, un 35% de la superficie regada con aguas subterráneas utiliza métodos por gravedad, mientras que el 65% aplica riego por aspersión y riego localizado.

• **Usos ecológicos y ambientales:** la estimación del caudal ecológico o ambiental presenta la dificultad de definir el límite hasta el que resulta aceptable modificar el régimen de caudales naturales sin poner en peligro la supervivencia y los niveles normales de las poblaciones acuáticas. Estos caudales ecológicos variarán en función del tipo de río, humedales, deltas o estuarios. En el caso de los ríos, las condiciones generales de circulación de caudales se establecen en los Planes Hidrológicos de cuenca.

En cuanto a los requerimientos hídricos de los humedales, sin perjuicio de que pueda proponerse un volumen mínimo a reservar de los recursos totales nacionales, habrá que determinar para cada humedal la gestión adecuada para su conservación, teniendo en cuenta las entradas de agua y la situación del nivel freático del acuífero. Esta es precisamente la labor que se está realizando en el Inventario Nacional de Humedales, exigencia de la Ley 4/1989 de Conservación de la Naturaleza.



El agua subterránea en España



Usos de las aguas subterráneas en España (hm³/año).

• **Usos recreativos:** se trata de aprovechamientos del dominio hidráulico muy variados, que tienen en común el objetivo de satisfacer los requerimientos de ocio y esparcimiento de la sociedad. Desde el punto de vista de la utilización de los recursos hídricos, se pueden distinguir tres grandes categorías:

- Usos recreativos que implican derivar agua del medio natural (riego de campos de deporte, piscinas, complejos deportivos). En general, suponen un consumo de agua moderado; en ocasiones estos usos son difíciles de separar del uso urbano. El riego de los campos de golf suele considerarse incluido en la demanda de regadío, y puede suponer una demanda de agua importante en muchas áreas.
- Actividades de ocio que usan el agua en embalses, ríos y parajes naturales de un modo no consuntivo (vela, windsurf, remo, piragüismo, baño, pesca deportiva, rafting).
- Usos escénicos que están relacionados con el agua de un modo indirecto, utilizándola como centro de atracción o punto de referencia para actividades afines (acampadas, excursiones, caza, senderismo).

DEMANDA DE AGUA: volumen de agua que es requerido para los diferentes usos, en las condiciones económicas en que este agua es ofrecida.

NECESIDAD DE AGUA: cantidad y calidad de agua que resulta imprescindible para alcanzar los objetivos de los diversos usos.

USO DEL AGUA: aplicación concreta del agua, es decir, cantidad de agua realmente empleada. En este sentido es un concepto equivalente a suministro.

COMUNIDADES DE USUARIOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

El proceso asociativo para gestionar el uso del agua superficial tiene una larga tradición en España. Así, el Tribunal de las Aguas de Valencia se remonta a la segunda mitad del siglo XIII. Sin embargo, en el caso de las aguas subterráneas —privadas hasta la entrada en vigor de la Ley de Aguas de 1985—, su libre acceso y utilización no ha propiciado este tipo de actuación asociativa.

Las comunidades de usuarios pueden clasificarse, en función de su origen, en tres grupos:

a) *Comunidades de regantes tradicionales o históricas.* Son las constituidas anteriormente a 1900 para aprovechar las aguas superficiales. El origen de muchas de ellas se remonta a la Edad Media. Generalmente están situadas en zonas de vega de los ríos y utilizan tecnologías tradicionales de riego, tales como a manta o por gravedad.

b) *Comunidades de regantes de iniciativa pública.* Éstas se constituyeron por iniciativa pública para explotar los grandes embalses y otras obras de regulación de aguas superficiales, durante los últimos 100 años.

c) *Asociaciones de usuarios de iniciativa privada.* Este grupo incluye a los usuarios organizados de aguas subterráneas.



El control de un sondeo puede hacerse a través de sistemas de seguimiento remoto alimentado por energía solar

El agua subterránea en España

Existe una gran variabilidad en cuanto a las características y funcionamiento de las distintas comunidades de usuarios de aguas subterráneas. Su tamaño y complejidad organizativa varía desde grupos de unos pocos usuarios que utilizan un mismo pozo, hasta comunidades generales que engloban a comunidades de regantes, municipios y agricultores individuales.

Las Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas (CUAS) son corporaciones de derecho público, adscritas al Organismo de cuenca, a quien compete tutelarlas, cuidar de su funcionamiento y velar porque se cumplan sus estatutos u ordenanzas por los que se rigen internamente.

Las Ordenanzas o Estatutos no regulan sólo la organización de las propias Comunidades de Usuarios, sino también la explotación de los bienes de dominio público hidráulico que se integran en el aprovechamiento. Sus disposiciones tienden a facilitar la gestión del agua e informar y asesorar a sus miembros. Se trata, por tanto, de una institución esencial para llevar a cabo una buena política del agua en España.

Las CUAS surgen principalmente por iniciativa de los propios usuarios de aguas subterráneas. Sin embargo, cuando el interés general lo exija —por ejemplo cuando un acuífero es sometido al procedimiento de declaración de sobreexplotación—, los Organismos de cuenca pueden imponer su constitución.

VALOR ECONÓMICO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El agua tiene un valor ambiental fundamental al posibilitar la vida en la Tierra. Es impulsora del desarrollo industrial, agrícola y fuente de energía. La utilización de las aguas subterráneas ha

favorecido el desarrollo de polígonos industriales y el regadío de primor en numerosos sectores, contribuyendo a elevar, de forma espectacular en ocasiones, el nivel de vida de ciertas áreas del levante, sureste y sur peninsular, como es el caso de Valencia, Murcia, Almería y Huelva. Situación similar han gozado Albacete (Mancha Oriental), Ciudad Real (Mancha Occidental), e Islas Canarias, entre otras.

El hecho de que cualquier ciudadano pueda disponer en su casa de un grifo por donde sale agua en la cantidad y calidad requeridas, conlleva un coste que es necesario soportar. El agua tiene, por tanto, un precio para compensar los gastos necesarios para su captación, tratamiento, distribución y depuración del agua residual (en muchos casos, la mitad de la factura del agua que se paga en una ciudad, se dedica a dicha depuración).

Hoy en día, en los países desarrollados se tiende a que el usuario pague los costes directos (obras de regulación, transporte, depuración, redes eléctricas o su conservación y amortización, etc.), así como los costes indirectos, difíciles de evaluar económicamente pero de gran repercusión social, cultural y ambiental.

La tradición de la Administración Pública como motor financiador y gestor de la política hídrica, sobre todo en lo referente a las aguas superficiales, ha generado en el pasado una oferta de agua barata y subvencionada, principalmente en los regadíos. En contraste con las aguas superficiales, las aguas subterráneas casi siempre se han explotado merced a la iniciativa privada, que ha asumido notables costes de construcción, mantenimiento de captaciones y bombeo del agua. Esto ha supuesto un uso más eficiente de las aguas subterráneas, pero por otro lado, en ciertas ocasio-

PRECIOS DEL AGUA PARA ABASTECIMIENTO URBANO EN DISTINTAS CIUDADES ESPAÑOLAS (en €/m³) ⁽¹⁾

Ciudad	Precio	Ciudad	Precio	Ciudad	Precio	Ciudad	Precio
Palma de Mallorca	1,98	Huesca	1,16	Pontevedra	0,96	Jaén	0,73
Palmas de G. Canaria	1,87	Lérida	1,15	Logroño	0,94	Soria	0,72
Barcelona	1,61	Zamora	1,13	Albacete	0,94	Burgos	0,70
S. Cruz de Tenerife	1,57	Madrid	1,11	Bilbao	0,93	Vitoria	0,65
Cádiz	1,47	Gerona	1,07	Lugo	0,86	Ávila	0,65
Alicante	1,46	Almería	1,05	Toledo	0,84	Guadalajara	0,62
Murcia	1,37	Oviedo	1,04	Segovia	0,83	Palencia	0,59
Córdoba	1,31	Salamanca	1,04	San Sebastián	0,83	Santander	0,58
Sevilla	1,28	Badajoz	1,04	Pamplona	0,81	Castellón	0,57
Valencia	1,27	Granada	1,02	Valladolid	0,81	León	0,47
Huelva	1,22	Cáceres	1,02	Zaragoza	0,78		
Teruel	1,21	Cuenca	1,02	La Coruña	0,78		
Tarragona	1,19	Ceuta	0,98	Orense	0,77		
Málaga	1,19	Melilla	0,98	Ciudad Real	0,77		

⁽¹⁾ (OCU, 2006)

Las aguas subterráneas casi siempre se han explotado merced a la iniciativa privada, que ha asumido notables costes de construcción, mantenimiento de captaciones y bombeo de agua. Esto ha supuesto un uso más eficiente de las aguas subterráneas

nes ha producido fuertes descensos de niveles del agua y degradación de algunos acuíferos.

La Junta de Andalucía ha evaluado la rentabilidad del regadío efectuado con aguas subterráneas, comparándolo con los rendimientos de los riegos abastecidos con aguas superficiales, llegando a la conclusión que, en Andalucía, los regadíos con aguas subterráneas son unas cuatro o cinco veces más productivos en dinero, y generan tres o cuatro veces más empleo por metro cúbico de agua utilizada, que los regadíos con aguas superficiales.

El agua subterránea en España

Si bien la Ley de Aguas de 1985 declaró de dominio público la totalidad de las aguas subterráneas, de hecho una gran parte de éstas permanecen en el dominio privado merced a las Disposiciones Transitorias de dicha Ley. La reforma de la Ley de Aguas (Ley 46/1999) regula la creación de centros de intercambio de derechos de uso del agua. Cabe esperar que el centro de intercambio, es decir, la cesión temporal de los derechos a terceros, pueda ser una herramienta que introduzca racionalidad en su gestión. De esta forma, la Administración puede adquirir unos recursos que, bajo su tutela, permita las transacciones.

La experiencia de California durante la sequía de los años ochenta puede resumirse en un volumen de agua *comprado*, fundamentalmente a los agricultores, de 1.000 hm³. Este volumen o *Banco de Agua* estaba gestionado por la Administración hidráulica, que firmaba tres tipos de contratos, vendiéndose el agua a un precio previamente estipulado que invitase a la venta pero sin permitir especulaciones notorias. Una primera modalidad consistía en que el agricultor vendía sus aguas y dejaba de regar. En el segundo tipo de contrato, el agricultor vendía su derecho a tomar aguas superficiales, pero seguía bombeando del acuífero. Y en el tercero, vendía el agua que tenía acopiada en pequeños estanques. La opción más frecuente fue la primera. El *Banco de Agua*, en el caso de California, resultó ser una solución eficaz, pero parcial y coyuntural.

ASPECTOS AMBIENTALES DEL AGUA SUBTERRÁNEA

El agua es un recurso en nada comparable a ningún otro recurso natural, por sus funciones, naturaleza, prestaciones al ser humano y

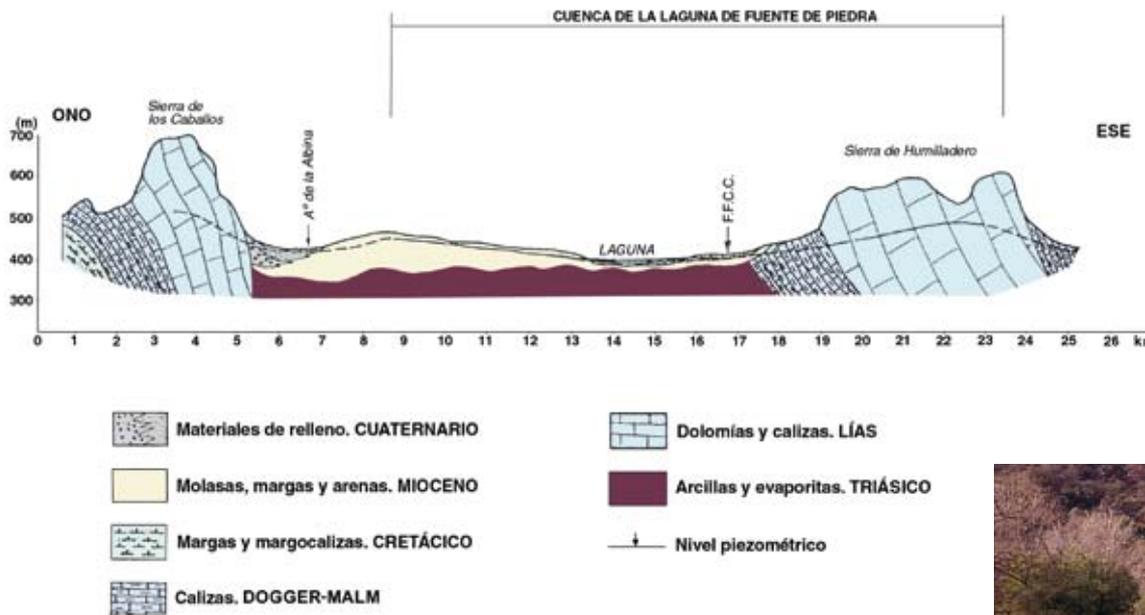
connotaciones estéticas, lúdicas y emocionales. Es parte importante del bienestar natural de cada lugar. Los manantiales y fuentes son, para muchos pueblos, legado histórico, cultural y seña de identidad.

Las aguas subterráneas alimentan muchos ríos, lagos y manantiales; generan zonas de descarga difusa muy variadas denominadas humedales; originan paisajes costeros y de interior de gran particularidad, como marismas, marjales, albuferas, lagunas, tablas, navas y navajos. Finalmente, crean masas de freatofitas*, así como tremedales, tarajales y carrizales, de singular valor estético y ambiental, en especial en los países áridos y semiáridos, y en los esteparios y mediterráneos.



Imagen de satélite en la que se observa el Parque Nacional de Doñana (situado en la zona sur de la masa de agua subterránea de Almonte-Marismas) y la desembocadura del río Guadalquivir

CORTE GEOLÓGICO A TRAVÉS DE LA LAGUNA DE FUENTE DE PIEDRA Y SU ENTORNO



Las surgencias naturales de aguas subterráneas —manantiales y áreas de descarga no puntual— suelen dar lugar a parajes de gran interés, cuya pervivencia depende, de modo directo, de las condiciones y características de esta alimentación hídrica subterránea

Laguna de Fuente de Piedra (Málaga), una de las zonas húmedas más importantes de Europa por la presencia de colonias de flamencos



Lagunas de Ruidera (Ciudad Real). En la cuenca alta del río Guadiana, el drenaje natural de las aguas subterráneas del acuífero carbonatado del Campo de Montiel (en la actualidad masa de agua subterránea de Campo de Montiel), fluye por las lagunas, que a lo largo de 25 km se suceden escalonadas dando lugar a hermosos saltos de agua por la presencia de barreras travertínicas que se intercalan entre ellas, y cuyo origen son los depósitos de carbonato cálcico derivado del aporte de agua subterránea

El agua subterránea en España

Un conocimiento profundo de la hidrogeología de las zonas naturales, que es la base para definir correctamente su funcionamiento hídrico, resulta imprescindible para tomar decisiones que permitan su mejora y garanticen la conservación de los numerosos ecosistemas asociados.

Las surgencias naturales de aguas subterráneas —manantiales y áreas de descarga no puntual— suelen dar lugar a parajes de gran interés cuya pervivencia depende, de modo directo, de las condiciones y características de esta alimentación hídrica subterránea. Entre los ejemplos españoles más relevantes de humedales relacionados en gran parte con las aguas subterráneas destacan, entre otros, los Parques Nacionales de Doñana y de Las Tablas de Daimiel, el Parque Natural de las Lagunas de Ruidera, la Reserva Natural de la Laguna de Fuente de Piedra, o el Refugio de Caza de

la Laguna de Gallocanta (actualmente en trámite de convertirse en Reserva Natural).

El origen del agua de la mayor parte de los ríos proviene tanto de la escorrentía superficial como de la descarga de los acuíferos. La escorrentía superficial se produce principalmente durante el invierno, y es en general, de carácter intermitente y de corta duración. En verano y otoño, cuando el caudal de los ríos es bajo, la mayor parte del agua que circula por sus cauces es de origen subterráneo. Los caudales suelen ser máximos al final del invierno o principios de la primavera, cuando los acuíferos están recargados y, por tanto, tienen los niveles freáticos altos. Desde finales de la primavera hasta bien entrado el otoño, los niveles descienden progresivamente; estos descensos de niveles pueden llegar a producir que cesen las descargas, con la consiguiente desecación de las corrientes fluviales.

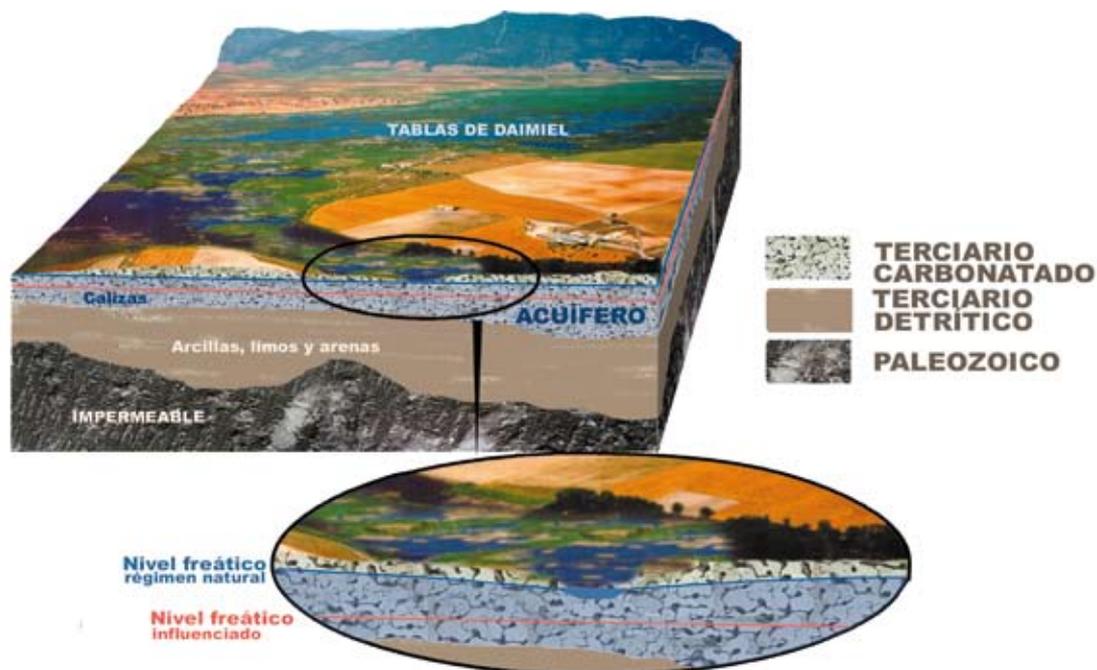
La delimitación y protección de las zonas húmedas están contempladas en la legislación española, en la Ley de Aguas, y en la Ley 4/1989 de Conservación de los Espacios Naturales y de la Flora y Fauna Silvestre.

Se estima que la superficie actual de los humedales españoles es de 1140 km², lo que representa del orden del 30 o 40% de la superficie existente hace 50 años; de ellos, gran parte están relacionados con las aguas subterráneas. Existen numerosos ejemplos de zonas húmedas desaparecidas debido a la acción antrópica, tales como la laguna de La Janda (Cádiz), con cerca de 40 km² de superficie natural, y La Nava (Palencia), con 22 km². También cabría citar, la degradación de la albufera de Valencia, la destrucción de los Ojos del Pontil, en Aragón, y de los Ojos del Guadiana en la Llanura Manchega. Cabe señalar, además, la desaparición de buena parte de los sistemas asociados a las descargas de aguas subterráneas en los barrancos en Gran Canaria.

Los humedales presentan con gran frecuencia una vegetación ligada a descargas de aguas subterráneas. En la mayoría de los casos, existe un componente ascendente del flujo de agua subterránea que contribuye a la alimentación de la zona húmeda. Estos humedales juegan un papel muy relevante en el mantenimiento y conservación de la biodiversidad. Generalmente son de relieve llano, con superficies de agua extensas y poco profundas, muchas veces no permanentes. La vegetación refleja la persistencia de la inundación y el grado de mineralización del agua. Este último factor se debe tanto al tipo de materiales atravesados por los flujos subterráneos, como al tiempo de contacto de estos. Son típicas las grandes gramíneas, ciperáceas y plantas semejantes: *Phragmites australis*, *Scirpus maritimus* y *Scirpus lacustris*, *Typha spp.* y *Cladium mariscum*.

El agua que surge en las fuentes facilita la formación de espacios amenos y, casi siempre, muy gratos para el hombre. Tienen un atractivo especial en las zonas más áridas del terri-

Esquema hidrogeológico del acuífero de la Mancha Occidental (en la actualidad correspondería a las masas de agua subterránea denominadas Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y parte de la de Rus-Valdelobos) en el entorno de las Tablas de Daimiel



torio español, donde destacan por su color y humedad en el reseco paisaje circundante.

Los manantiales permiten atender el suministro de agua potable de gran número de poblaciones y contribuyen al regadío de muchas zonas. Ligadas a estas surgencias se localizan áreas de esparcimiento y recreo. En algunas de ellas, cuyas aguas presentan un carácter termal o minero-medicinal, se ubican lugares de descanso con fines terapéuticos.

Los dos humedales españoles más emblemáticos son los Parques Nacionales de Las Tablas de Daimiel y de Doñana, ambos afectados negativamente por la acción antrópica.

Respecto al primero, al inicio de la década de 1970 constituía el rebosadero natural más importante del conocido acuífero de La Mancha Occidental (en la actualidad correspondería a las masas de agua subterránea denominadas Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y parte de la de Rus-Valdelobos). Este gran acuífero de más de 5.500 km² de superficie, recibía unas aportaciones subterráneas medias de unos 300 hm³ al año y descargaba principalmente por los Ojos del Guadiana. Las Tablas de Daimiel, junto con otros humedales de la Mancha, están catalogados desde 1981 como Reserva de la Biosfera, dentro del programa MaB de la UNESCO. Desde mediados de la década de 1970 hasta finales de la de 1980, se pusieron en regadío con aguas subterráneas más de 100.000 ha, debido

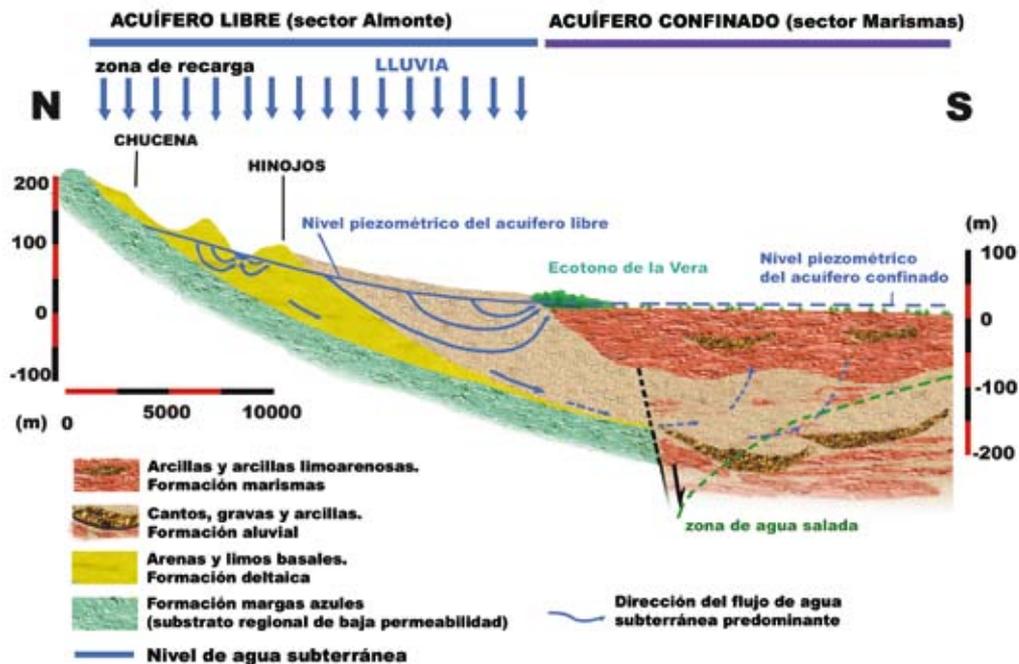
El agua subterránea en España

sobre todo a la iniciativa privada. La renovación media de las aguas subterráneas del antiguamente denominado acuífero de la Mancha Occidental, se estimaba entre 200 y 500 hm³/año, según fueran años secos o húmedos respectivamente, mientras que la extracción de aguas subterráneas alcanzó los 600 hm³/año a finales de la década de 1980, originándose a lo largo de los años un vaciado en el acuífero de 3.000 a 5.000 hm³. Para frenar este uso insostenible, la Administración tomó una serie de medidas encaminadas a conservar el Parque Nacional: se aprobó el Plan de Regeneración Hídrica de Las Tablas de Daimiel en 1987; se declaró el acuífero definitivamente sobreexplotado en diciembre de 1994; y se solicitó a la Unión Europea una subvención durante 5 años (1993-1997) para compensar económicamente a los agricultores que voluntariamente restringieran el volumen de aguas subterráneas extraído (Plan de Compensación de Rentas o Plan de Humedales). La ayuda asignada para este programa agroambiental fue de cerca de 102,2 millones de euros, el 75% financiado con fondos europeos y el 25% a partes iguales entre el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, y la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. Los programas agroambientales se han ido prorrogando hasta el año 2007. En enero de 2008 se aprobó el Plan Especial del Alto Guadiana (PEAG) tal como lo requería la Ley del Plan Hidrológico Nacional de 2001. El PEAG contempla una serie de medidas y programas para tratar de conseguir el buen estado ecológico y químico de las aguas para el año 2015, y la recuperación de los niveles para el año 2027. Para ello hay un presupuesto cercano a los 5.000 M€.

Otro espacio natural de gran relevancia lo constituye el Parque Nacional de Doñana y el Parque Natural que lo rodea.



Masa de agua subterránea de Almonte-Marismas. En la parte superior, se reproduce una antigua casa de los primitivos moradores de la zona; abajo, lagunas peridunares (Navazo y Charco del Toro) formadas por el drenaje del agua infiltrada a través de las dunas que las bordean



Masa de agua subterránea de Almonte-Marismas: en la parte superior, está representado un corte hidrogeológico de dirección Norte-Sur. En él se observa la existencia de un acuífero libre (Almonte) y otro en carga (Marismas). A la derecha, detalle del ecotono de La Vera, zona de contacto entre el acuífero libre y la marisma

Se localiza en la masa de agua subterránea Almonte-Marismas, que tiene una superficie del orden de 2.300 km². Está formado por un conjunto de niveles detríticos permeables en contacto entre sí, que se comportan como un acuífero libre, a excepción del sector localizado bajo las marismas, en donde funciona como confinado.

La existencia del Parque Nacional de Doñana depende, entre otros factores, del agua superficial y subterránea. La primera aporta caudales

FREATOFITAS O PLANTAS FREATÓFILAS:

plantas cuya toma principal de agua proviene directamente de la capa freática, con la que sus raíces están siempre en contacto a través de la franja capilar. Suelen ubicarse en la ribera de los ríos o en cursos de agua secos, donde el nivel freático no es muy profundo. Un ejemplo típico lo constituye el bosque en galería, formado por olmos, alisos, chopos y sauces. Una freatofita típica, introducida artificialmente en España, es el eucalipto, que tiene facilidad para profundizar las raíces y asegurarse el suministro de agua, lo que puede hacer en detrimento de otras especies.



que inundan la marisma durante parte del año, fundamentalmente debido a la lluvia caída directamente sobre su superficie y el desbordamiento de los ríos que confluyen en ese área; a la segunda se debe la existencia ininterrumpida de zonas húmedas y charcas.

En el sector de la masa de agua subterránea que funciona como acuífero libre, las aguas subterráneas están íntimamente conectadas con los ríos y arroyos y, por tanto, una parte del agua que alcanza las marismas tiene un origen subterráneo al proceder de la descarga del acuífero.

Sin embargo, el papel del agua subterránea en el Parque Nacional no queda limitado a estas aportaciones que incrementan las inundaciones de las marismas. En estiaje, la vida de los animales y de las plantas puede continuar gracias a las aguas subterráneas. Si éstas no existiesen, no se hubiera podido desarrollar la importante reserva ecológica que representa Doñana. Así, en el ecosistema de las dunas, donde el nivel piezométrico del acuífero está próximo a la superficie, es posible mantener en los *corrales* (espacios alargados entre dunas) una humedad en el suelo que se conserva durante todo el año. En los ecotonos de La Vera y La Retuerta, la superficie piezométrica se sitúa también muy alta, ligeramente por encima del nivel de las marismas. Como consecuencia, en toda esta franja límite son normales las zonas húmedas y las lagunas. En el sector occidental, el arroyo de la Rocina drena casi permanentemente las aguas subterráneas y sostiene una importante área de vegetación y fauna, contribuyendo al mantenimiento de la marisma del Rocío.

LA SEQUÍA

El término *sequía* suele referirse a un periodo prolongado de tiempo con precipitaciones por debajo de la media esperada, o también, según la metodología utilizada, cuando en más de la mitad del área considerada se producen precipitaciones inferiores al 85% de la media, por espacio de dos o más años. Este concepto tiene matices distintos según se aborde desde el punto de vista meteorológico, hídrico o antrópico.

Este es un fenómeno habitual en zonas geográficas con clima mediterráneo y difícil de predecir. Sin embargo, son más evidentes sus consecuencias: disminución de caudales en los arroyos y ríos, vaciado de los embalses y eventuales restricciones de suministro de agua, entre otros posibles efectos.

¿Cómo se comporta un acuífero ante una sequía? Pueden producirse ciertos descensos del nivel del agua en los pozos y sondeos. Sin embargo, esto no afecta a su explotación debido al largo tiempo de residencia del agua subterránea en el acuífero, y al gran volumen de agua almacenada en el mismo (aunque sí puede afectar al coste de bombeo). Por ello, las zonas abastecidas con aguas subterráneas, no suelen experimentar restricciones de agua en estos periodos de tiempo. Es frecuente que durante la sequía hídrica, se produzca un aumento muy considerable del volumen de agua subterránea extraída.

La experiencia española extraída en la sequía que tuvo lugar entre los años 1991 a 1995, ha demostrado la importancia de las aguas subterráneas para paliar la escasez de recursos hídricos, y los males asociados a la improvisación y falta de planificación. Es obvio que sin planificación, y sin la existencia de planes preventivos de urgencia, no pueden paliarse estos fenómenos temporales.

Se tuvo ocasión de demostrar ampliamente la importancia estratégica que tienen las aguas subterráneas durante la sequía habida en España a comienzos de la década de 1990 y las que posteriormente se han producido. Así, con su puesta en explotación temporal, se consiguió paliar la escasez en amplias zonas del sur y levante de la península. Como ejemplo se puede citar las medidas tomadas en la cuenca del Júcar con la construcción de campos de pozos denominados *de sequía*, que proporcionaron los caudales de agua suficientes para el abastecimiento a la población y el regadío. Igual de ilustrativos son los casos de abastecimiento con agua obtenida mediante sondeos, a numerosos núcleos urbanos de la provincia de Granada, que sumaban más de cien mil habitantes. En Jaén, para la misma sequía, se abrieron perforaciones que apoyaron el abastecimiento de la capital, y diversos núcleos de las Comarcas de la Loma de Úbeda, Sierra de Cazorla, Sierra Mágina, Montes Orientales y otras zonas. Otros casos dignos de mención fueron las mejoras de los abastecimientos a Málaga, Costa del Sol Occidental, Campo de Gibraltar y Bahía de Cádiz. En estas captaciones se perforaron más de 10.000 m y los caudales aforados superaron los 5.000 L/s.

Fuente de Cella (Teruel). Salida natural del acuífero de los Montes Universales que da lugar al nacimiento del río Jiloca. Se observa su situación durante la sequía del año 1983. En épocas normales, por debajo del arco fluyen más de 600 L/s



REDES DE OBSERVACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

La Administración española reconoció la importancia y la necesidad del control de los recursos subterráneos en el Libro Blanco de las Aguas Subterráneas (1994), donde se incluyó un programa específico de acción titulado Redes Oficiales de Control, destinado a sustituir la red existente por otra de propiedad estatal, que permitiera mantener la observación de todas las unidades hidrogeológicas del territorio nacional.

La Directiva 2000/60/CE, del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, más conocida como Directiva Marco del Agua (DMA) observa que “Las aguas subterráneas son el recurso hídrico más sensible e importante de la Unión Europea y, en particular, son la fuente principal del suministro público de agua potable”. Su transposición a la legislación española, obligó al rediseño de las redes para adaptarlas a lo dispuesto en la citada disposición.

Cada demarcación debe poseer una red de control del nivel de las aguas subterráneas, formada por un número suficiente de puntos de control que sean medidos con frecuencia, y así permita la obtención de una información suficiente para determinar el estado cuantitativo de todas las masas de agua subterránea.

Para el seguimiento del estado químico de las aguas subterráneas, cada demarcación dispondrá de una red de control suficiente para su determinación, de tal manera que se pueda detectar la presencia de tendencias al aumento prolongado de contaminantes inducidas antropogénicamente.

El agua subterránea en España

Existen diferentes criterios de clasificación de las redes de observación. Básicamente, se contemplan tres tipos de redes de observación de las aguas subterráneas según la DMA:

1. Red o Control de vigilancia
2. Red o Control operativo
3. Red o Control de investigación

Control de vigilancia

El objetivo del control de vigilancia es complementar y validar el procedimiento de evaluación del impacto, y facilitar información para su utilización en la evaluación de las tendencias prolongadas como consecuencia de modificaciones de las condiciones naturales y de la actividad antropogénica.

En todas las masas de agua subterránea seleccionadas, se controlará el siguiente conjunto de parámetros esenciales:

- Contenido de oxígeno.
- Valor del pH.
- Conductividad
- Nitrato.
- Amonio.

Control operativo

Tiene como objetivo determinar el estado químico de todas las masas o grupos de masas de agua subterránea respecto de las cuales se haya establecido riesgo, y la presencia de cualquier tendencia prolongada al aumento de la concentración de cualquier contaminante inducida antropogénicamente.

Control de investigación

Se llevará a cabo cuando:

- Se desconozcan las causas del rebasamiento de los límites de extracción.
- El control de vigilancia indique la improbabilidad de que se alcancen los objetivos medioambientales establecidos para una



Estación automática de control pluviométrico y nivel de un sondeo

masa de agua y no se haya puesto en marcha aún el control operativo. Se establecerá, por tanto, un programa de medidas para la consecución de los objetivos medioambientales, y para poner remedio a los efectos de una contaminación accidental.

Los controles básicos, cuantitativo y cualitativo, de las aguas subterráneas, se realizan mediante medidas de:

1. Profundidad del agua en los sondeos que constituyen la red piezométrica. Es un indicador directo de la masa hídrica almacenada en el acuífero y de las características del flujo en su interior.
2. Parámetros definidores de la calidad química del agua (conductividad eléctrica, pH, contenido en iones y componentes mayoritarios disueltos).



3. Caudal de las principales descargas naturales que se producen por manantiales singulares, o en tramos identificados de ríos. El control consiste en la utilización de instalaciones o dispositivos de aforo de corrientes de agua, y se denomina *red de manantiales o de surgencias naturales*. Esta red es parte o complemento de la red oficial de estaciones de aforo, y tiene, además, una utilidad propia o específica: las correlaciones que pueden establecerse entre los datos piezométricos e hidrométricos, permiten realizar predicciones del caudal base de los ríos en función del estado piezométrico de los acuíferos, y contrastar las posibles influencias de la explotación de las aguas subterráneas sobre estos últimos.

Esquema que representa los conos de bombeo originados por la extracción simultánea de aguas subterráneas por varios pozos

PRINCIPALES AFECCIONES A LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

En el aprovechamiento de las aguas subterráneas pueden presentarse problemas cuantitativos o cualitativos (químicos). El primer caso corresponde a aquellos acuíferos intensamente explotados, incluso más allá de lo que constituye un uso sostenible de sus recursos. Sin embargo, son más preocupantes los problemas de calidad de las aguas subterráneas, y, por tanto, los más acuciantes de resolver y gestionar. En cualquier caso, la mejor política de protección de las aguas subterráneas es la que se aplica con carácter preventivo.

Uso intensivo de las aguas subterráneas

El término *sobreexplotación de acuíferos* ha sido utilizado para describir diferentes situaciones. Conviene no confundir la sobreexplotación con el efecto de eventuales períodos de sequía, en los que se pueden producir, según en qué tipos de acuíferos, descensos en niveles y caudales. Un acuífero es un embalse subterráneo, y para utilizar con eficiencia sus recursos, tiene que aceptarse que los niveles de agua disminuyen mientras se está explotando, hasta que se consiga un equilibrio entre el recurso disponible y la extracción. En la legislación actual española, la designación de sobreexplotación se aplica a tres posibles situaciones; no obstante, está pendiente de adaptar la Directiva Marco del Agua en lo que se refiere al “buen estado de la masa de agua subterránea”:

1. Extracciones muy próximas o superiores a los recursos renovables, que pongan en peligro inmediato la subsistencia de los aprovechamientos existentes.
2. Deterioro grave de la calidad del agua como consecuencia de dichas extracciones.

Esta situación se ha producido en algunos acuíferos formados por sedimentos recientes, como en Ciudad de México o en Venecia. La importancia de este fenómeno suele estar más relacionada con la situación del acuífero, que con el valor cuantitativo de la subsidencia. Así, las subsidencias en Bangkok o en el Golfo de México, en zonas costeras, tienen mayor importancia que las producidas en el Central Valley de California, donde se registraron descensos del terreno de hasta 7 metros.

En España se han observado pocos problemas de subsidencia debidos a la extracción de agua del subsuelo. El más reciente es el que se ha registrado en la ciudad de Murcia, que ha dado lugar a desplazamientos relativos entre edificios. En el Delta del Llobregat se ha estimado una subsidencia de hasta varios decímetros, que en parte puede estar ligada al retroceso de la costa.



Desplazamiento entre edificios en la ciudad de Murcia como consecuencia de fenómenos de subsidencia del terreno a causa del descenso piezométrico

3. Evolución del acuífero, como consecuencia de la cuantía de las extracciones, que ponga en peligro la subsistencia a largo plazo de los aprovechamientos.

El concepto de *sobreexplotación* (buen estado de la masa de agua subterránea) asociado al uso intensivo de las aguas subterráneas, es objeto de controversia, pues a los efectos indeseables —aunque internalizables—, se contraponen beneficios económicos y sociales muy importantes. Es innegable que algunos acuíferos intensamente explotados como por ejemplo, La Mancha Occidental, La Mancha Oriental y El Poniente Almeriense, han sido el motor del desarrollo económico y social de provincias españolas como Ciudad Real, Albacete o Almería, o Comunidades como la Canaria. Sin embargo, en ocasiones se originan fuertes impactos ambientales, siendo el caso más emblemático la desaparición de los Ojos del Guadiana y la degradación de las Tablas de Daimiel, situadas en la confluencia de los ríos Cigüela y Guadiana.

Entre los efectos desfavorables producidos por una inadecuada explotación del agua subterránea, cabe destacar:

- a) *Descenso de los niveles piezométricos.* El aprovechamiento de un acuífero conlleva un descenso del nivel piezométrico que se mantiene transitoriamente hasta que alcanza un nuevo equilibrio. Si los descensos son progresivos y continuados, se puede producir una disminución de los caudales e incluso el secado de los pozos, lo que puede originar un incremento de los costes energéticos debidos a la extracción del agua a mayor profundidad.
- b) *Degradación en la calidad del agua subterránea.* Cuando los descensos son elevados, se puede originar un deterioro importante de la calidad del agua subterránea. Así, son bien conocidos los casos de los acuíferos de Jumilla-Villena, o Quibas, en la cuenca del Segura-Júcar, Ascoy-Sopalmo en la del Segura, o en las zonas costeras de regiones áridas o semiáridas, en las que el

cambio de gradiente hidráulico debido a los bombeos, puede originar el avance de la interfaz de agua dulce y agua salada, modificando la calidad del agua.

- c) *Problemas de subsidencia del terreno.* La extracción de agua subterránea puede producir cambios en el estado tensional del terreno, que ocasionalmente originen o contribuyan a crear problemas de subsidencia del mismo (descenso paulatino de la superficie).
- d) *Afección a los cursos de agua conectados con el acuífero.* La explotación de aguas subterráneas puede modificar sustancialmente el funcionamiento hidrogeológico de un sistema. En ocasiones, descensos del nivel piezométrico hacen variar el sentido de una posible conexión acuífero-río. De este modo, zonas en las que el río era alimentado por la descarga del acuífero, se convierten en áreas en las que es el acuífero el que recibe la recarga del río, que puede llegar a secarse completamente, excepto durante periodos húmedos.
- e) *Impactos ecológicos en los ecosistemas acuáticos.* De modo análogo a lo descrito en el punto anterior, un descenso del nivel piezométrico puede producir afecciones de distinto grado en áreas de importancia medioambiental. Los efectos negativos que pueden producirse son de varios tipos: reducción de caudal o secado de manantiales; disminución de la humedad del suelo a un nivel en el que la vegetación freatófila no puede sobrevivir; desaparición parcial o total de humedales conectados hidráulicamente con un acuífero en situación natural; e incluso cambios microclimáticos debidos a una reducción de la evapotranspiración. La importancia de estas afecciones requiere un estudio particular en cada caso, que valore todos los efectos considerados, las posibilidades de reversibilidad de la situación y las consecuencias de las posibles opciones.

El agua subterránea en España

La evaluación de los posibles impactos y beneficios producidos por la extracción intensiva del agua subterránea, es fundamental a la hora de planificar el desarrollo sostenible de las aguas subterráneas, ya que la Hidrogeología, no sólo permite prever y cuantificar gran parte de estas afecciones, sino que en la mayoría de los casos posibilita que estos puedan mitigarse con una correcta planificación de la ubicación de las captaciones y de las extracciones.

La participación de los usuarios del acuífero en los centros de toma de decisiones sobre el acuífero es fundamental. A tal efecto, la Ley de Aguas, en el caso de un acuífero declarado sobreexplotado, dispone la constitución forzosa de una Comunidad de Usuarios. Para que esta participación sea eficaz, se requiere que los usuarios estén concienciados de su importancia, y que tengan un conocimiento básico sobre el acuífero y su funcionamiento.

Un claro ejemplo de esta situación se da especialmente en las cuencas de los ríos Júcar y Guadiana. En este último, los descensos en el nivel piezométrico han desconectado tramos de río que antes recibían descarga del acuífero, y que ahora son *perdedores* y recargan al mismo. Esto ha provocado que determinadas zonas de los ríos situados en la cuenca alta, como el Záncara o el Cigüela, que en situación natural llevaban siempre agua, permanezcan secas durante buena parte del año.

Contaminación de acuíferos

Existen factores externos, especialmente de origen antrópico, que pueden alterar la composición natural de las aguas subterráneas, al introducir sustancias ajenas susceptibles de modificar su naturaleza original, y con ello limitar su utilización para ciertos usos. Los acuíferos presentan un notable poder de protección frente a muchos agentes contaminantes. Sin embargo, una vez que un acuífero está contaminado o con el contaminante ya en el medio no saturado y desplazado por el agua de recarga, su regeneración suele ser difícil y lenta, a veces de muchos años, si es que se puede abordar económicamente. De ahí que sea de gran importancia la protección de las aguas subterráneas frente a la contaminación, cualquiera que sea su origen.



Parcela experimental situada en el acuífero de La Plana de Castellón, para estudiar los procesos de contaminación del agua subterránea por plaguicidas

La magnitud del problema depende de varios factores, como el tamaño de la zona afectada, la cantidad de contaminante implicado, su solubilidad, toxicidad y densidad, así como de la composición mineral y de las características hidrogeológicas del terreno por el cual se mueve. Las aguas subterráneas pueden sufrir una contaminación directa si el contaminante alcanza la zona saturada sin haber atravesado otro medio físico; o diferida, tras haber circulado por la zona no saturada.

La contaminación de las aguas subterráneas puede ser difusa o puntual.

La contaminación difusa* puede tener su origen en:

- **Intrusión marina.** En acuíferos costeros la situación natural de la interfaz de agua dulce-salada puede verse alterada al modificarse el régimen de flujo como consecuencia del bombeo excesivo, o a veces simplemente por la mala ubicación de las captaciones. Esto puede provocar la entrada de agua salada en el acuífero.

En el litoral mediterráneo la intrusión marina es un fenómeno frecuente, llegándose en algunos casos a superar los 500 mg/L de cloruros y a afectar a un gran volumen de agua del acuífero; en ocasiones, la contaminación tiene un carácter más puntual reduciéndose al entorno del pozo de bombeo. Como ejemplos más relevantes pueden citarse la contaminación de los acuíferos de la Plana de Vinaroz-Peñíscola u Oropesa-Torreblanca, entre otros.

- **Abonos agrícolas.** Pueden ser minerales u orgánicos. En ambos casos, la contaminación producida es principalmente debida al aporte de nitratos. La aplicación excesiva e incorrecta de abonos y las prácticas de riego poco eficientes, favorecen el lavado de nitratos y su incorporación al acuífero. Las

Situación de la interfaz en un acuífero en contacto directo con el mar. En la imagen superior, se observa la interfaz en su situación natural, con salida de agua dulce al mar. En el centro, se muestra el incipiente proceso de avance de la interfaz aunque ésta no afecta a la calidad del agua del sondeo y se mantienen parte de las salidas de agua dulce. En la imagen inferior, la intrusión de agua de mar ha avanzado contaminando las aguas del sondeo, pudiendo llegar a desaparecer las salidas del agua dulce del acuífero



consecuencias se acentúan en las áreas regadas con aguas subterráneas debido al reciclado de éstas.

La presencia de nitratos es el problema de contaminación más extendido, aunque con una notable variabilidad en su gravedad de unas regiones a otras. El Real Decreto 140/2003 por el que se establecen los criterios sanitarios de la calidad del agua de consumo humano, obliga a que las aguas potables no superen los 50 mg/L de nitrato (NO_3^-). Afecta de forma importante al litoral mediterráneo, y es especialmente acusada en el Maresme (Barcelona), donde se llega a superar los 500 mg/L, y en grandes áreas de las planas costeras levantinas (Castellón y Valencia), y Canarias, con más de 100 mg/L. Entre las masas de aguas subterráneas interiores, la Llanura Manchega, el aluvial del Ebro y algunos sectores del valle del Guadalquivir (aluviales del Guadalquivir y Guadalete) son las más afectadas, con contenidos de nitratos entre 50 y 100 mg/L.

• **Productos fitosanitarios:** Con este nombre se denominan los compuestos químicos utilizados en el control y destrucción de las plagas y enfermedades de las plantas. Incluyen los insecticidas, herbicidas, acaricidas y fungicidas*. Muchos de ellos son compuestos de notable resistencia a la degradación, en sí mismos o en algunos de sus productos de descomposición. Si la recarga se realiza lentamente a través de la zona no saturada, existen posibilidades de retención y de una cierta degradación química o biológica; pero si llegan directamente al acuífero, su eliminación por acciones biológicas es muy lenta o nula. Un uso agrícola correcto de los plaguicidas no tiene por qué causar perjuicios importantes a las aguas subterráneas. Este tipo de contaminación es un problema todavía no bien conocido en España.



Eliminación de alpechines empleando balsas de evaporación situadas sobre formaciones geológicas impermeables. Éstas evitan la práctica habitual durante muchos años del vertido de estos residuos a los cauces superficiales y a los acuíferos



La actividad ganadera y los lixiviados que se originan pueden contaminar las aguas subterráneas si las instalaciones no se sitúan en zonas hidrogeológicamente adecuadas



Contaminación de un pozo de extracción de aguas subterráneas por efecto de una fosa séptica

La contaminación puntual* puede ser debida a:

- **Actividades domésticas.** Es una contaminación orgánica, biológica y mineral, originada por fosas sépticas, pozos negros, fugas de sistemas de alcantarillado, vertido indiscriminado de aguas de letrinas, y otras actividades. También se incluye la contaminación derivada de la utilización de produc-

tos químicos de uso doméstico, tales como los detergentes y blanqueantes en sus diversas versiones.

- **Actividades ganaderas.** Es una contaminación con matices muy similares a la producida por actividades domésticas, pero más concentrada e intensa, en especial en granjas intensivas. El número y las dimensiones de los centros de ganadería estabulada ha aumentado de forma considerable en las últimas décadas. Contabilizando los vertidos de estas instalaciones y los de la ganadería no estabulada, se estima que la carga orgánica generada por la

ganadería en todo el territorio español equivale a una población del orden de los 100 millones de habitantes. Un 20% de los residuos ganaderos se destina a estiércol; otro 20% queda en el suelo durante el pastoreo; entre el 10 y el 15% se somete a algún tipo de tratamiento; y el resto se vierte directamente al terreno o a los cauces.

El agua subterránea en España



Penacho contaminante en un vertedero con fugas de lixiviado (isocontenidos de amonio $[NH_4^+]$ en mg/L)

Se han observado problemas importantes de contaminación de las aguas subterráneas en algunos acuíferos situados en las Comunidades de Castilla-León, Andalucía, Castilla-La Mancha, Cataluña y Galicia.

- **Actividades industriales.** El sector industrial produce una variedad de sustancias orgánicas e inorgánicas que, cuando se vierten de modo incontrolado o mal regulado, pueden dar

lugar a contaminaciones importantes en las aguas subterráneas. Son especialmente insalubres y nocivas las contaminaciones con metales pesados procedentes especialmente de la industria metalúrgica, de la cerámica y curtidos.

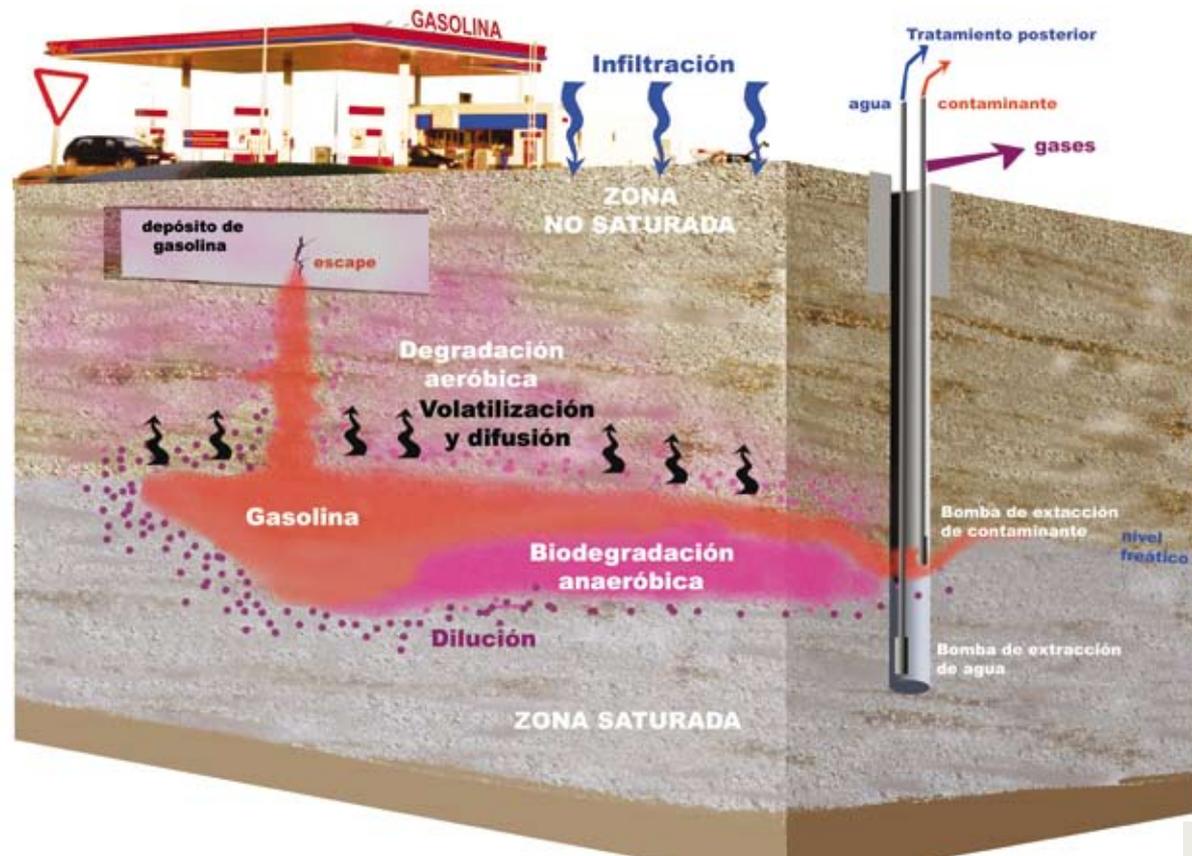
El origen de la contaminación está, entre otros, en el inadecuado almacenamiento, transporte de materias primas o accidentes de carretera (carburantes y combustibles líquidos derivados

del petróleo); en polígonos industriales y estaciones de servicio de combustibles; en la eliminación de residuos en cauces, zanjas, cuevas o fosas sépticas deficientemente construidas; y en los vertidos incontrolados en pozos, especialmente por industrias del sector agroalimentario. El censo de emplazamientos contaminados por residuos tóxicos y peligrosos en España es, según el Plan Nacional de Recuperación de Suelos Contaminados de 1995, del orden de 4.500. Se estima que en España se generan anualmente unos 3 millones de toneladas de residuos tóxicos y peligrosos, de

los que tan sólo el 20% se someten a tratamiento, siendo el más utilizado la eliminación mediante dispositivos de seguridad, frente a la incineración y al tratamiento físico-químico.

- **Residuos sólidos.** La actividad humana produce residuos sólidos de variada naturaleza, que pueden ser lixiviados e infiltrarse y contaminar los acuíferos. Los residuos se clasifican en tres grandes grupos: a) residuos inertes, tales como tierras, que no presentan una elevada peligrosidad; b) resi-

Recuperación, mediante un pozo de extracción, de un acuífero contaminado por la fuga de carburante de un depósito enterrado de hidrocarburos



El agua subterránea en España

duos urbanos o asimilables (domésticos y comerciales), que pueden ser potencialmente contaminantes, y deben ser vertidos con precauciones; y c) residuos industriales, con un elevado potencial contaminante, en especial si contienen cenizas tóxicas, sustancias solubles y ciertos líquidos que los impregnan. Cada año se generan en España unos 17 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos o asimilables, de los cuales el 81,3% van a parar a vertederos, y de ellos un 17,6% se vierten incontroladamente. Se calcula que en España existen unos 9.000 vertederos. La Directiva Europea 1999/31/CE, relativa al vertido de residuos, exige a los estados miembros la transposición de su contenido al ordenamiento jurídico de cada nación antes de dos años.

- **Tanques enterrados.** El número de estaciones de servicio que había en España en el año 2007 era de unas 7.800, lo que supone alrededor de 32.000 depósitos de combustible. Por otra parte, los depósitos de hidrocarburos para uso doméstico se estiman en más de 300.000.

- **Pozos mal contruidos o abandonados.** Son especialmente peligrosos los pozos que ponen en comunicación varios acuíferos, los pozos con entubaciones rotas o corroídas en niveles con aguas de mala calidad, y aquéllos que permiten la fácil entrada de aguas superficiales.

- **Vertidos directos mediante pozos de inyección mal diseñados y ubicados.** Son generalmente pozos de poca profundidad que se utilizan para el vertido directo al acuífero (que contiene agua de buena calidad) de los residuos líquidos contaminantes. Suelen estar en zonas de difícil acceso al control administrativo.

La conservación de la calidad de las aguas subterráneas debe regirse por los principios de *prevención* y *precaución*, para evitar que se produzca su contaminación. Para ello, se deben establecer medidas y normativas que limiten el vertido incontrolado de contaminantes, la realización de actividades peligrosas sin las debidas medidas de seguridad, y la aplicación indiscriminada de productos agroquímicos. Es necesario, por tanto, establecer unos sistemas de vigilancia eficaces, que permitan detectar cualquier variación en la composición del agua con tiempo suficiente para poder actuar.

Para lograr este objetivo, son de mucha utilidad los mapas de vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación, y la definición de perímetros de protección. Una vez que un acuífero ha sido contaminado, la regeneración es difícil desde el punto de vista técnico y económico. Si los contaminantes son degradables, la contaminación se reduce con el tiempo. Si se trata de materiales estables, estos pueden permanecer indefinidamente si no se procede a su extracción.

Con frecuencia la contaminación no es patente hasta que se detecta en varios pozos, y esto puede suceder cuando ya ha sido afectada una parte importante del acuífero. No es raro el caso en que cuando se advierte una contaminación del acuífero, haya transcurrido tanto tiempo desde que se inició, que la fuente de contaminación ya no exista. Si la contaminación se produce desde la superficie del terreno o a poca profundidad y se ha descubierto al poco tiempo de iniciarse, puede extraerse el terreno afectado con máquinas de movimiento de tierras. Este tipo de actuación está especialmente indicado para reducir la contaminación de determinados hidrocarburos pesados, ya que su propagación es lenta.

En el caso de fuentes de contaminación permanentes, las medidas correctoras empezarán por localizar esas fuentes conta-



Sección esquemática de un depósito de seguridad de residuos

minantes y suprimirlas si es posible. Las técnicas que pueden aplicarse según los casos, son: impermeabilización, drenajes, recubrimientos con arcillas que impidan la infiltración de la lluvia y el desvío de aguas fluviales y pluviales.

Cuando en una zona, únicamente un pozo muestra señales de contaminación, puede ser debido a admisión de agua de otros acuíferos o de la superficie, motivado por una deficiente construcción o por corrosiones, o bien por un pozo próximo abandonado.

CONTAMINACIÓN DIFUSA: contaminación de las aguas subterráneas por la llegada de un contaminante distribuido sobre una superficie más o menos extensa.

CONTAMINACIÓN PUNTUAL: contaminación de las aguas subterráneas por la llegada localizada de un contaminante al acuífero a través de un foco concentrado o de un área pequeña.

PLAGUICIDAS (INSECTICIDAS, HERBICIDAS, ACARICIDAS Y FUNGICIDAS): compuestos químicos destinados a la eliminación de insectos nocivos, plantas perjudiciales al cultivo, arácnidos y hongos.

El agua subterránea en España

La normativa de la Unión Europea pone énfasis en la calidad de las aguas subterráneas. En concreto, la Directiva relativa a la Protección de las Aguas Subterráneas contra la contaminación y el deterioro (Directiva 2006/118/CE), considera que “las aguas subterráneas son un recurso natural valioso que, como tal, debe ser protegido de la contaminación química y del deterioro”. Las aguas subterráneas -añade-, “son el recurso hídrico más sensible e importante de la Unión Europea y, en particular, son fuente principal del suministro público del agua”.

En la Directiva Marco del Agua de la Unión Europea (Directiva 2000/60/CE), son constantes las alusiones a los temas de calidad del agua superficial y subterránea, y de protección del medio ambiente. Así, por ejemplo, en el artículo 1 de dicha Directiva se dice: “El objetivo de la presente Directiva es establecer un marco para la protección de las aguas superficiales continentales, las aguas de transición, las aguas costeras y las aguas subterráneas que (...) garantice la reducción progresiva de la contaminación del agua subterránea y evite nuevas contaminaciones”.



Regulación mediante un sondeo en Candela (Alicante)

Perspectiva futura de las aguas subterráneas

El agua subterránea es un recurso natural renovable, que puede ser aprovechado por el hombre. Su utilización es muy beneficiosa y contribuye a satisfacer las demandas creadas por él, y a mejorar su bienestar social, económico, cultural y lúdico.

Con el transcurso de los años, las exigencias del hombre se han incrementado. Así, la sociedad actual no sólo exige agua en cantidad suficiente (es impensable en el mundo desarrollado la falta de agua en un hogar), sino que ésta debe tener una calidad acorde con el uso al que se vaya a destinar. Esta condición hace que el agua subterránea, por su excelente calidad y protección frente a su posible contaminación, juegue un papel relevante en el abastecimiento urbano, como ocurre en la mayoría de los países de la Unión

Apoyo al abastecimiento de la Bahía de Cádiz en la sequía del período 1992 a 1995, mediante bombeos en el acuífero Arcos-Bornos. Se suministraron 500 L/s que se incorporaron directamente al abastecimiento, aprovechando la infraestructura de distribución a partir del embalse existente aguas arriba del acuífero



Europea y, en menor medida, en España, donde no se da con la misma importancia cuantitativa.

Para que su extracción se realice sin efectos no deseados, es necesario conocer los diversos aspectos que concurren en el estudio del agua. Esto permite planificar su utilización y hacer un uso sostenible del mismo, y compatibilizar su conservación con el desarrollo socio-económico. Cuando no ha sido así, se han originado graves problemas, especialmente por falta de agua disponible (en cantidad y/o calidad), lo que ha afectado tanto al abastecimiento a la población, como a la economía y al medio ambiente (espacios naturales, humedales, etc.).

En las últimas décadas del siglo XX, sobre todo a partir de los años sesenta, se realizó un gran esfuerzo de investigación con nuevos métodos y nuevas tecnologías, que permitieron catalogar los principales acuíferos; definir su geometría; determinar los parámetros hidrogeológicos y el funcionamiento hidrodinámico de cada uno de ellos; cuantificar los recursos y las reservas hídricas, así como el grado de explotación y su disponibilidad; caracterizar su composición físico-química e identificar los principales problemas: explotación intensiva (que puede alcanzar la sobreexplotación), contaminación por nitratos, fertilizantes o plaguicidas, por intrusión de agua de mar en el caso de los acuíferos costeros, por hidrocarburos o metales pesados provenientes de la industria, por lixiviados de residuos urbanos e industriales, etc.

Los avances científicos durante esos años (1968-1985) y las situaciones que se iban originando —aumento de las explotaciones, fenómenos de contaminación, entre otros—, no estaban soportadas por una legislación acorde con esta nueva coyuntura. La Ley vigente en esos años no contemplaba, con el rigor y profundidad suficiente, aspectos relacionados con la optimización del uso del agua subterránea, la protección de los acuíferos o la

corrección de los problemas derivados de una mala planificación hídrica.

Estas limitaciones se resuelven en gran medida con la entrada en vigor de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, al recoger en su articulado entre otras acciones, la implantación de redes de observación de los niveles piezométricos (posición del agua subterránea en el acuífero) y de la calidad, así como de los volúmenes de agua extraídos; la elaboración de normas de explotación de los acuíferos y de perímetros de salvaguarda y de protección de los acuíferos, de las áreas de recarga, de las captaciones destinadas al abastecimiento urbano, y de los espacios naturales y humedales; además de otras medidas adicionales como: ahorro de agua o mejora de las infraestructuras de distribución, entre otras acciones. Son conocidas las pérdidas que se originan en las conducciones de aguas destinadas al suministro urbano, en ocasiones superiores al 40%, y las destinadas a la actividad agrícola, no evaluadas pero posiblemente muy superiores a las urbanas debido a la antigüedad y deterioro de muchas de sus infraestructuras, aunque en las últimas décadas se está avanzando mucho en subsanar estas pérdidas.

A lo largo de los años, las tecnologías de prospección y evaluación de las aguas subterráneas han ido evolucionando como consecuencia de la incorporación de conocimientos derivados de otras ramas del saber, especialmente las relacionadas con la Ingeniería, Geología, Matemáticas, Estadística, Hidrogeoquímica o Geofísica, entre otras muchas.

Estos avances han sido especialmente relevantes en los campos relacionados con:

1.º La observación y muestreo de las aguas subterráneas, la recogida de datos, y la aplicación de nuevos métodos geofísicos.

Perspectiva futura de las aguas subterráneas

2.º El estudio del funcionamiento de los acuíferos, los procesos de recarga y la circulación de los flujos de agua subterránea. Se dispone de técnicas y métodos de interpretación más precisos, como serían los estudios hidrogeoquímicos e isotópicos.

3.º Los códigos o modelos matemáticos de simulación de flujo de agua, transporte de solutos y de uso conjunto de las aguas subterráneas y superficiales.

La posibilidad que ofrece la utilización de las aguas subterráneas y los acuíferos es muy diversa, si se tiene en cuenta el volumen de agua disponible, su distribución espacial, sus posibilidades de transferencia y su capacidad de almacenamiento. Estas características las hacen idóneas para resolver muchas de las situaciones que se producen normalmente. Como más importantes hay que destacar:

1ª Las aguas subterráneas como fuente de suministro

- *Única opción posible.* Responde a aquellos casos en los que las condiciones geográficas, geomorfológicas e hidrológicas no facilitan la disponibilidad de aportaciones superficiales ni la construcción de infraestructuras de



Aplicación de métodos geofísicos aerotransportados al estudio de acuíferos

regulación. En este caso, el agua subterránea es la única solución al problema.

- *Alternativa más favorable.* Su aplicación viene determinada por ser ésta la solución idónea al reunir mejores condiciones técnicas, económicas y ambientales, que otras posibles soluciones.
- *Calidad más adecuada al uso.* En general las aguas subterráneas presentan una buena calidad natural, pudiéndose utilizar directamente para abastecimiento humano sin ningún tipo de tratamiento especial. Con este fin son empleadas en la mayoría de los países europeos.
- *Mejorar la garantía de suministro y, además, incrementar las disponibilidades hídricas.* Esta doble finalidad se puede conseguir mediante la recarga de los recursos superficiales no convencionales (aguas regeneradas residuales y aguas desaladas) en los acuíferos, pudiéndose utilizar en aquellos momentos que la planificación aconseje.

Estudio de acuíferos mediante la aplicación de técnicas geofísicas terrestres



- *Disponibilidad de recursos adicionales en emergencias y periodos de sequía.* La gran capacidad que tienen los acuíferos para almacenar agua, permite disponer de este recurso de un modo fácil y suficiente para resolver los problemas que surjan en situaciones extremas.

2ª Los acuíferos como medio para la mejora de la gestión hídrica

La utilización de los acuíferos con este objetivo, se basa en su capacidad de almacenamiento, muy superior a la aportada por las infraestructuras de regulación superficial. Se destacan las siguientes actuaciones:

- *El aumento de la capacidad de regulación de una cuenca o de un sistema de explotación.* El papel asignado al acuífero sería similar al de un embalse de superficie. Se puede utilizar como medio regulador de las escorrentías subterráneas, superficiales, y de las procedentes de la regeneración de las aguas residuales y de las aguas desaladas, en su caso favoreciendo la recarga, inducida o artificial, mediante la aplicación de las técnicas adecuadas.

La adecuada gestión de un acuífero debe posibilitar el mantenimiento de las surgencias naturales de las aguas subterráneas



- *El aprovechamiento de las reservas hídricas almacenadas en los acuíferos,* puede aplicarse:

a) Para mejorar la garantía de suministro de una determinada demanda. Esta acción asegura la disponibilidad del recurso medio renovable en situaciones derivadas de una disminución temporal de las precipitaciones, y, por tanto, de una recarga anual por debajo de los valores medios. En estos casos, no se trata de incrementar los caudales medios a extraer, sino de sustituir los déficits anuales que se generen coyunturalmente y que, posteriormente, en periodos de mayores lluvias, serán sustituidos al incrementarse la recarga.

b) Como reserva disponible temporalmente. Es una alternativa muy debatida por los científicos y planificadores debido a su carácter no renovable, ya que una vez utilizada la reserva, no se recupera fácilmente. La aplicación requiere una programación adecuada y el establecimiento de medidas correctoras, que van desde el cese de la explotación, hasta la disponibilidad de nuevos recursos externos al sistema.

Lecturas recomendadas

- BENNET, G.D. (1987). *Introducción a la Hidráulica de las Aguas Subterráneas*. Técnicas de Investigaciones de Recursos Hídricos del Servicio Geológico de los Estados Unidos. Libro 3. Cap. B2. U.S. Government Publishing Office. Washington, USA, 167 pp.
- COSGROVE, W. J. and RIJSBERMAN, F. R. (2000). *World Water Vision*. Earthscan Publications Ltd, Londres , 108 pp.
- CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. R. (2001). *Hidrología Subterránea*. Segunda Edición. Ed. Omega. Barcelona. 2 Vol. 2350 pp.
- CUSTODIO, E., LLAMAS, M. R. y SAMPER, J. (1997). *La evaluación de la recarga a los acuíferos*. Instituto Tecnológico Geominero de España y Asociación Internacional de Hidrogeólogos-Grupo Español. Madrid, 455 pp.
- DAVIS, S. N. and DE WIEST, R. J. M. (1966). *Hydrogeology*. John Wiley and Sons. New York, USA, 463 pp.
- DOMÉNICO, P. A. and SCHWARZ, F. W. (1997). *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley and Sons. New York, USA, 528 pp.
- FETTER, C. W. (1999). *Contaminant Hydrogeology*. Prentice Hall. New York, USA, 500 pp.
- FETTER, C. W. (2001). *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall. New York, USA, 598 pp.
- FREEZE, R. A. and CHERRY, J. A. (1979). *Groundwater*. Prentice Hall. New Jersey, USA, 604 pp.
- GLEICK, P. H. (1998). *The World's Water*. Inland Press, S. Francisco, USA, 250 pp.
- HALL, P. (1996). *Water Well and Aquifer Test Análisis*. Water Resources Publications, LLC, USA, 428 pp.
- HERNÁNDEZ-MORA, N. y LLAMAS, M. R. (Eds.) (2001). *La economía del agua subterránea y su gestión colectiva*. Fundación Marcelino Botín y Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 550 pp.
- HISCOCK, K. (2005). *Hydrogeology. Principles and practice*. Blackwell Publishing Oxford, UK, 389 pp.
- ITGE (1993). *Las aguas subterráneas en España. Estudio de síntesis*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid, 591 pp + 12 mapas.
- LLAMAS, M. R. y CUSTODIO, E. (Eds.) (2003). *Intensive Use of Groundwater: Challenges and Opportunities*. Balkema Publishers (Taylor and Francis Group). Lisse, Holanda, 478 pp.
- LLAMAS, M. R., FORNÉS, J. M., HERNÁNDEZ-MORA, N. y MARTÍNEZ CORTINA, L. (2001). *Aguas subterráneas: retos y oportunidades*. Fundación Marcelino Botín y Ediciones Mundi-Prensa. Madrid, 529 pp.

OLMO, M. y LÓPEZ-GETA, J. A. (Eds.) (2000). *Actualidad de las técnicas geofísicas aplicadas en Hidrogeología*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 375 pp.

PERNÍA, J. M. y FORNÉS, J. M. (2008). *Cambio climático y agua subterránea. Visión para los próximos decenios*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, 79 pp.

PRICE, M. (1996). *Introducing Groundwater*. Chapman and Hall. Londres, UK, 278 pp.

RAGONE, S., DE LA HERA, A., HERNÁNDEZ-MORA, N., BERGKAMP, G. and McKAY, J. (Eds.) (2007). *The Global Importance of Groundwater in the 21st Century: Proceedings of the International Symposium on Groundwater Sustainability*. Published by National Ground Water Association Press (NGWA Press). Instituto Geológico y Minero de España (IGME), International Union for Conservation of Nature (IUCN), United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO). Westerville, USA, 382 pp.

ROGERS, P., LLAMAS, M. R. y MARTÍNEZ CORTINA, L. (Eds.) (2006). *Water Crisis: Myth or Reality?* Balkema Publishers (Taylor and Francis Group). Lisse, Holanda, 341 pp.

SCHWARTZ, F. W. and ZHANG, H. (2003). *Fundamentals of Groundwater*. John Wiley and Sons. New Jersey, USA, 592 pp.

SHIKLOMANOV, I. A. (1997). *Comprehensive assessment of the freshwater resources of the World*. World Meteorological Organization, 88 pp.

UNESCO (2009). *Water in a changing world*. The United Nations World Water Development. Report 3. World Water Assessment Programme, 318 pp.

WATSON, I. and BURNETT, A. D. (1995). *Hydrology. An environmental approach*. CRC Press, Inc., Boca Ratón, USA, 702 pp.



Equipo de ensayo de bombeo

Información de interés

American Institute of Hydrology (AIH). Estados Unidos
Web: www.aihydro.org

American Water Resources Association (AWRA). Estados Unidos
Web: www.awra.org

Australian Center for Groundwater Studies. Australia
Web: www.groundwater.com.au

British Geological Survey. Reino Unido
Web: www.bgs.ac.uk

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM). Francia
Web: www.brgm.fr

Centre for Ecology and Hydrology (CEH). Reino Unido
Web: www.nwl.ac.uk/ih

Department of Groundwater Resources (DGR). Tailandia
Web: www.dgr.go.th

Environment Agency (EA). Reino Unido
Web: www.environment-agency.gov.uk

Environmental Protection Agency (EPA). Estados Unidos
Web: www.epa.gov

European Environment Agency (EEA)
Web: www.eea.eu.int

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). ONU
Web: www.fao.org

Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS). España
Web: www.fcih.org

Ground Water Protection Council (GWPC). Estados Unidos
Web: www.gwpc.org

Groundwater Foundation. Estados Unidos
Web: www.groundwater.org

Groundwater Information Center of California. Estados Unidos
Web: www.groundwater.water.ca.gov

Información general sobre el agua. Estados Unidos
Web: www.worldwater.org

Instituto de Geografía (IG). México
Web: www.igeograf.unam.mx

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). España
Web: www.igme.es

International Association of Hydrogeologists (IAH). Reino Unido
Web: www.iah.org

International Groundwater Resources Assessment Centre. Holanda
Web: www.igrac.nl

International Water Resources Association (IWRA). Estados Unidos
Web: www.iwra.siu.edu

Israel Institute of Technology. Israel
Web: www.technion.ac.il

National Ground Water Association (NGWA). Estados Unidos
Web: www.ngwa.org

National Institute of Hydrology (NIH). India
Web: www.nih.ernet.in

National Water Research Institute. Canadá
Web: www.nwri.org

Research Institute for Humanity and Nature. Japón
Web: www.chikyu.ac.jp

Save Our Groundwater. Estados Unidos
Web: www.saveourgroundwater.org

The Association of the European Geological Surveys
(EuroGeoSurveys)
Web: www.eurogeosurveys.org

The California Department of Water Resources (DWR).
Estados Unidos
Web: www.dwr.water.ca.gov

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
(UNESCO)
Web: www.unesco.org/water

U.S. Geological Survey (USGS). Estados Unidos
Web: www.usgs.gov

Water Education Foundation. Estados Unidos
Web: www.water-ed.org



