

Guía Didáctica de los acuíferos del Parque Natural Sierra Norte de Sevilla

VOLUMEN I Las aguas subterráneas



Guía Didáctica de los Acuíferos del Parque Natural Sierra Norte de Sevilla

VOLUMEN I
Las aguas subterráneas



Guías didácticas de los acuíferos del Parque Natural Sierra Norte de Sevilla / J.A. López Geta, M. Martín Machuca, C. Mediavilla Laso, A. Cosano Prieto, J.L. Girón Méndez, coords.- Madrid: Instituto Geológico y Minero de España; Diputación de Sevilla, 2011

2 vols.; ils; 17cm.

ISBN 978-84-7840-862-7

Glosario. Bibliografía

1. Agua subterránea. 2. Acuífero. 3. Enseñanza secundaria. 4. Libro guía. 5. Provincia Sevilla. I. Instituto Geológico y Minero de España, ed. II. Diputación de Sevilla, ed. III. López Geta, J.A., coord. IV. Martín Machuca, M., coord. V. Mediavilla Laso, C., coord. VI. Cosano Prieto, A, coord. VII. Girón Méndez, J.L., coord.

556.1(460.353)

ISBN: 978-84-7840-862-7

NIPO: 474-11-011-8

Edición: Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y Diputación de Sevilla

Asistencia técnica: ADOR Consultoría

Fotografía de portada: Francisco J. Hoyos

Diseño portada: Gerardo Ramos Gutiérrez (IGME)

Imprime: TIASA

1ª edición: abril de 2011

PRESENTACIÓN

Nuestra provincia presenta una gran variedad de espacios naturales de gran valor ecológico que tenemos el deber de proteger y preservar. Para ello, la educación ambiental se configura en la actualidad como uno de los mejores instrumentos para promover el respeto por los valores naturales que tenemos la gran suerte de poder disfrutar, y la obligación de conservarlos para que las generaciones futuras tengan las mismas oportunidades de disfrute que hemos tenido nosotros.

Con esta guía pretendemos contribuir desde la Diputación Provincial a esa disciplina transversal en la que se ha convertido la educación ambiental en los últimos años. Es nuestro deber, como responsables públicos, promocionar este tipo de iniciativas, encaminadas a dar a conocer nuestra riqueza medioambiental y a difundir sus valores entre toda la población.

Espero que esta publicación, dirigida a la comunidad educativa, se configure como una herramienta más de trabajo y elemento fundamental a la hora de conocer un elemento concreto de nuestro rico patrimonio natural, como son los acuíferos de la Sierra Norte de Sevilla, un espacio natural protegido de gran valor, cuyos rasgos más característicos y definitorios deben ser conocidos por todos, para que todos se involucren y participen en las tareas de conservación y preservación del mismo.

Fernando Rodríguez Villalobo
Presidente de la Diputación de Sevilla

PRESENTACIÓN

La Sierra Norte de Sevilla es uno de los espacios naturales más bellos y de mayor valor ambiental de nuestra provincia. Dentro de ella, los acuíferos constituyen un elemento de especial importancia para la formación del paisaje característico de esta zona, además de servir como aprovechamiento para todas aquellas actividades tradicionales que se desarrollan en la misma.

Con esta guía, destinada a la comunidad educativa, trataremos de adentrar a escolares y profesores en el apasionante mundo de la hidrogeología de este valiosísimo espacio que es la Sierra Norte de Sevilla. Comprender el importante papel que juegan los acuíferos en nuestro entorno es la mejor herramienta para promover actitudes y comportamientos de respeto hacia el medio, y más concretamente, hacia el recurso agua.

En esta guía encontraréis una parte destinada al profesorado, el Cuaderno del Profesor, así como una serie de Fichas de Trabajo para los alumnos, encaminados ambos elementos a servir como instrumento para que nuestros destinatarios puedan entender los principales conceptos y procesos relativos a la hidrogeología de la Sierra Norte de Sevilla.

La conservación de las masas de agua y su protección frente a la contaminación, ya sean superficiales o subterráneas, es una de las tareas principales en la que todos y todas debemos sentirnos involucrados. Este es el fin último de esta guía, convertirse en un instrumento más al servicio del desarrollo sostenible en un ámbito de actuación concreto, como es el de los acuíferos.

Rosa Moreno Marchena
*Diputada del Área de Sostenibilidad y Ciclo Hidráulico
Diputación de Sevilla*

PRESENTACIÓN

Aunque podría considerarse que el conjunto de la sociedad es consciente de la importancia del agua desde diferentes puntos de vista, y en particular en el ciclo biológico y en nuestra propia vida, no es tan evidente, sin embargo, que datos por todos conocidos como por ejemplo que aproximadamente el 70 % del cuerpo humano es agua, o que dos terceras partes de nuestro planeta Tierra están bajo el agua, sean interpretados y valorados en su justa medida, por razones, entre otras, como las que se comentan a continuación. En la hidrosfera, la distribución del agua es muy irregular: la mayoría, es decir el 97,5%, es agua salada; el 1,74% está acumulada en los glaciales y casquetes polares, lo que supone el 69,7% del agua dulce total; el 0,76% son aguas subterráneas, que corresponde al 30,1% del agua dulce, porcentaje que puede sorprendernos al compararlo con el de 0,006% de agua dulce que circula por nuestros ríos.

En España, más de 20.000 millones de metros cúbicos son aguas subterráneas que circulan y se almacenan en los acuíferos cada año. Estas formaciones geológicas que contienen y transmiten el agua, se extienden prácticamente por todo el territorio español, lo que permite abastecer a más del 25% de la población, porcentaje que se ve ampliamente superado en épocas de sequía. Estas cifras ponen en evidencia la importancia que tiene esta parte del ciclo hidrológico, tanto por su valor patrimonial, como por su condición de bien social y económico, así como por ser el sustento de numerosos humedales y ecosistemas acuáticos, tan abundantes en España.

Es por ello importante respetar este recurso subterráneo y para respetar es necesario conocer. Este conocimiento se aporta en su mayor medida por las Administraciones públicas en sus distintos ámbitos de actuación, cada una de ellas con fines diferentes, pero todas convergentes y con un denominador común: el valor de nuestro patrimonio hídrico. Una de las grandes líneas de actuación del Instituto Geológico y Minero de España es la hidrogeología y la Diputación de Sevilla, cuya misión es suministrar agua a los diferentes núcleos de población de la provincia, en cantidad y calidad adecuada. Adicionalmente, nuestra tarea es también difundir este conocimiento, no sólo entre los científicos, sino a la sociedad en general y en este caso a los habitantes de los numerosos núcleos de población dispersos por los rincones más diversos de la provincia y, en el caso que nos ocupa, de los situados en la Sierra Norte de Sevilla.

Con esta publicación pretendemos cubrir esa doble finalidad. Hemos mejorado el conocimiento que se disponía sobre la hidrogeología de la Sierra y de los acuíferos ubicadas en ella, completando la información sobre su funcionamiento y el por qué de la presencia de esos manantiales naturales o fuentes que dan lugar a los ríos y arroyos que discurren por la Sierra. Y también hemos puesto esta publicación a disposición de los profesores de Enseñanza Secundaria y Bachillerato, pues en ella se incluyen los conceptos más utilizados en hidrogeología, las características físicas de nuestra Sierra y, para que los alumnos se ejerciten en esos conocimientos, un conjunto de fichas que deben completar.

Me gustaría que la lectura de esta publicación sirviera para aprender y también para disfrutar de los recorridos descritos en la Guía. Y en particular para que los más jóvenes, fueran el medio de trasmisión de estos conocimientos y un ejemplo de respeto al medio ambiente.

Rosa de Vidania Muñoz
Directora del Instituto Geológico y Minero de España

La presente “**Guía didáctica de los acuíferos del parque natural Sierra Norte de Sevilla. Las aguas subterráneas**” ha sido realizada por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Diputación de Sevilla, en el marco del convenio de colaboración suscrito entre ambas entidades.

Dirección técnica:

Juan Antonio López-Geta (IGME)

Miguel Martín Machuca (IGME)

Carlos Mediavilla Laso (IGME)

Agustín Cosano Prieto (Diputación de Sevilla)

José Luis Girón Méndez (Diputación de Sevilla)

Roberto Macías Guerrero (Diputación de Sevilla)

Autores:

Juan Antonio López-Geta (IGME)

Sergio Martos Rosillo (IGME)

Realización del glosario de términos:

Juan José Durán Valero (IGME)

Colaboradora:

María José Vázquez González

Asistencia técnica: ADOR CONSULTORÍA

Joaquín del Val (Coordinación editorial y revisión técnica)

Manuel Alcalá (Diseño, infografía y maquetación)

Gerardo Llorente (Cartografía e infografía)

Fotografía: Luis Medina, Francisco J. Hoyos, Joaquín del Val

INTRODUCCIÓN

OBJETIVOS Y ESTRUCTURA DE LA GUÍA

El agua subterránea es un recurso insustituible en buena parte del planeta e imprescindible para la salud, el medio ambiente y la buena marcha de la economía. No en vano el 97% del agua dulce, sin considerar la almacenada en glaciares y casquetes polares, es agua subterránea, frente al 3% que se almacena en ríos y lagos (Clark *et al.*, 1996).

La imposibilidad de la observación directa del agua subterránea ha generado a lo largo de la historia de la humanidad una gran cantidad de teorías explicativas sobre su origen y circulación: no es hasta el siglo XVII cuando se comienza a esclarecer su funcionamiento de forma científica. En la actualidad, la Hidrogeología, ciencia que estudia las aguas subterráneas, es una rama del conocimiento bien fundamentada y desarrollada. Sin embargo, siguen siendo muchos los que desconocen su origen y funcionamiento, lo que da lugar a mitos y malentendidos que aún hoy perviven (López-Geta *et al.*, 2001). Tanto es así que muchos de los libros de texto de educación preuniversitaria apenas abordan cuestiones relacionadas con el agua subterránea (Rebollo y Martín, 2007) o, en otros casos, lo hacen de manera no suficientemente clara (Dickerson y Dawkins, 2004).

Uno de los principales objetivos de esta Guía es el de proporcionar al profesorado de Secundaria Obligatoria y Bachillerato material didáctico sobre el agua subterránea, dada la escasez de publicaciones existentes en castellano sobre esta materia; en nuestra lengua esa función se limita, prácticamente, a los textos de López-Geta y colaboradores (2001 y 2009) y a la traducción de Moore y colaboradores (2005).

La Guía Didáctica, que comprende dos volúmenes; este primer volumen se estructura en dos capítulos.

En el primero se explica el Ciclo del agua y el importante papel que juegan en este ciclo las aguas subterráneas.

El segundo trata de los fundamentos de la Hidrogeología en su contexto geológico: origen del agua subterránea, presencia, circulación, interacciones con el medio; y los aspectos básicos referidos a su exploración, captación y explotación, así como las implicaciones ambientales derivadas del uso inadecuado del territorio y de los recursos hídricos subterráneos.

Se completa con un glosario de términos y la bibliografía.

INDICE

■ Capítulo 1: Ciclo del agua	11
Un poco de historia	12
El ciclo hidrológico	13
■ Capítulo 2: Agua subterránea, un recurso natural	17
El agua subterránea	18
¿Qué es un acuífero?	26
Zonas de un acuífero	28
Clasificación de los acuíferos	32
Según la presión hidrostática	32
Según el tipo de materiales	33
Composición de las aguas subterráneas. Importancia y ejemplos	36
Métodos de extracción de las aguas subterráneas	39
Usos del agua subterránea	45
Población abastecida y volumen de agua subterránea utilizado	46
Presiones e impactos relacionados con las aguas subterráneas	50
Uso intensivo de las aguas subterráneas	51
Contaminación de acuíferos	55
Presente y futuro de las aguas subterráneas	62
Uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas	65
Políticas, estrategias y medidas de gestión	66
■ Glosario de términos	71
■ Bibliografía	87

Capítulo 1

Ciclo del agua

- Un poco de historia
- El ciclo hidrológico



UN POCO DE HISTORIA

El origen de las aguas y su ciclo en la naturaleza no se aclara, para los sabios europeos, hasta fines del siglo XVII. En Occidente, el libro fundador de la hidrología científica es la obra de Pierre Perrault “De l’origine des fontaines”, publicado en 1674 por Pierre Le Petit, en París. Perrault efectuó un balance hidrológico de una cuenca situada en el curso superior del río Sena. En 1687, el británico Edmond Halley estimó la evaporación del Mediterráneo, comparando luego esta evaluación con los aportes de los ríos que allí desembocan. Para conocer la *evapotranspiración* de los vegetales, el matemático francés De La Hire construyó tres *lisímetros* en 1688. No obstante, fuera de Europa, 500 años antes de J.C., los chinos conocían el ciclo del agua y Kautilya, ministro de la dinastía india de los Maurya (382-184 antes de nuestra era) obligaba a medir la lluvia en un cubo colocado delante de almacenes agrícolas. Para los servicios públicos, el primer sistema de anuncio de crecidas, que utilizaba jinetes que viajaban más rápido que la ola, se remonta al año 1574. Fueron los chinos quienes implementaron este sistema en el río Amarillo. Por otro lado, los coreanos ya hacían mediciones de lluvia sistemáticas desde 1441 (www.unesco.org.uy).

Nuestros antepasados no entendían por qué el nivel de los océanos no se elevaba, a pesar del aporte continuo de los ríos. Este proceso se hacía aún más difícil de entender al suponer que ocupaban sólo una superficie muy reducida en un mundo plano y en forma de disco. Por otro lado, también se planteaban cómo después de cesar las lluvias los ríos seguían corriendo, ¿cómo eran alimentados los ríos? Entre las hipótesis que más perduraron en el tiempo figura la de Aristóteles (384-322 antes de nuestra era): consideraba que parte del flujo de los ríos provenía de la condensación del vapor de agua subterránea, producida en el interior de las montañas, en donde el agua del mar penetraba y posteriormente era desalinizada de forma natural.

EL CICLO HIDROLÓGICO

En opinión de Bar (1989), el ciclo del agua es uno de los más importantes de la naturaleza y constituye una de las principales tramas conceptuales en los planes de estudio de ciencias (García, 1998), de ahí la importancia de su correcta explicación al alumnado (Reyero *et al.*, 2007).

El ciclo hidrológico (**Figura 1**) implica el movimiento constante del agua en la superficie del planeta y por debajo de ella.

Este ciclo comprende tres partes:

- 1- El mar y la cobertera vegetal (evaporación y evapotranspiración).
- 2- Las nubes (transferencia, condensación, precipitación).
- 3- El agua continental superficial (fuentes, ríos, lagos) y subterránea, que termina por retornar al mar después de un tiempo más o menos largo, según el recorrido realizado.

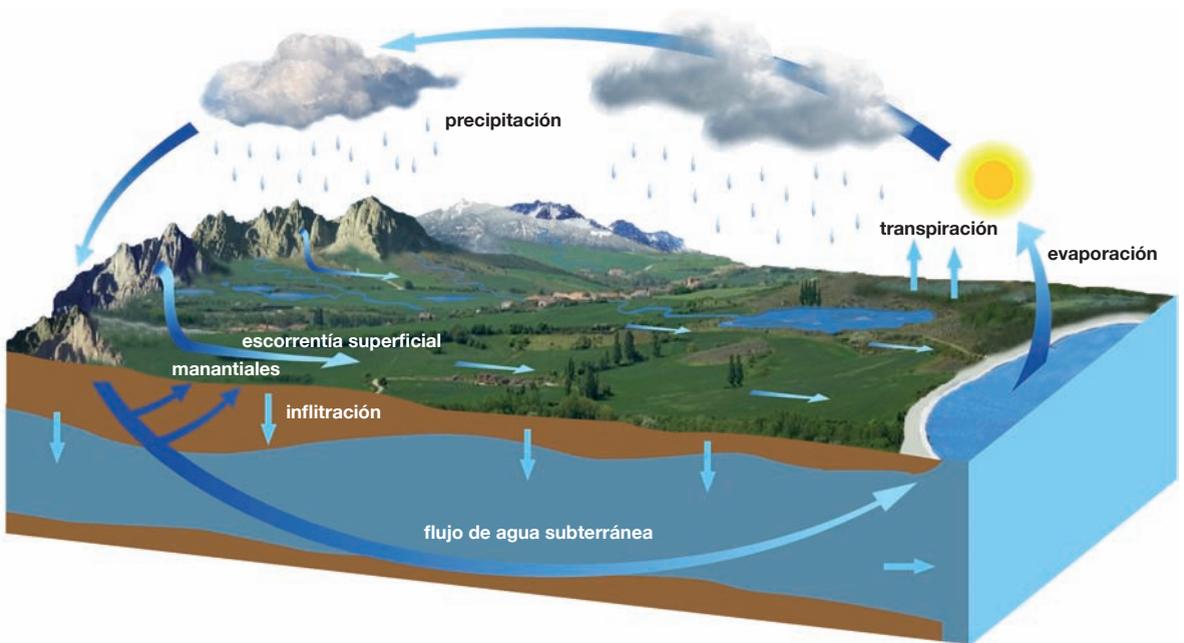


Figura 1. El Ciclo Hidrológico

La energía suministrada por el sol provoca la evaporación del agua existente en océanos, mares, lagos, ríos y embalses. De igual forma, la vegetación también contribuye a este proceso mediante la transpiración. El agua evapotranspirada puede condensarse con el frío dando lugar a pequeñas partículas que forman las nubes y la niebla. De esta manera, el agua retornará a la superficie del terreno y a los océanos en forma de precipitación (lluvia, nieve o granizo, rocío o escarcha). Sin embargo, se debe tener en cuenta que parte de la precipitación no alcanza la superficie del terreno, al poder evaporarse durante su caída, o ser interceptada por la vegetación o por los edificios, entre otros, y ser devuelta a la atmósfera al poco tiempo en forma de vapor (López-Geta, *et al.*, 2001 y 2009).

Cuando el agua líquida llega a la superficie, una parte queda retenida en charcas o pequeños surcos, y en su mayoría vuelve a la atmósfera. Parte del agua depositada sobre la superficie terrestre va a circular y formar la *escorrentía superficial directa* y la *subsuperficial o hipodérmica*, que se concentra en pequeños regueros, que se van a reunir en arroyos y más tarde van a desembocar en los ríos. Al mismo tiempo, parte de la precipitación se infiltra.

La *infiltración* depende del tipo y humedad del suelo y de la intensidad y duración de la precipitación. El agua infiltrada primero 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 la *escorrentía superficial*. Ésta y la escorrentía subterránea constituyen la *escorrentía total*, que va a confluir a los ríos para terminar en lagos o en el mar, cerrándose de este modo el Ciclo del Agua (Tarbuck y Lutengs, 2004).

Por otro lado, hay que señalar que el agua no está distribuida uniformemente en la naturaleza. Existen distintos compartimentos unidos entre sí que tienen distintos volúmenes, y por tanto diferentes tiempos de residencia. El porcentaje de distribución de las principales formas en las que el agua participa en el ciclo hidrológico es el que se muestra en la **figura 2**. Hay también una pequeñísima fracción de agua que se encuentra en forma de vapor atmosférico y formando parte de la biomasa.

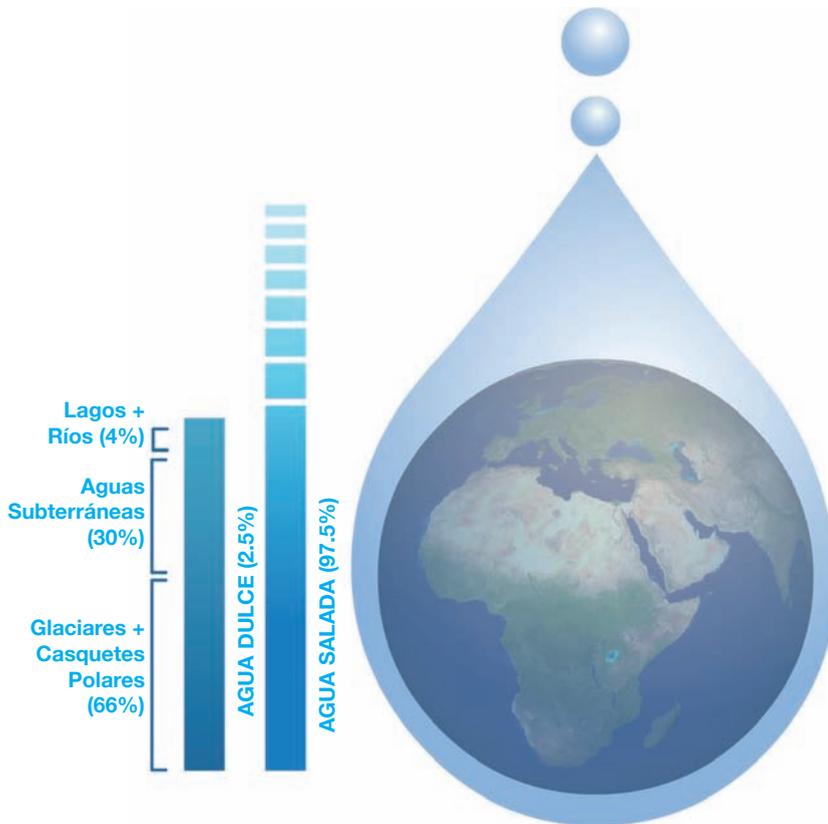


Figura 2. Distribución del agua en el planeta

De esta figura se deduce que buena parte del agua dulce de nuestro planeta es agua subterránea, dado que si se elimina el agua almacenada en glaciares y casquetes polares –de muy difícil aprovechamiento– y se compara el volumen de agua subterránea respecto al volumen de agua que se almacena en lagos y ríos, se comprueba que la relación es de 75 a 1.

Agua subterránea, un recurso natural



- El agua subterránea
- ¿Qué es un acuífero?
 - Zonas de un acuífero
- Clasificación de los acuíferos
 - Según la presión hidrostática
 - Según el tipo de materiales
- Composición de las aguas subterráneas.
 - Importancia y ejemplos
- Métodos de extracción de las aguas subterráneas
- Usos del agua subterránea
 - Población abastecida y volumen de agua subterránea utilizado
- Presiones e impactos relacionados con el agua subterránea
 - Uso intensivo de las aguas subterráneas
 - Contaminación de acuíferos
- Presente y futuro de las aguas subterráneas
 - Uso conjunto de las aguas superficiales y subterráneas
 - Políticas, estrategias y medidas de gestión



EL AGUA SUBTERRÁNEA

Es la que está y circula bajo la superficie del terreno, generando las condiciones necesarias para la subsistencia de la vegetación y de la micro y macrofauna; en definitiva, para la existencia y la permanencia de numerosos ecosistemas. Al mismo tiempo, el agua subterránea permite la existencia de ríos, lagos y *manantiales*; genera zonas de descarga difusa muy variadas, entre las que destacan algunos de los humedales más importantes; origina paisajes costeros y de interior muy particulares, como marismas, marjales, lagunas, etc.; alimenta masas vegetales de *freatofitas*, tarajales y carrizales, de singular valor estético y ambiental, en especial en los países áridos y semiáridos. De igual forma, el agua subterránea es parte fundamental del patrimonio cultural, natural y emocional de cada lugar. No en vano los manantiales y las fuentes son, para muchos pueblos, elementos sobresalientes de su legado histórico y cultural, además de formar parte de sus señas de identidad.

El agua subterránea circula a través del terreno (**Figura 3**) para fluir de forma natural por manantiales, zonas de rezume, ríos, o directamente al mar, aunque también es posible que sea captada por el hombre de forma artificial, mediante pozos, galerías u otro tipo de obras.

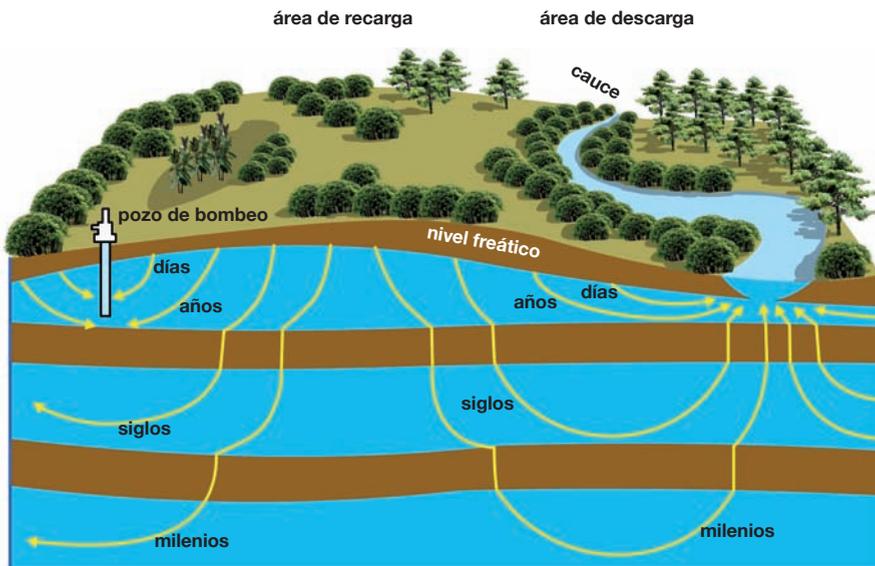


Figura 3. Áreas de recarga y descarga, líneas de flujo y tiempos de tránsito en un acuífero. Las flechas indican distintas trayectorias y tiempos de retorno a la superficie (basado en US Geological Survey, "Science Resources For Undergraduate Education")



Acuífero kárstico
(foto: Francisco J. Hoyos)

El agua subterránea se renueva constantemente gracias a la recarga, que proviene fundamentalmente del agua de precipitación; también puede producirse a partir de la infiltración de la escorrentía superficial; subterráneamente de otros acuíferos próximos o de retornos de ciertos usos, como los que proceden del regadío (en general del orden del 20%).

Una de las características fundamentales del agua subterránea es la reducida velocidad de su desplazamiento. La velocidad media puede variar de decímetros a centenares de metros al cabo del año; sólo en el caso de los *acuíferos kársticos* y de las rocas muy fracturadas pueden existir conductos preferentes, en los que el agua puede circular a velocidades similares a las de corrientes superficiales (López-Geta *et al.*, 2001 y 2009). 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 (López-Geta *et al.*, 2001 y 2009).

El agua que circula por un río (escorrentía total) proviene de la escorrentía superficial y de la descarga de los acuíferos (escorrentía subterránea de forma puntual o difusa), tal como se ilustra en la **figura 4**. En gran parte de la Península Ibérica la escorrentía superficial se produce principalmente durante el invierno, y es en general de carácter intermitente y de corta duración. En verano y comienzos del otoño la mayor parte del agua que circula por sus cauces es de origen subterráneo (*caudal de base*). Los caudales suelen ser máximos al final de invierno o principios de la primavera, cuando los acuíferos presentan *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.

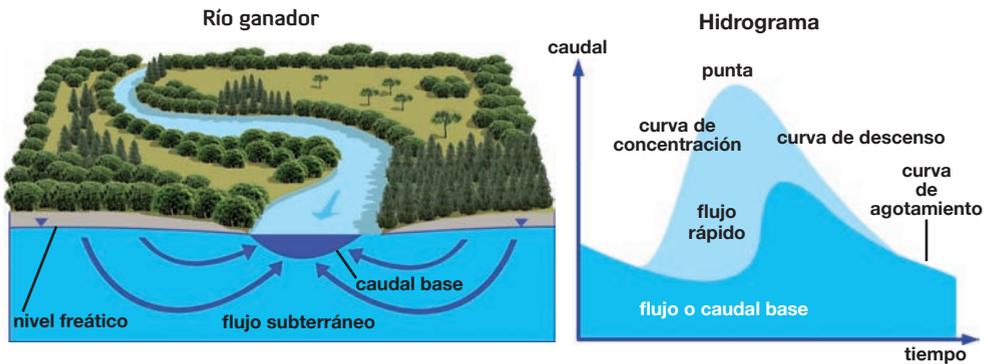


Figura 4. Separación de las componentes de agua superficial y subterránea en el hidrograma de un río (basado en www.ec.gc.ca/Water/en/nature/grdwtr/egdwttr.htm)



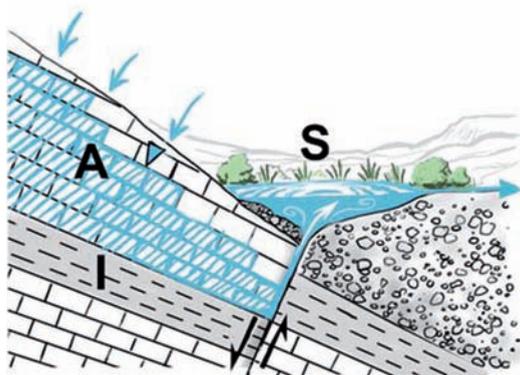
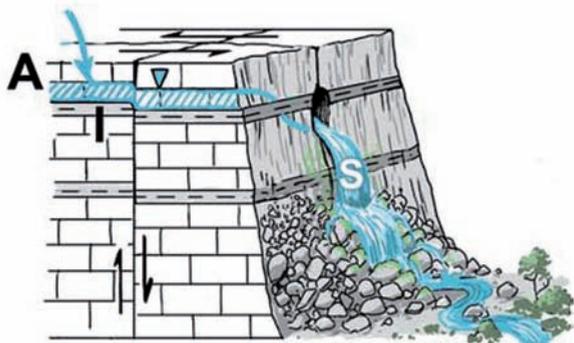
Cauce alimentado por un manantial (foto: Luis Medina)

Los manantiales también contribuyen a engrosar y mantener los caudales de los ríos, con mayor importancia en los períodos secos en los que las precipitaciones tienen escasa presencia (López-Geta *et al.*, 2001 Y 2009). Un manantial es un punto o zona del terreno en la que, de modo natural, el agua fluye a la superficie en cantidad apreciable procedente de un acuífero. Es fácil comprender el funcionamiento de los manantiales pensando en ellos como en un simple desagüe o aliviadero de un embalse subterráneo, de manera que si el embalse se mantiene lleno, el manantial arrojará el excedente que no puede almacenar. Pero si el nivel bajara por debajo de la altura del manantial, éste se secaría. Esto explica las variaciones de caudal de los manantiales e, incluso, que a veces permanezcan secos un cierto tiempo, hasta años, y más tarde vuelvan a funcionar, generalmente después de ciclos climáticos húmedos.



Surgencia, habitualmente seca, tras un periodo de intensas precipitaciones
(foto: Luis Medina)

Hay que indicar que cualquier descarga natural de agua en la superficie del suelo lo suficientemente grande para no pasar desapercibida puede ser denominada manantial. Las descargas puntuales de orden menor reciben el nombre de zonas de *descarga difusa*, a veces también catalogadas en conjunto como manantiales.



Pero los manantiales brotan no solamente en la superficie del suelo, sino también bajo la superficie de lagos, embalses, ríos y océanos. Son los manantiales subacuáticos (González *et al.*, 2004). Existen, en cualquier caso, numerosos ambientes característicos del tipo de descarga que se producen en los manantiales, con ecosistemas peculiares asociados a ellos (Figura 5).

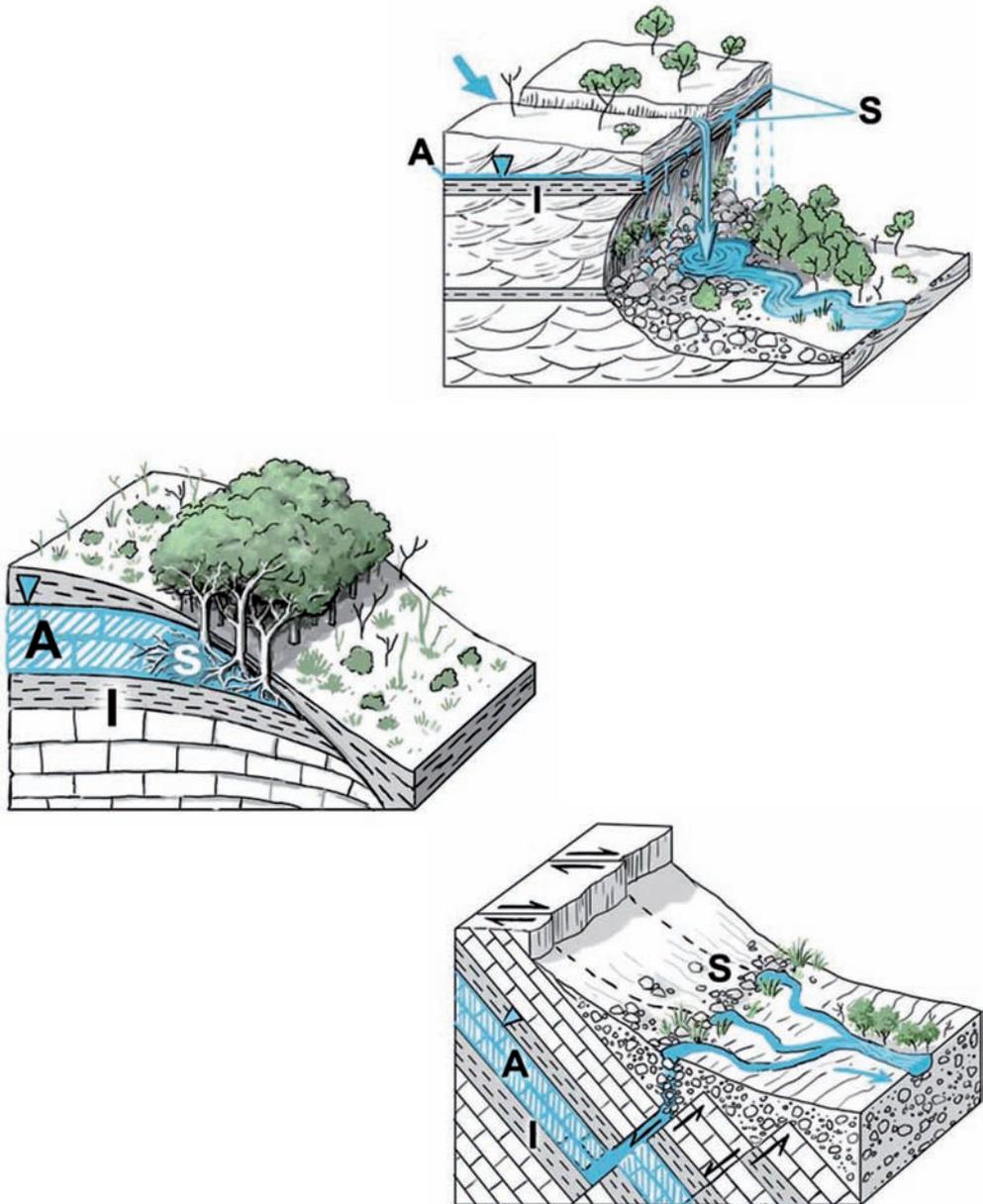


Figura 5. Algunos ambientes característicos de descarga en manantiales (Springer y Stevens, 2009). A: acuífero; I: material impermeable; S: surgencia

En cuanto a su génesis, la causa más frecuente de la aparición de los manantiales son los cambios horizontales o verticales de la *permeabilidad*, bien por contacto entre distintas formaciones geológicas o por cambios significativos dentro de la propia formación.

En general, se pueden denominar manantiales de contacto, aunque su tipología es tan variada como los propios tipos de contacto entre materiales: con un impermeable en la base de la formación, con un impermeable en el techo, con impermeables laterales (generalmente por fallas u otros accidentes geológicos) o por cambios internos de permeabilidad. Estos cambios de permeabilidad pueden ser intrínsecos a la roca o debidos a fracturas (**Figura 6**).

También se puede hablar de manantiales permanentes, estacionales o intermitentes, más o menos caudalosos y con un régimen más o menos acusado de variación estacional o interanual: es lo que en Hidrogeología se conoce como su “régimen de descarga”.

Los principales factores que condicionan el tipo de manantial son la naturaleza y permeabilidad del sector del acuífero que drenan, la extensión de su área de recarga, la cuantía, tipo y régimen de las precipitaciones que ésta recibe y su distancia hasta la zona de surgencia del manantial, salvo en casos más complejos de varios acuíferos, interrelacionados o en contacto con otras *masas de agua*, también frecuentes en la naturaleza.

Desde el punto de vista de las características físico-químicas del agua puede haber manantiales de muy distintas *facies hidroquímicas* según las concentraciones de los diferentes iones disueltos en el agua que drenan. También existen manantiales termales, que son los que presentan una temperatura superior en 4°C a la media del lugar.

El agua que surge de los manantiales permite atender el suministro de agua potable de gran número de poblaciones y contribuye al regadío de muchas zonas. Ligadas a estas surgencias se localizan áreas de esparcimiento y recreo. Algunas de estas zonas, cuyas aguas presentan un carácter termal o minero-medicinal, se ubican en lugares de descanso con fines terapéuticos.

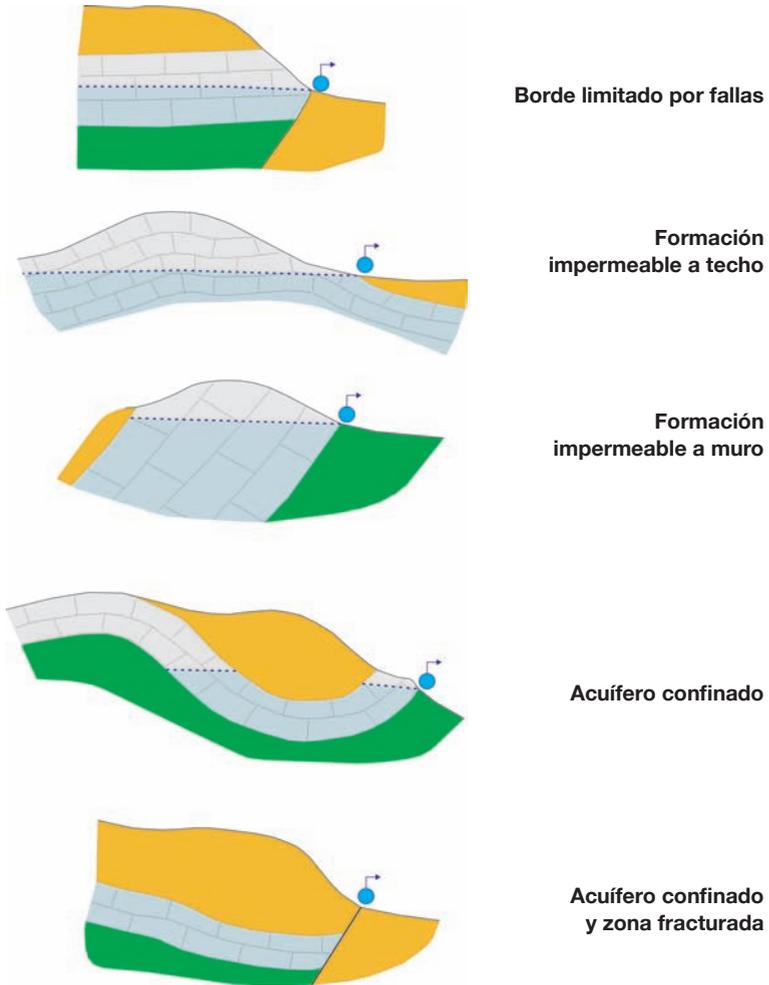


Figura 6. Algunas tipologías frecuentes de manantiales
(modificado de González *et al.*, 2006)

¿QUÉ ES UN ACUÍFERO?

Un *acuífero* (del latín “aqua fero”, “transportar agua”) es aquella formación geológica capaz de almacenar y transmitir el agua a través de ella en cantidades significativas, de modo que puede extraerse mediante obras de captación; presenta dimensiones muy variadas, desde pocas hectáreas de superficie hasta miles de kilómetros cuadrados; y desde escasos metros de espesor a cientos o miles de metros.

Se llaman *acuitardos* (“que frenan el agua “) a las rocas porosas que pueden contener agua, pero la transmiten muy lentamente. En estos materiales es difícil extraer el agua mediante captaciones, pero pueden intercambiar importantes cantidades de agua con acuíferos limítrofes, siempre que la superficie de contacto sea suficientemente grande.

Para definir aquellas formaciones geológicas que contienen agua en su interior pero que no la transmiten, y, por tanto, no permiten extraerla en cantidad suficiente para su aprovechamiento, se utiliza el término *acuicludo* (que “encierran el agua”). Cuando no contienen agua se denominan acuífugos (que “repelen el agua”). En la práctica, no existen formaciones geológicas que puedan considerarse *acuífugos*, en sentido estricto (López-Geta *et al.*, 2001 y 2009).

La energía que permite el movimiento del agua subterránea la proporciona la fuerza de la gravedad. Como respuesta a ello, el agua se mueve desde áreas donde el *nivel piezométrico* es alto a zonas donde el nivel piezométrico es menor. Es decir, que el agua no se mueve desde zonas de mayor presión a zonas de menor presión (si fuera así, el fondo del agua en un vaso ascendería por sí sola a superficie), sino cuando existen variaciones del nivel piezométrico (**Figura 7**). Por ello, algunas trayectorias pueden ser ascendentes y entrar al fondo de un cauce o por la base de los humedales, tal como aparece en las figuras **3** y **4**.

Los conceptos modernos de la circulación del agua subterránea fueron formulados a mediados del siglo XIX. Durante este período, Henri Darcy, un ingeniero francés que estudiaba el abastecimiento de agua de la ciudad de Dijon, en el centro-sur de Francia, formuló una ley que ahora lleva su nombre y que es básica para comprender el movimiento del agua subterránea. Darcy demostró que si la permeabilidad se mantiene uniforme, la velocidad del agua subterránea aumentará conforme lo hace la pendiente del nivel piezométrico.

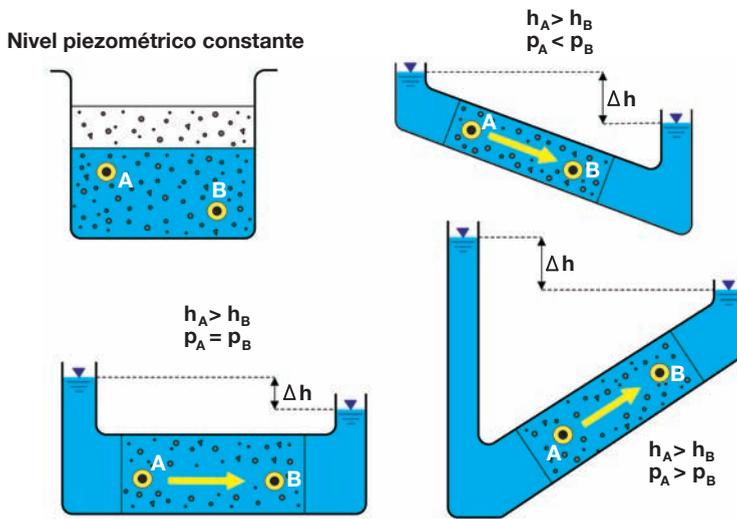


Figura 7. Movimiento del agua de puntos de mayor a menor nivel piezométrico (modificado de Custodio y Llamas, 2001).
 En el caso de nivel piezométrico constante no existe movimiento, a pesar de ser mayor la presión hidrostática en el punto B que en el A.
 h_A : nivel piezométrico en el punto A; p_A : presión hidrostática en el punto A; Δh : diferencia de niveles piezométricos entre los puntos A y B

La pendiente del nivel piezométrico, conocida como *gradiente hidráulico*, se determina dividiendo la diferencia vertical entre los puntos de recarga y descarga (una cantidad conocida como *carga hidrostática*) por la longitud del flujo entre esos puntos. El movimiento del agua subterránea en las formaciones geológicas se basa, por tanto, 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*.

La velocidad de circulación del agua por el terreno depende de su permeabilidad. La cantidad de agua que puede contener una roca saturada depende de la porosidad (volumen total del espacio poroso que se halla en un volumen determinado de roca). Es imprescindible que la geometría y disposición de las formaciones acuíferas en relación con otras colindantes permita la acumulación de agua en su seno a partir de las precipitaciones, pues en caso contrario se estaría ante acuíferos drenados en las que tampoco sería posible la captación de agua. En definitiva, son la permeabilidad, porosidad y estructura de las formaciones geológicas las que condicionan la existencia de acuíferos, también denominados en ocasiones embalses subterráneos.

Zonas de un acuífero

Zona no saturada: terreno comprendido entre la superficie del suelo y la zona saturada. En ella los poros están ocupados por 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. Ésta se puede dividir en tres partes:

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, topes, etc.) o lenta (anélidos y similares); en ella la humedad del suelo varía mucho con los cambios estacionales de la vegetación.

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.

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: franja del terreno situada por debajo de cierta profundidad donde el agua ocupa la totalidad de los huecos. En esta zona 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 lagos, mar, manantiales, y de forma provocada hacia las captaciones subterráneas especialmente por bombeos, drenajes o galerías.

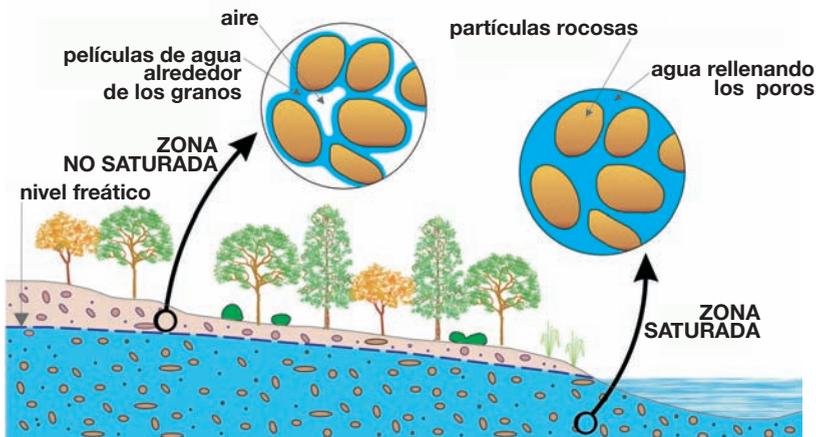


Figura 8. Zonas de un acuífero

(basado en US Geological Survey, "Science Resources For Undergraduate Education")

El nivel freático es el límite superior de la zona saturada de un *acuífero libre*, lo que significa que tal límite está en contacto con el aire de la zona no saturada y, por tanto, sometido a igual presión que la atmosférica. El **nivel piezométrico** es la altura que alcanzaría el agua si no estuviera confinada en la parte superior por un estrato impermeable.

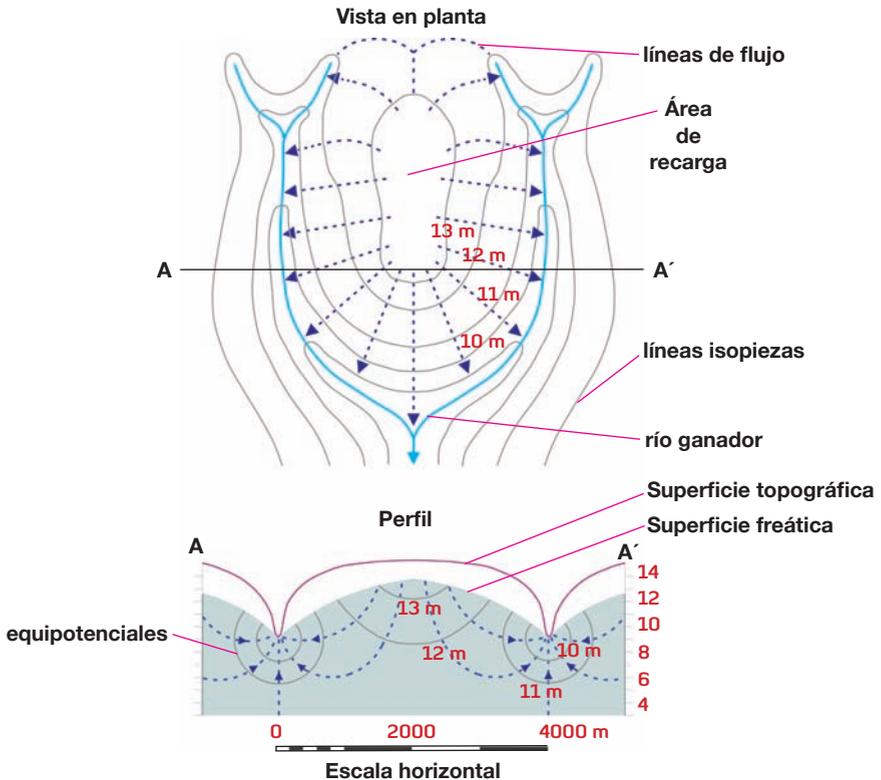


Figura 9. Red de flujo en un acuífero libre. Planta y perfil
 (Hearth, 1987, en Rebollo, 2007)

Aunque no puede observarse directamente, la altitud o la cota del nivel freático puede cartografiarse (**Figura 9**) allí donde los pozos alcanzan el nivel freático. Estos mapas revelan que la *superficie freática* a menudo no es horizontal: su forma suele ser una réplica suavizada de la topografía exterior cuando el acuífero funciona en *régimen natural*, alcanzando sus mayores elevaciones debajo de las colinas y descendiendo hacia los valles. En zonas pantanosas el nivel freático coincide precisamente con la superficie del terreno, mientras que los lagos y lagunas ocupan generalmente áreas bajas en que el nivel freático está por encima de la superficie del terreno. Sin embargo, en zonas con materiales permeables hasta gran profundidad, la superficie freática suele ser muy tendida, casi horizontal.

Varios factores, además de la explotación artificial de los acuíferos, contribuyen a la variación de la cota del nivel freático. En épocas de reducida pluviometría o de explotación excesiva, el nivel freático puede descender por debajo del fondo de los pozos, dejándolos secos. En otros casos las variaciones del nivel freático se deben a las fluctuaciones estacionales e interanuales de la precipitación y la variación espacial de la permeabilidad.

Cuando el cauce de un río intersecta a la superficie freática, se produce una descarga de agua difusa desde el acuífero al río. Se dice en este caso que el río es ganador (**Figura 10**).

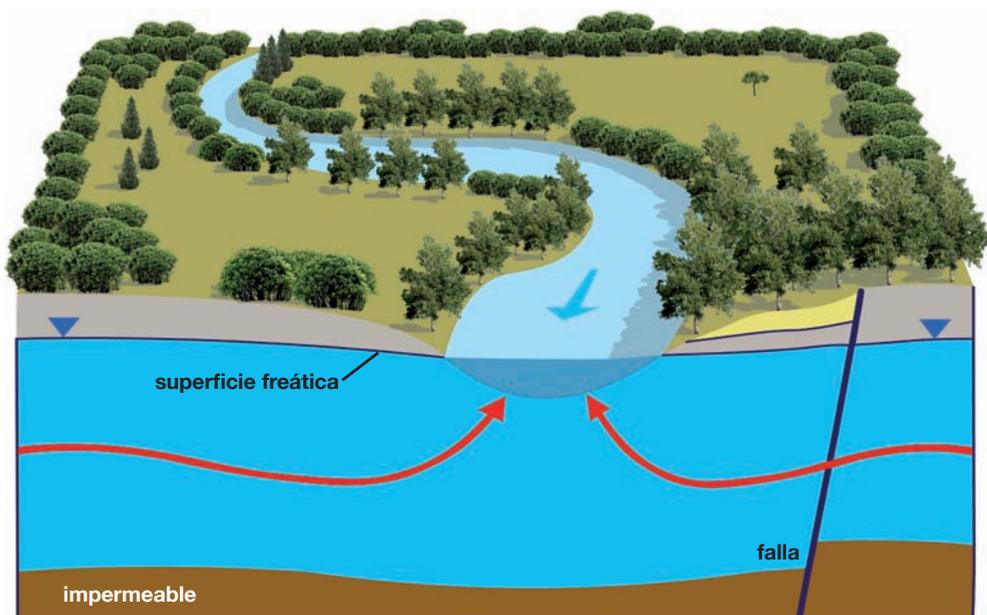


Figura 10. Sección de un río efluente o ganador

Por el contrario, puede ocurrir que el cauce del río esté por encima de la superficie freática. En este caso, estaríamos ante un río influente o perdedor (**Figura 11**).

Ahora bien, un mismo río a lo largo de su recorrido suele presentar tramos ganadores y tramos perdedores, en función de la disposición de la superficie freática; aunque también es habitual que un mismo tramo sea ganador en unas épocas del año y perdedor en otras, ya que la posición de la superficie freática suele variar de una época a otra.

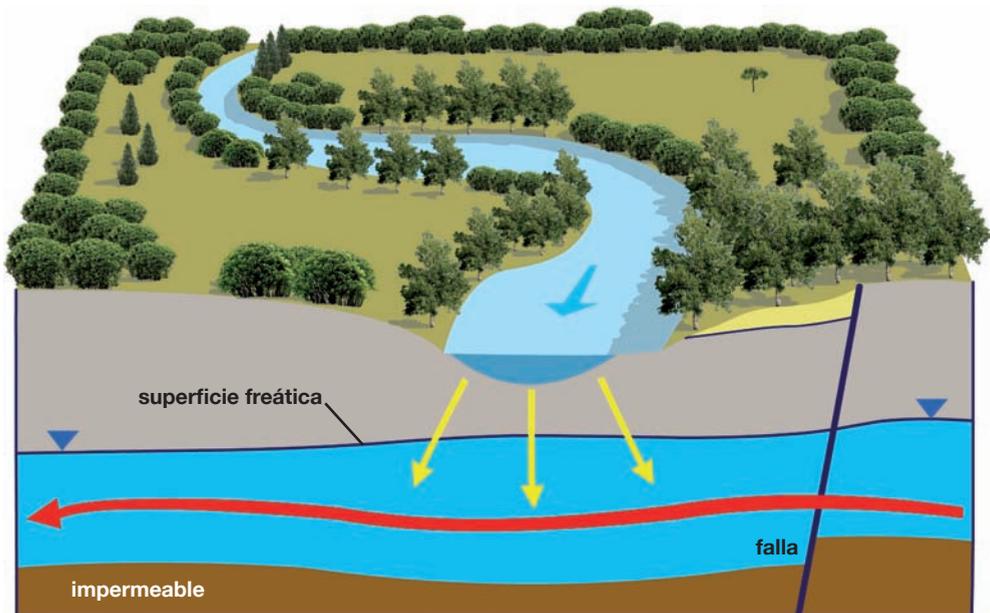


Figura 11. Sección de un río influente o perdedor

CLASIFICACIÓN DE LOS ACUÍFEROS

Según la presión hidrostática

ACUÍFEROS LIBRES, NO CONFINADOS O FREÁTICOS: se definen como aquellos en los que el límite superior de la masa de agua forma una superficie real que está en contacto con el aire, por tanto, a presión atmosférica (**Figura 12**). Cuando se perfora un pozo desde la superficie del terreno, el agua aparece en el pozo al alcanzar el nivel freático (del griego “phreatos”, pozo). La recarga de este tipo de acuíferos se realiza principalmente por la infiltración de la precipitación a través del suelo y de la zona no saturada, o por infiltración de agua de ríos o lagos.

ACUÍFEROS CONFINADOS, CAUTIVOS O A PRESIÓN: son aquellos que en su límite superior o techo, el agua está a una presión superior a la presión 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. El pozo será surgente cuando el nivel piezométrico esté situado a cota superior a la boca del pozo. La recarga de un acuífero confinado procede principalmente de la lluvia que se filtra directamente a través de la zona en la que aflora la formación acuífera, es decir, donde el acuífero se comporta como libre, o bien cuando está semiconfinado.

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 de agua, que puede hacerse desde o hacia el acuitardo, e incluso variar con el tiempo, según sean los valores relativos de los niveles piezométricos. A este tipo de alimentación desde el acuitardo se la denomina goteo (López-Geta *et al.*, 2001 y 2009).

La presencia de lentejones o capas discontinuas de baja permeabilidad en la zona no saturada es de gran interés, dado que en algunos casos se pueden llegar a formar **acuíferos colgados**. Estas capas de baja permeabilidad 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 bien hacia la zona saturada regional in-frayacente, bien a través de pequeños manantiales o zonas de rezume (**Figura 12**).

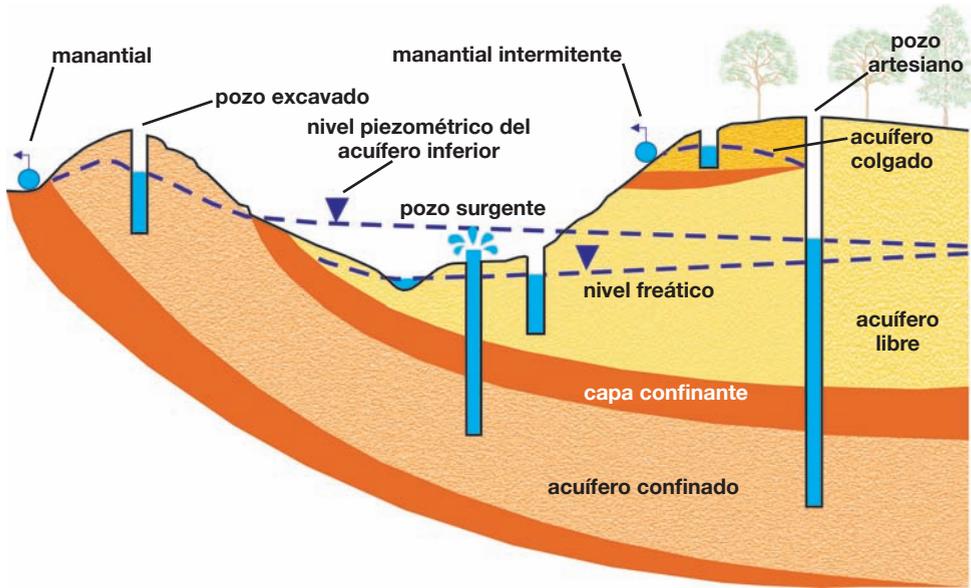


Figura 12. Tipos de acuíferos
(modificado de Brassington, 1995)

Según el tipo de materiales que constituyen el acuífero

DEPÓSITOS NO CONSOLIDADOS DE MATERIALES SUELTOS: son formaciones geológicas constituidas por la acumulación de partículas transportadas por el agua, viento o hielo, en ambientes muy diversos: fluvial, lacustre, glacial o marino. A menudo son sedimentos geológicamente recientes, con tamaños de grano que van desde el limo o la arena fina hasta las gravas y bloques. Debido a su elevada porosidad suministran notables caudales si se explotan convenientemente; es el caso, entre otros, del acuífero de Almonte-Marismas (Huelva y Sevilla), en el que se ubica el Parque Nacional de Doñana. El agua percola fácilmente y así la infiltración se produce hasta que alcanza la zona saturada del acuífero, acumulándose grandes cantidades de agua.

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: detríticas (conglomerados, areniscas, arcillas), químicas (calizas, dolomías, margas), y orgánicas (carbones). De gran interés hidrogeológico son las calizas y las dolomías. Varían mucho en densidad, porosidad y permeabilidad, según haya sido el ambiente sedimentario existente en su formación, su posterior fracturación y el desarrollo final de zonas permeables producidas por disolución del carbonato, sobre todo en las calizas (**Figura 13**). Hay que tener en cuenta que si estas rocas no están karstificadas son poco permeables. Las rocas carbonáticas presentan excepcionales características para almacenar y conducir el agua. Las calizas masivas presentan grietas y hendiduras producidas por la disolución del agua que van a servir de conductos preferentes para su circulación. En Andalucía existen muchos acuíferos de este tipo, entre los que destacan los de la Sierra de Cazorla, de las Sierras Subbéticas o los macizos carbonáticos de la vertiente Mediterránea, formados fundamentalmente por calizas y dolomías. Las areniscas (arenas consolidadas) y calcarenitas (areniscas de granos carbonáticos) suelen constituir también importantes acuíferos, como las calcarenitas que afloran en el entorno de Carmona (Sevilla). Las rocas sedimentarias consolidadas contienen del orden del 75% de las aguas subterráneas continentales españolas.

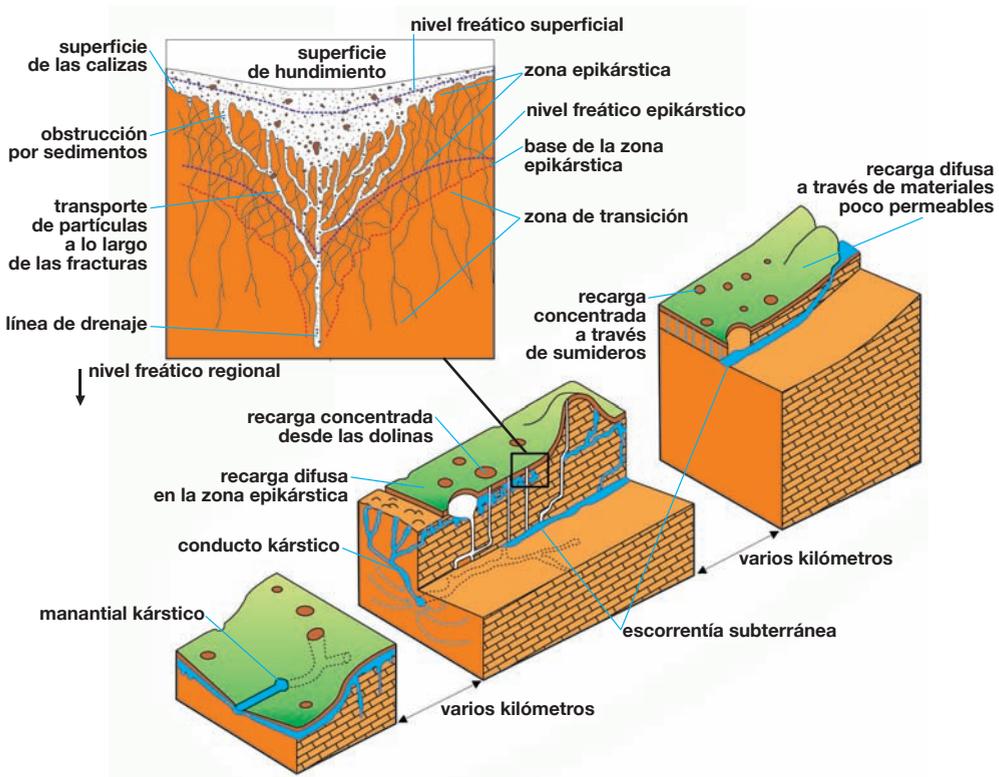


Figura 13. Modelo conceptual de acuífero kárstico
(modificado de Fernández, 2004, en Antigüedad y Morales, 2007)

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, como el granito o el gabro), según se consoliden en la superficie o en el interior de la corteza terrestre respectivamente. Las rocas metamórficas son las que han experimentado profundas transformaciones físicas y químicas por efecto de altas presiones y temperaturas en el interior de la corteza terrestre, dando lugar a cambios en la propia estructura de la roca (p.ej., pizarras, esquistos, etc.).

Las posibilidades de formar acuíferos en las rocas plutónicas y metamórficas se reduce a la zona alterada superficial y a las zonas fracturadas por fallas y diaclasas, que permiten una apreciable circulación de agua (**Figura 14** y **Figura 15**). Este tipo de acuíferos es frecuente en Sierra Morena. Tienen importancia para el abastecimiento a pequeños núcleos de población y a caseríos del medio rural.

En las rocas volcánicas es difícil definir su comportamiento hidrogeológico, ya que pueden constituir o no acuíferos; su comportamiento es intermedio entre las rocas consolidadas porosas y las fracturadas. Los niveles de escorias, piroclastos y los diques juegan un papel muy importante. Los factores principales que condicionan el flujo del agua subterránea en ellas son la composición, la edad y, sobre todo, su grado de alteración. Estos acuíferos están bien representados en el área del Cabo de Gata, en Almería.

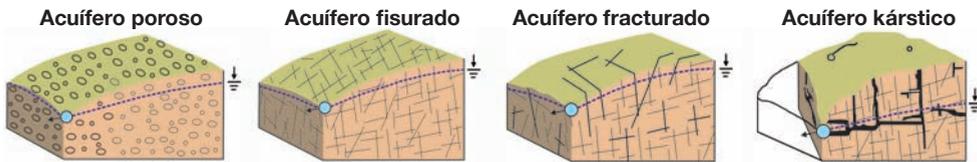


Figura 14. Tipos de acuíferos
(modificado de OFEG, 2003)

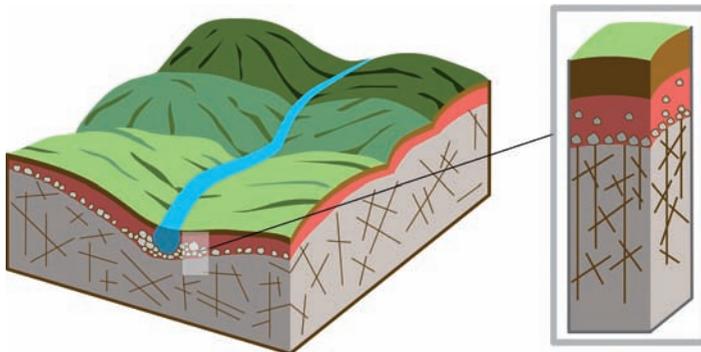


Figura 15. Modelo conceptual de acuíferos en rocas duras
(modificado de CIHS, 1996)

COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS IMPORTANCIA Y EJEMPLOS

El agua es el disolvente universal, y, 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 cuáles se desplazan, a la lenta velocidad con que se mueven y a la presencia del CO_2 y O_2 disueltos en el agua. Por estos motivos, en términos generales, el agua subterránea suele presentar una concentración iónica mayor que la de escorrentía superficial del mismo origen (López-Geta *et al.*, 2001 y 2009).

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 .

El tipo de flujo tiene una repercusión directa en la mineralización del agua subterránea (**Figura 16**). Aguas con largos recorridos suelen presentar, en igualdad con otras circunstancias, una mayor mineralización que aguas de corta circulación. Las aguas de flujos locales, próximas a su zona de recarga, suelen tener menos sólidos disueltos que las aguas de circulación profunda.

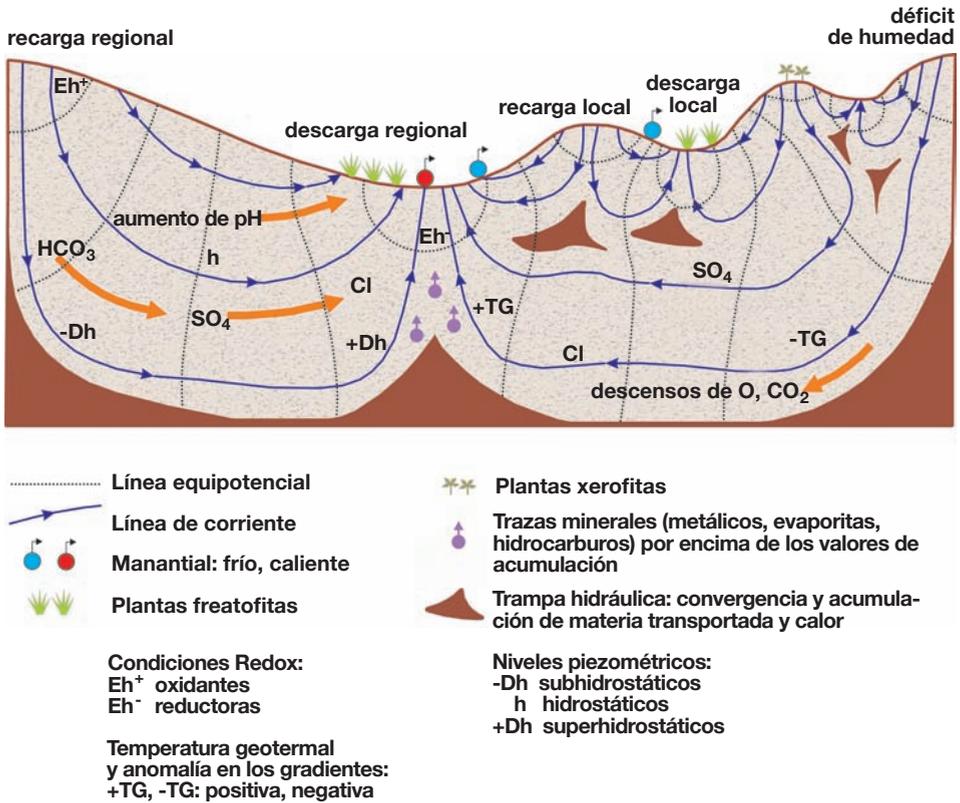


Figura 16. Efectos y manifestaciones del flujo subterráneo gobernado por la acción de la gravedad en una cuenca regional de carácter no confinado (modificado de Toth, 1990)

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,...), 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 oxidación-reducción. 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 marina), o cuando el terreno contiene materia orgánica.

A pesar de la gran variabilidad de los elementos presentes en el agua subterránea y de la de sus concentraciones, éstos han sido clasificados por su frecuencia de aparición y valor de concentración decreciente (**Cuadro 1**).

Constituyentes mayoritarios o fundamentales

Aniones: $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_4^{3-})$, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^-

Cationes: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , NH_4^+

Otros: CO_2 , O_2 , SiO_4H_4 o SiO_2

Constituyentes minoritarios o secundarios

Aniones: F^- , S^{2-} , SH^- , Br^- , I^- , NO_2^- , PO_4^{3-} , BO_3^-

Cationes: Mn^{2+} , Fe^{2+} , Li^+ , Sr^{2+} , Zn^{2+}

Constituyentes traza

Al^{3+} , Tl^{4+} , Co^{2+} , Cu^{2+} , Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cr^{3+} , etc.

Cuadro 1. Diferentes constituyentes presentes en las aguas subterráneas en función de su grado de concentración

Algunas de las características hidrogeoquímicas del agua subterránea están íntimamente ligadas al tipo de formación geológica por la que ha circulado. Así, las aguas subterráneas procedentes de los acuíferos carbonáticos son mayoritariamente bicarbonatadas cálcicas y magnésicas. Presentan mineralizaciones ligeras o medias, con conductividad eléctrica de 600-700 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y concentraciones de iones mayoritarios que rara vez superan los valores admisibles de potabilidad para consumo público. Predominan estas aguas en los acuíferos en la cabecera de los principales ríos existentes en territorio andaluz: es el caso de la cuenca alta del Guadalquivir, o de la cuenca Sur, e incluso en las formaciones carbonáticas existentes a lo largo de Sierra Morena.

Los acuíferos de tipo detrítico se caracterizan por la 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 ejemplos pueden citarse el aluvial del río Guadalquivir, el acuífero de Almonte-Marismas o el acuífero de la Vega de Granada. Su calidad química suele ser aceptable para todos los usos, aunque pueden presentar a veces contenidos en constituyentes mayoritarios que excedan los límites admisibles de potabilidad.

La composición de las aguas subterráneas de los acuíferos asociados a las rocas ígneas y metamórficas es muy heterogénea. Por lo general, las aguas subterráneas de estos acuíferos presentan a menudo baja mineralización y suelen ser aptas para consumo humano.

Por otro lado, la existencia de *rocas evaporíticas* en el terreno provoca un alto contenido en sulfatos, cloruros y sodio disueltos en el agua. Estas circunstancias se dan con cierta frecuencia en algunos lugares de Andalucía, como en el área de Antequera-Osuna, donde abunda este tipo de materiales.

MÉTODOS DE EXTRACCIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

Muchas poblaciones y ciudades se asentaron donde afloraban manantiales o en llanuras aluviales donde fácilmente se podían abrir pozos excavados. El desarrollo de bombas capaces de elevar agua desde grandes profundidades, junto a los avances de las técnicas de perforación, condujeron a la construcción de numerosos sondeos y perforaciones, en especial a partir de la segunda mitad del siglo XX (López-Geta *et al.*, 2001 y 2009).

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 excavaciones de pozos y construcción de galerías horizontales (**Figura 17**). En el primer caso, por lo general, se trata de obras de planta circular y pocos metros de profundidad, con un diámetro de uno a dos metros. El equipo consistía en una polea o sistema de impulsión por tracción animal (un ejemplo son las norias que salpicaban el paisaje de las llanuras de La Mancha) o eólico (como los molinos del entorno de Palma de Mallorca). En la actualidad esta forma manual de abrir pozos ha sido sustituida por máquinas perforadoras.

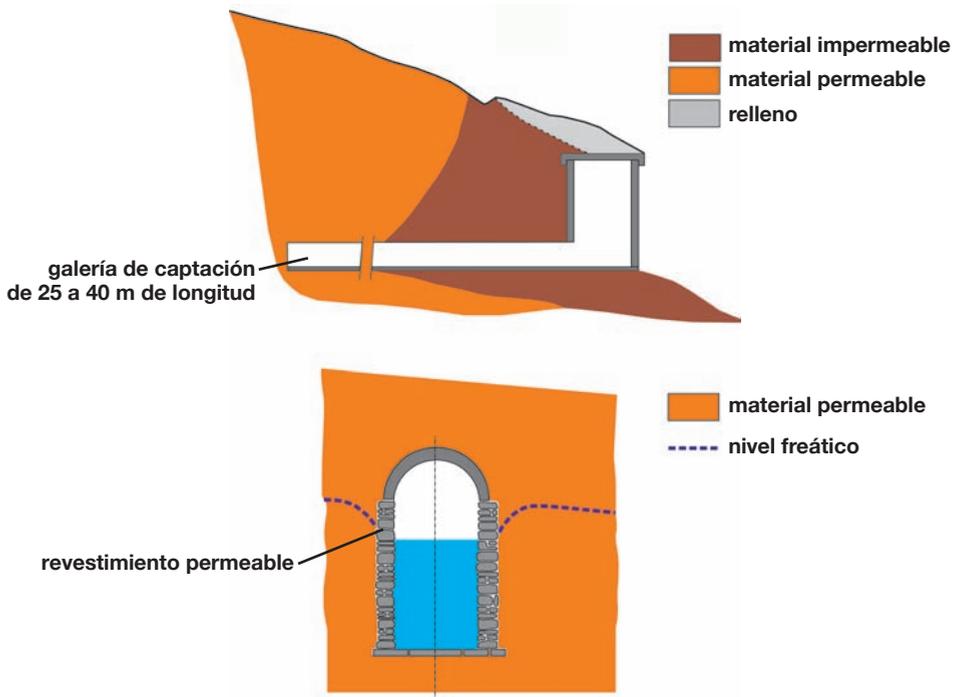


Figura 17. Galería para captación de aguas subterráneas (modificado de CIHS, 1996)

Las antiguas civilizaciones de Oriente, especialmente la persa, construyeron sistemas de galerías para captar y conducir el agua hasta los puntos de consumo (**Figura 18**); algunos datan del siglo IV antes de nuestra era y se denominan de distintas formas según el país (qanats en Siria, foggaras en Marruecos, galerías o minas de agua en España). Un sistema de este tipo abasteció a Sevilla desde la época romana hasta mediados del siglo XIX, a través de la canalización conocida como los Caños de Carmona, con parte de su trazado subterráneo y otra parte en superficie. Encontramos ejemplos similares en las ciudades de Madrid y Barcelona y en otros muchos lugares de Andalucía, 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 numerosas zonas se encuentran pozos excavados con o sin galerías de fondo y drenes laterales que favorecen la captación de aguas subterráneas.

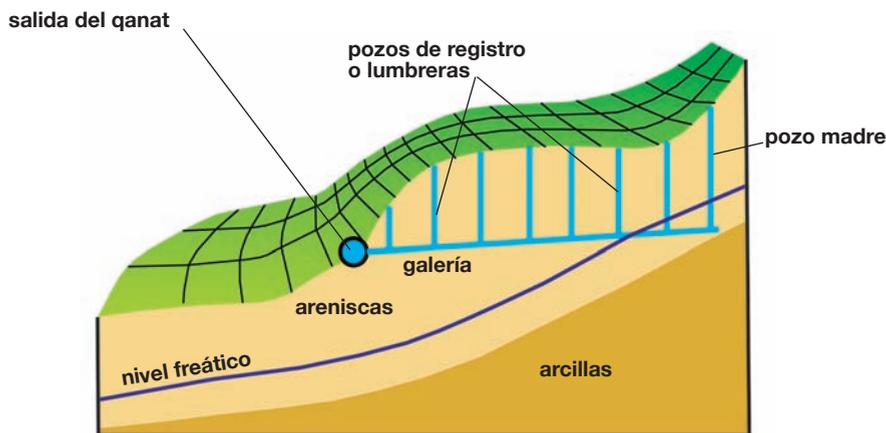


Figura 18. Sección tipo de un qanat
(basado en <http://wapedia.mobi/de/Qanat>)

Los pozos modernos requieren una sofisticada tecnología en la que se precisa un diseño técnico adecuado de la captación, así como un estudio detallado del acuífero. Con frecuencia se subestima la importancia que tienen un buen diseño y la construcción de un pozo. La duración de un pozo y su eficacia son función directa de la calidad de los materiales empleados y 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 o al 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 la redacción del correspondiente proyecto de detalle -en ocasiones precisa, además, de un estudio de impacto ambiental-, ejecución y dirección técnica de la obra, aplicación de las normas de seguridad y salud, así como un adecuado mantenimiento tras su realización.

Los **MÉTODOS DE PERFORACIÓN** de pozos o sondeos de explotación de aguas subterráneas más utilizados en la actualidad se pueden observar en la **figura 19**.

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 o areniscas cementadas, entre otros); sin embargo, muchos pozos en formaciones no consolidadas, constituidas por gravas, están construidos con este sistema. El resultado de la perforación depende en gran medida de la experiencia del sondista.

PERFORACIÓN A ROTACIÓN: consiste en la trituración de la roca por medio de un útil de corte que normalmente contiene una cabeza giratoria o tricono que desgasta la roca. El material triturado es 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 arenas, limos y gravas.

ROTOPERCUSIÓN: se utiliza para terrenos duros, como las cuarcitas, granitos y pizarras sin alterar. Es un método mixto entre los dos anteriores, que consta de una cabeza percusora o martillo 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.

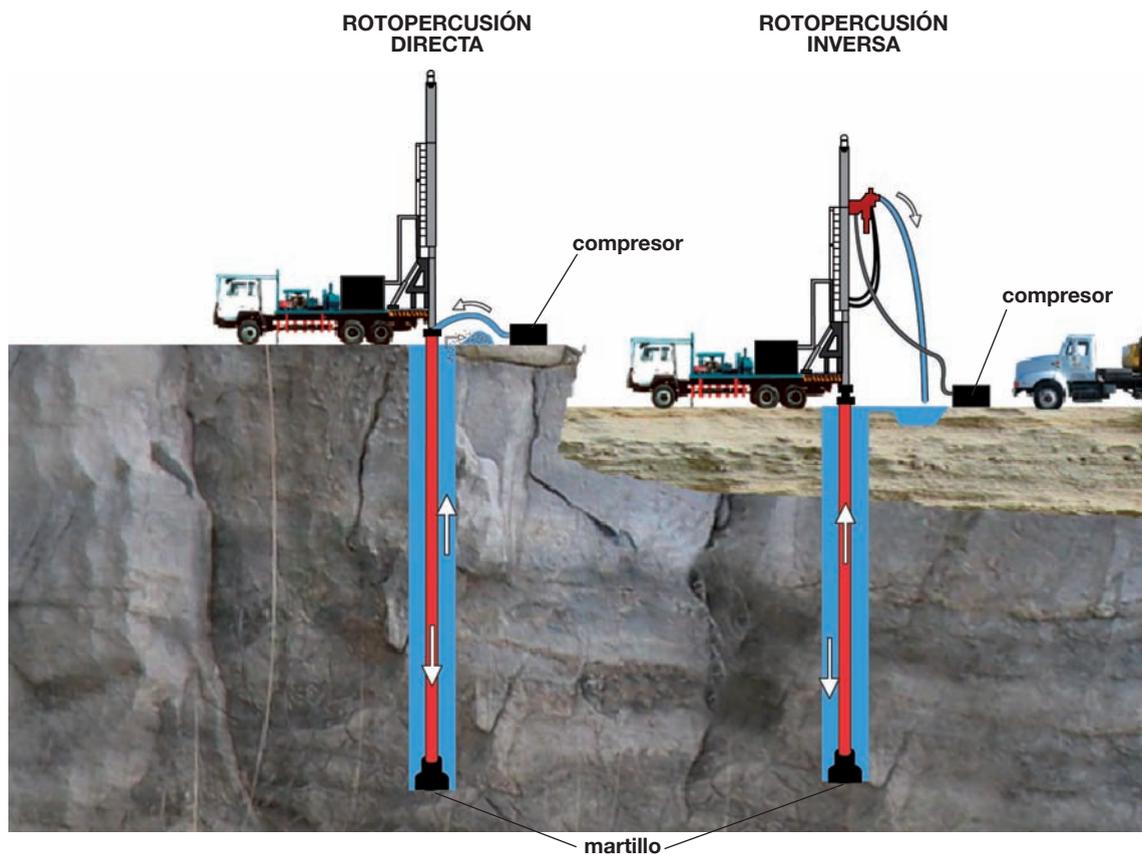


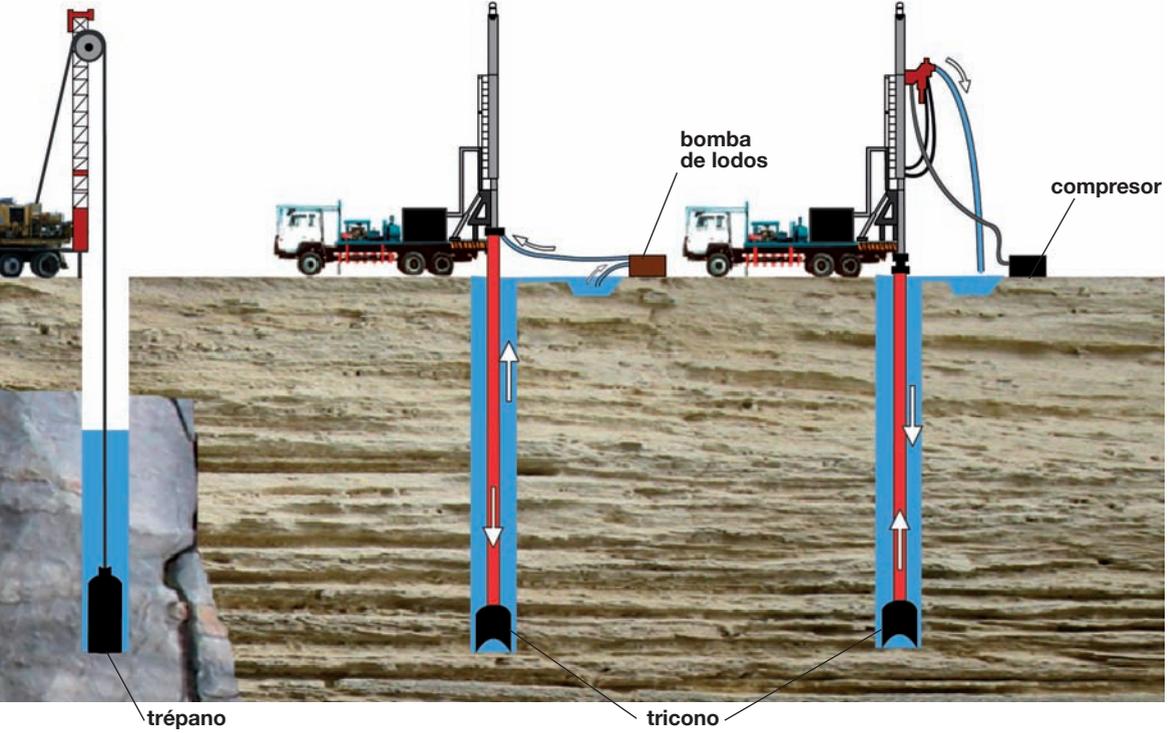
Figura 19. Métodos de perforación

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. Los esquemas de entubación y fase de instalación más habituales son los que se indican en las **figuras 20 y 21**. Para permitir el paso del agua en sondeos ubicados en acuíferos detríticos, se utilizan filtros de diversos diseños y naturaleza (metálicos o de 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.

PERCUSIÓN

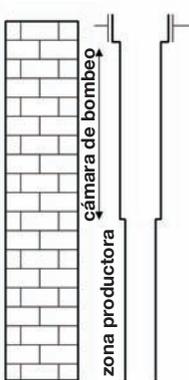
ROTACIÓN
CON CIRCULACIÓN DIRECTA

ROTACIÓN
CON CIRCULACIÓN INVERSA



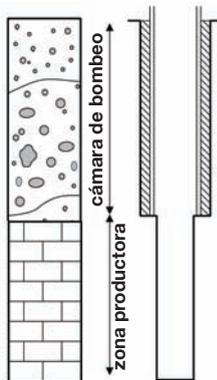
a) Sondeo sin entubar:

Materiales consolidados que no se derrumban



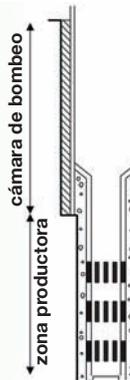
b) Sondeo con entubación parcial:

Sólo materiales consolidados en la zona productora



c) Sondeo con zona productora independiente:

Para todo tipo de medios litológicos, consolidados y no consolidados



d) Sondeo con zona productora solidaria con la entubación:

Para todo tipo de medios litológicos, consolidados y no consolidados

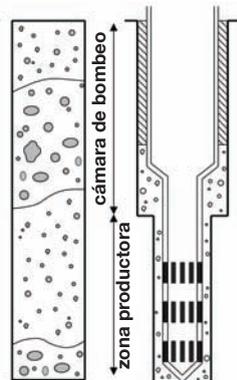


Figura 20. Esquemas de entubación (a,b,c y d) más frecuentes de sondeos de explotación de aguas subterráneas (modificado de Bayó, 1996)

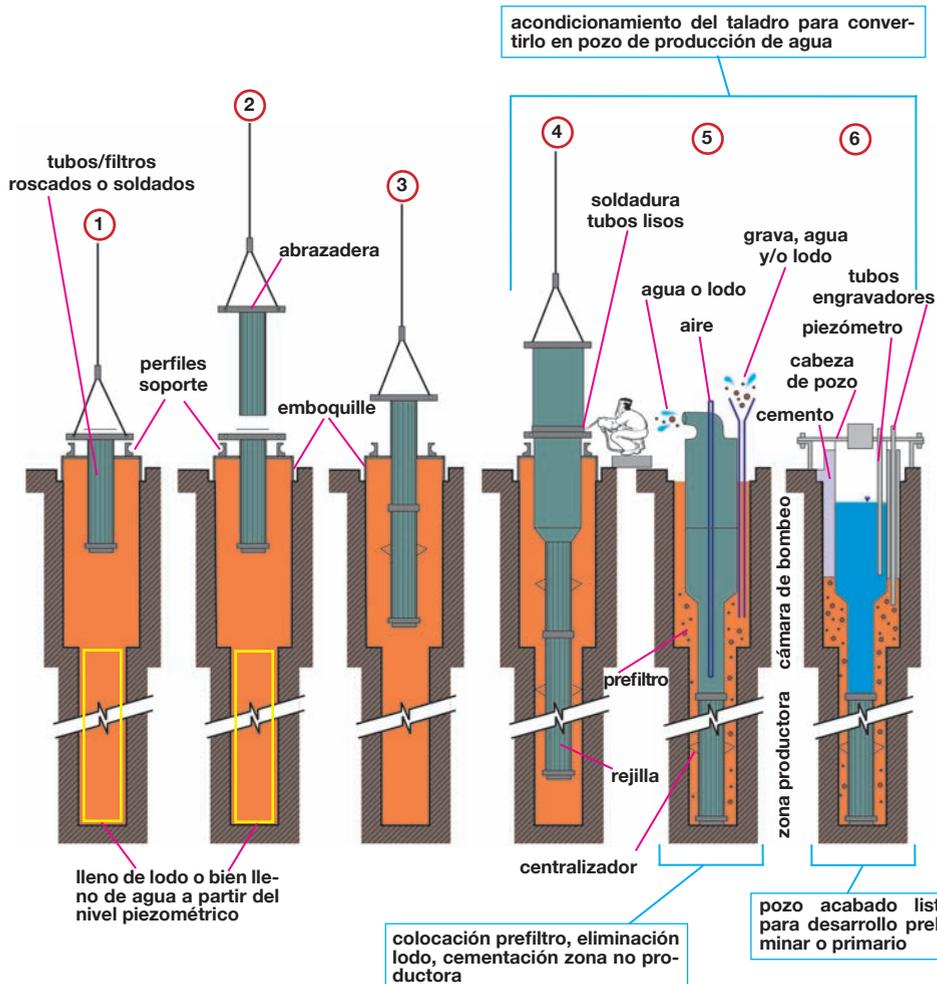


Figura 21. Secuencia (1,2,3,4,5, y 6) de un sondeo de explotación de agua subterránea (modificado de CIHS, 1996)

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), químicos (nieve carbónica, polifosfatos, ácidos o hielo) o ambos. Con esto se consigue limpiar los residuos que puedan haber quedado en el interior de la perforación y aumentar la eficiencia del pozo mediante la extracción de finos en el prefiltro de grava y en los primeros decímetros de la formación geológica atravesada por la perforación.

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 posterior contaminación por estas vías de penetración preferencial, que harían más propicia la llegada de posibles contaminantes hasta la zona saturada del acuífero.

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 figuran 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 todo, o casi todo, el volumen empleado, aunque, por lo general, la calidad y el régimen de disponibilidad pueden verse alterados. Como ejemplos se pueden mencionar la producción de energía eléctrica, la acuicultura, la navegación, los caudales con fines ambientales y paisajísticos 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 Hidrológico de Cuenca), en función de determinados factores como el número de habitantes, los tipos de industrias, las clases de cultivos, 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 las ciudades, consume alrededor del 15% del total; el 5% restante corresponde a los usos industriales y de generación energética no incluidos en la red urbana.

Población abastecida y volumen de agua subterránea utilizado

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.

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 son 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.



Estación de bombeo de agua subterránea, para abastecimiento a la localidad de Estepa. El agua se extrae mediante varios pozos y sondeos

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.



Complejo minero-industrial Cobre Las Cruces, situado en los términos municipales de Gerena, Guillena y Salteras. El agua para sus procesos minero-metalúrgicos proviene, fundamentalmente, del acuífero Niebla-Posadas

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 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.

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



Pozo para riego de olivar, entre Casariche y Badolatosa

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.

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:

A - 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.

B - 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).

C - 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).



Presiones e impactos relacionados con las aguas subterráneas

La Directiva 2006/118/CE, de 12 de diciembre de 2006, de la Unión Europea (UE), dice textualmente: “las aguas subterráneas son el recurso hídrico más sensible e importante de la UE y en particular son fuente principal de suministro público de agua potable”. Con esta directiva, así como otras que emanan de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE), se pretende proteger no sólo el medio hídrico en sí, sino todo el ecosistema asociado, estableciendo unos objetivos que se deben ir cumpliendo en plazo por los distintos países miembros y que persiguen contribuir a reducir la contaminación de los recursos hídricos, a promover su uso sostenible y a garantizar el abastecimiento a toda la población.

Los acuíferos son los principales almacenes de agua dulce de nuestro país. En el caso de Andalucía, los acuíferos se encuentran repartidos por toda la geografía andaluza, al aflorar en una superficie mayor de 21.000 km². Algunas estimaciones indican que el volumen de reservas de agua subterránea almacenada en los 200 primeros metros de profundidad es superior a los 40.000 hm³, cuatro veces más que la máxima capacidad de almacenamiento de los innumerables embalses de aguas superficiales existentes en este territorio.

Las reservas de agua subterránea toman especial importancia como reservas estratégicas en periodos de sequía, por lo que son una de las principales fuentes de suministro para el abastecimiento, la agricultura, la ganadería y la industria. Así mismo, las descargas naturales de los acuíferos alimentan a muchos manantiales, ecosistemas ribereños y zonas húmedas de gran importancia ambiental. Por tanto, la preservación de las mismas, tanto en los aspectos de cantidad como de calidad, así como el fomento de su uso sostenible es de vital importancia para poder legar este patrimonio a nuestros descendientes.

En Andalucía y en el resto de España, el consumo de agua subterránea se está acelerando en los últimos años por el crecimiento de la demanda y la escasa garantía de suministro de las aguas superficiales, debido a los frecuentes periodos de sequía que padece esta región. Este consumo es especialmente importante en los acuíferos del oriente andaluz y en las zonas costeras, donde la regulación de las aguas superficiales presenta grandes problemas.

Por otro lado, la contaminación de las aguas subterráneas provoca la disminución de los recursos potencialmente utilizables por el hombre. La mala utilización de fertilizantes y plaguicidas, la contaminación industrial y la deficiente depuración de las aguas residuales, tanto urbanas como industriales, está provocando la contaminación de diferentes acuíferos, en especial los acuíferos detríticos, dado que éstos soportan buena parte de la población y de la agricultura intensiva (Miller et al., 2002).

Uso intensivo de las aguas subterráneas

En los últimos 50 años, factores de tipo tecnológico (mejora técnicas de perforación y bombeo), científico (progreso de la Hidrogeología), y socioeconómico (el aprovechamiento del agua subterránea puede llevarse a cabo sin necesidad de grandes inversiones) han provocado un espectacular incremento de la explotación del agua subterránea.

Este incremento de la explotación del agua subterránea se ha hecho buscando unos beneficios, que han sido evidentes en muchos países en desarrollo, donde la transformación de la agricultura de secano a regadío -gracias al agua subterránea- ha permitido erradicar el hambre e incrementar notoriamente la producción agrícola. Asimismo, la explotación del agua subterránea ha permitido mejorar el abastecimiento de la población de muchas regiones en las que no se dispone de recursos económicos suficientes para la realización de las costosas obras de regulación y transporte del agua superficial. Por otro lado, muchos usuarios particulares (agricultores o industriales) han visto florecer sus negocios gracias a la alta relación garantía/coste de los recursos hídricos subterráneos.

En España (**Figura 22**), la explotación actual de aguas subterránea supera los 7.000 hm³/año, habiendo sufrido un espectacular aumento, sobre todo, a partir de los años sesenta del anterior siglo.

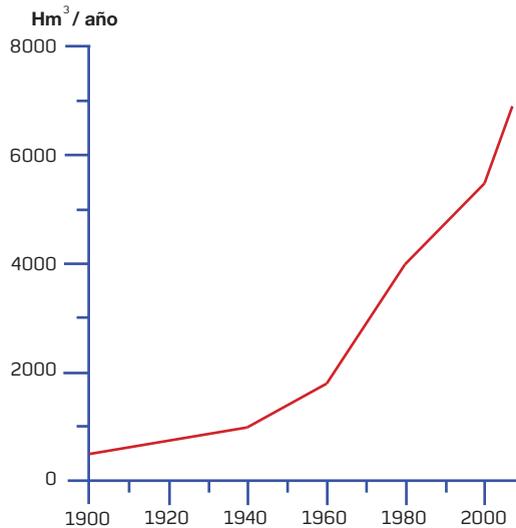


Figura 22. Evolución temporal del consumo de agua subterránea en España
 (modificado de MOPTMA-IGME, 1994)

De forma generalizada, este incremento de la explotación se ha realizado sin el necesario control y sin la necesaria planificación hidrogeológica, lo que ha provocado una serie de problemas, que en muchas ocasiones enmascaran los beneficios reales de la explotación. Entre los efectos desfavorables producidos por una inadecuada explotación del agua subterránea se pueden destacar los siguientes:

Descenso de los niveles piezométricos y agotamiento, e incluso secado de manantiales: el aprovechamiento de un acuífero conlleva un descenso del nivel piezométrico que se mantiene de forma transitoria hasta que alcanza un nuevo equilibrio, siempre en el caso de que las entradas sean mayores que las salidas. Si los descensos anuales son progresivos y continuados se puede producir un descenso de los caudales e incluso que se sequen los manantiales y pozos (ver **Figura 23**); esto, además de las incalculables repercusiones ambientales, puede originar un aumento de los costes energéticos debido a la extracción del agua a mayor profundidad.

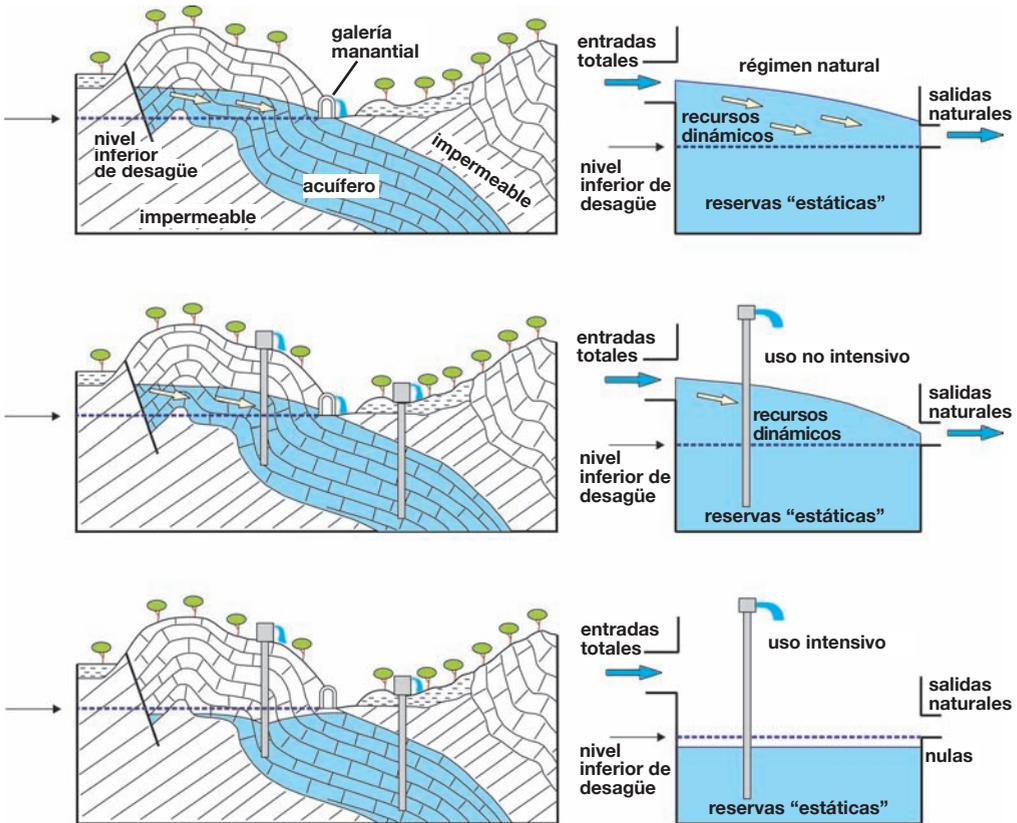


Figura 23. Diferentes grados de explotación en un pequeño acuífero kárstico y sus efectos en el descenso de la superficie piezométrica y en la disminución del caudal de drenaje a través de los manantiales

Degradación de la calidad del agua subterránea: cuando los descensos piezométricos son elevados se puede originar un deterioro importante de la calidad del agua subterránea, por mezcla con aguas de otros acuíferos o de otras masas de agua conectadas con el acuífero (ríos, lagos, embalses, etc.). En acuíferos costeros, además, los bombeos llegan en ocasiones a producir intrusión de agua salina por avance de la interfase agua dulce – agua marina (**Figura 24**).

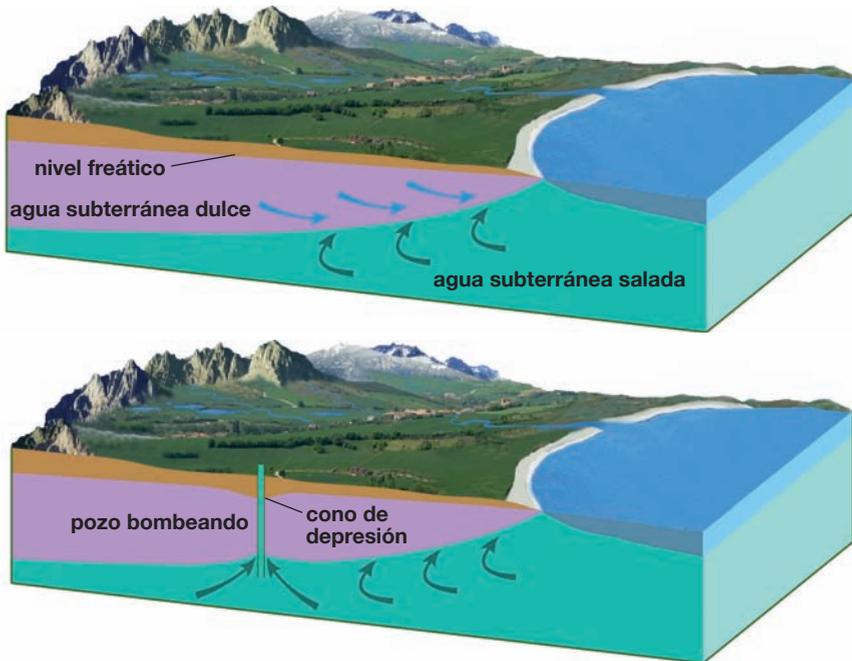


Figura 24. Contaminación por mezcla con el agua de mar

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 (descenso paulatino de la superficie del terreno). Esta situación se ha producido en algunos acuíferos formados por sedimentos recientes, como en Ciudad de Méjico o en Venecia. En España se han observado pocos problemas de subsidencia debidos a extracción de agua del subsuelo. El más destacado se produjo en la ciudad de Murcia, ocasionando desplazamientos relativos entre edificios.

Afección a los cursos de agua conectados con el acuífero: la explotación de aguas subterráneas puede modificar de forma importante el funcionamiento hidrogeológico de un sistema (**Figuras 11 y 12**). En ocasiones, los 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 el agua del río, lo que puede ser motivo de que éste se seque completamente.

Impactos ecológicos en los ecosistemas acuáticos: el descenso del nivel piezométrico puede generar afecciones de distinto grado en áreas de importancia medioambiental. Los efectos negativos pueden ser de varios tipos: reducción de caudal o agotamiento de manantiales; disminución de la humedad del suelo a un nivel en el que la vegetación freatófila no puede sobrevivir; desaparición total o parcial de humedales conectados hidráulicamente a un acuífero en situación natural (**Figura 25**); incluso podrían llegar a aparecer cambios microclimáticos debidos a una reducción de la evapotranspiración.

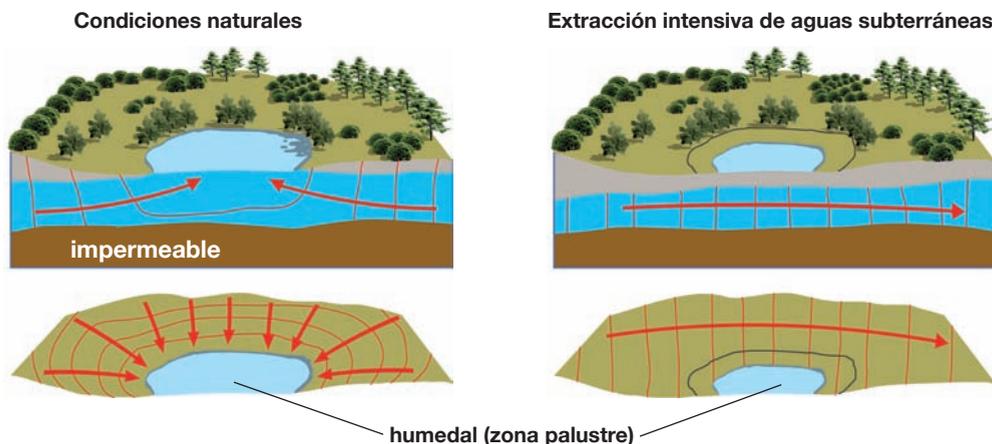


Figura 25. Afección de humedales por el descenso del nivel piezométrico

La evaluación de los posibles impactos y beneficios debidos a 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 éstos puedan mitigarse con una correcta planificación de los recursos hídricos subterráneos (López-Geta *et al.*, 2001 Y 2009).

La participación de los usuarios de los acuíferos en los centros de la toma de las decisiones 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.

Contaminación de acuíferos

Las aguas subterráneas son un recurso natural y valioso, la principal fuente de suministro de agua potable a la población de la Unión Europea, además de mantener a importantes ecosistemas. Por tanto, las aguas subterráneas deben ser protegidas de su contaminación.

Se dice que el agua ha sufrido un proceso de contaminación cuando su calidad natural se ve afectada por acciones o efectos ajenos al Ciclo Hidrológico, que la degradan respecto a sus usos posteriores, incluida su función ecológica.

En el año 2000, se aprobó la Directiva Marco del Agua (Directiva 2000/60/CE) en la que, entre otros aspectos, se incluyen disposiciones de carácter general para la protección y conservación de las aguas subterráneas, estableciendo la necesidad de adoptar medidas destinadas a prevenir y controlar su contaminación. En consecuencia, en diciembre de 2006, el Parlamento y el Consejo Europeo aprobaron la Directiva 2006/118/CE, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro (conocida como Directiva Hija y Directiva de Aguas Subterráneas), con la que se complementan las carencias o ambigüedades de la Directiva Marco. Todo el marco legislativo europeo proporciona una idea bastante acertada de la especial importancia de los recursos hídricos subterráneos.

A diferencia de lo que ocurre en las aguas superficiales, donde los procesos de contaminación se detectan de forma rápida y visible, en las aguas subterráneas la identificación de los procesos de contaminación suele ser más difícil de detectar; además, la posterior recuperación de los acuíferos es compleja técnicamente y muy costosa en términos económicos, cuando no inviable. Si los contaminantes son degradables, la contaminación se reduce con el tiempo. Si se trata de materiales estables, pueden permanecer durante largos periodos de tiempo si no se procede a su extracción. En este sentido, las medidas para proteger la calidad de las aguas subterráneas pasan por una adecuada protección de los acuíferos frente a la contaminación, mediante la correcta ordenación del territorio y mediante el control y la limitación de actividades potencialmente contaminantes, especialmente, en las zonas más vulnerables. A pesar de ello, no hay que olvidar que muchos acuíferos presentan un notable poder de protección frente a distintos agentes contaminantes (Calvo et al., 2006).

Los procesos contaminantes son múltiples, al igual que las actividades que los provocan. Atendiendo a la distribución espacial de la contaminación se puede hablar de contaminación difusa y de contaminación puntual. La difusa aparece en amplias zonas y no tiene un foco de emisión concreto (como, por ejemplo, la derivada de actividades agrícolas). La contaminación puntual se produce por un foco emisor determinado, con afección a una zona concreta del territorio (como ocurre a consecuencia de la fuga de un depósito enterrado).

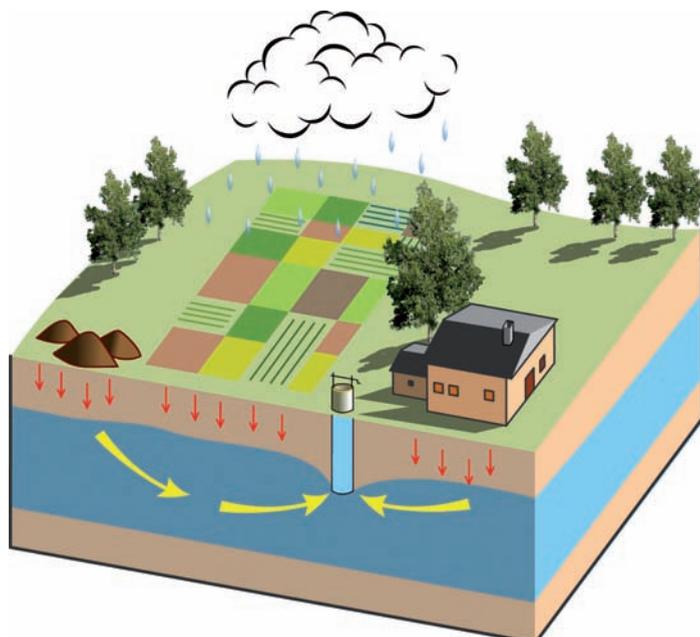


Figura 26. Diferentes tipos de contaminación de las aguas subterráneas por actividades agrícolas

La **CONTAMINACIÓN DIFUSA** (Figura 26) tiene su origen en:

Abonos agrícolas: pueden ser minerales u orgánicos. En ambos casos la contaminación se debe al aporte de nutrientes, en especial los 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. La presencia de nitratos es el problema de contaminación más extendido, aunque con una notable variabilidad en su gravedad de unas regiones a otras. Las aguas de abastecimiento a la población no pueden superar concentraciones superiores a 50 mg/l; sin embargo, algunos acuíferos detríticos que soportan una importante actividad agrícola, como ocurre en algunos sectores del valle del Guadalquivir (aluviales del Guadalquivir y Guadalete) están muy afectados, con contenidos de nitratos que pueden superar los 100 mg/l (Valero J., 1998).

Plaguicidas agrícolas: son 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, en ocasiones incluso más tóxicos que los plaguicidas originales. Si la recarga se realiza lentamente a través del terreno no saturado, existen posibilidades de retención y de una cierta degradación química o biológica; pero si llegan directamente a la zona saturada del acuífero, su eliminación biológica es muy lenta o prácticamente nula. Un uso agrícola correcto de los plaguicidas, sin embargo, no tiene por qué causar perjuicios importantes a las aguas subterráneas.

Este tipo de contaminación es un problema todavía no bien conocido en España. En Andalucía, sólo en los regadíos, las zonas vulnerables a la contaminación agrícola superan las 239.000 hectáreas, lo que representa casi el 40% del total de la superficie regada (Plan Nacional de Regadíos, horizonte 2008).

Intrusión marina: en acuíferos costeros la situación natural de la interfase agua dulce-salada puede verse alterada al modificarse el régimen de flujo por bombeos excesivos (**Figura 24**) o, a veces, simplemente, por la mala ubicación de las captaciones. Esto llega a provocar la entrada de agua salada en el acuífero. En el litoral mediterráneo la intrusión marina es un fenómeno frecuente, llegándose en ciertos casos a superar los 500 mg/l de cloruros en aguas subterráneas, afectando a una gran masa de agua; en otras ocasiones, la contaminación tiene un carácter más puntual, reducida al entorno del pozo de bombeo. Como ejemplos citaremos en Andalucía el Campo de Dalías o Fuengirola, entre otros; en el resto de España es importante la contaminación de los acuíferos de la Plana de Vinaroz-Peñíscola y de Oropesa-Torreblanca, en Castellón.

La **CONTAMINACIÓN PUNTUAL** puede ser debida a:

Actividades domésticas: pueden generar contaminación orgánica, biológica y mineral, cuyo origen estaría localizado en fugas o pérdidas a partir de fosas sépticas, pozos negros y sistemas de alcantarillado, o por vertido indiscriminado de aguas de letrina (**Figura 27**). También se incluye la contaminación derivada de la utilización de productos químicos de uso doméstico, tales como detergentes y blanqueantes.

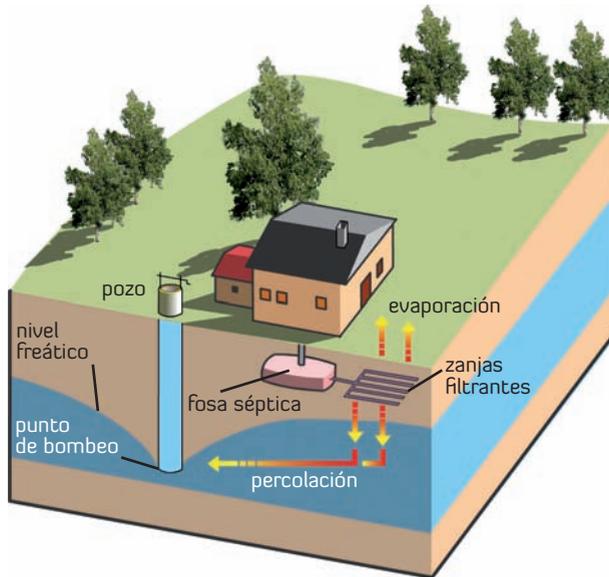


Figura 27. Con taminaciónde lasa guass ubterráneaspor a ctividadesdom ésticas

Actividades ganaderas: pueden llegar a producir un tipo de contaminación muy similar a la generada por actividades domésticas, pero - especialmente en explotaciones ganaderas intensivas- más grave y concentrada. El número y las dimensiones de los centros de ganadería estabulada han 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 derivada de la ganadería en todo el territorio español equivale a una población de unos 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, mientras que el resto se vierte directamente al terreno o a los cauces.

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 (**Figura 28**). Son especialmente insalubres y nocivas las contaminaciones con metales pesados procedentes de la industria metalúrgica, de la cerámica y de los curtidos. El origen de la contaminación suele encontrarse en el inadecuado almacenamiento, transporte de materias primas o accidentes de carretera (combustibles 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.

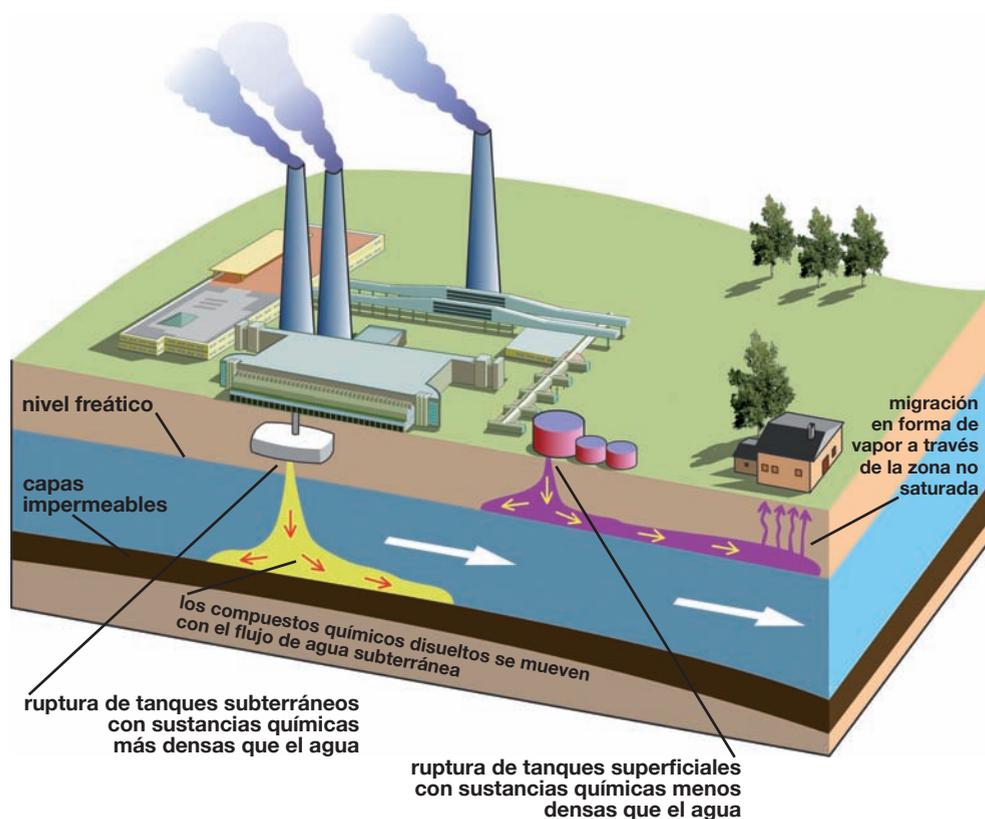


Figura 28. Diferentes tipos de contaminación industrial y por fugas de depósitos de líquidos contaminantes (basado en www.earthsci.org)

Recientemente se está observando la presencia en las aguas en general de contaminantes denominados emergentes, procedentes de los productos farmacéuticos. Sobre este tipo de contaminación se dispone todavía de pocos datos, aunque se está trabajando en ello.

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 los procedentes de los desechos de la construcción (escombros en general), que no presentan una elevada peligrosidad.

B- Residuos urbanos o asimilables (domésticos, comerciales), que pueden ser potencialmente contaminantes y deben ser vertidos con las adecuadas precauciones.

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 (RSU) o asimilables, de los que el 81,3% va a parar a vertederos y un 17,6% se vierte incontroladamente. Si el vertedero no está adecuadamente diseñado y construido, el agua de lluvia disuelve una gran variedad de materiales orgánicos e inorgánicos; en el caso de que el lixiviado alcance el nivel freático, se mezclará con el agua subterránea y se contaminará (**Figura 29**). Problemas similares pueden producirse como consecuencia del escape de excavaciones superficiales denominadas estanques de retención, en lo que se acumulan desechos diversos de residuos líquidos.



Figura 29. Contaminación producida por acumulación de vertidos sólidos sobre el terreno
(basado en www.ec.gc.ca/Water)

Tanques enterrados: el número de estaciones de servicio que había en España a finales del pasado siglo XX superaba las 6.500, por lo que se supone que existen entre 25.000 y 28.000 depósitos de combustible. Por otra parte, los depósitos de hidrocarburos para uso doméstico se estiman entre 250.000 y 300.000. Cualquier fuga desde este tipo de depósitos suele acabar contaminando los acuíferos (**Figura 30**), por lo que su adecuada fabricación y posterior control son de especial importancia.

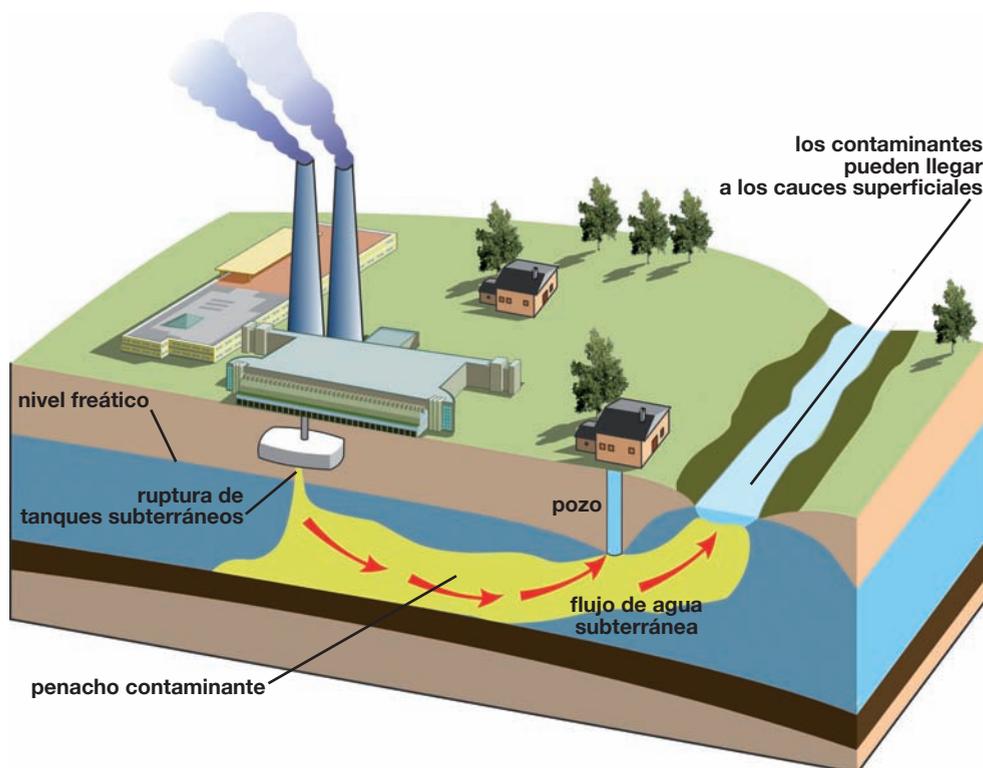


Figura 30. Contaminación industrial por fugas de depósitos enterrados de líquidos contaminantes (basado en www.earthsci.org)

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, así como los que permiten la fácil entrada de aguas superficiales.

Vertidos directos mediante pozos de inyección mal diseñados: se trata de vertidos de residuos líquidos contaminantes desde pozos de poca profundidad a un acuífero. Suelen estar en zonas de difícil acceso al control administrativo.

En general, la magnitud de la contaminación 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 el contaminante.

La conservación de la calidad de las aguas subterráneas debe regirse por los principios de **prevención y precaución**. Para ello se deben establecer los medios que limiten o prohíban el vertido incontrolado de contaminantes, la realización de actividades peligrosas sin las debidas medidas de seguridad o la aplicación indiscriminada de productos agroquímicos. Es necesario, por tanto, utilizar unos sistemas de vigilancia eficaces que permitan detectar cualquier variación en la composición del agua con tiempo suficiente para poder actuar. En este sentido, son de especial importancia las redes de control de la calidad de las aguas subterráneas, de las que son responsables las distintas administraciones competentes.

Una vez que un acuífero ha sido contaminado la regeneración es difícil desde el punto de vista técnico y económico. Por otro lado, con frecuencia la contaminación no es patente hasta que se detecta en varios pozos, lo que 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, ha transcurrido tanto tiempo desde que se inició, que la fuente de contaminación ya no exista, aunque permanezcan sus efectos (López-Geta *et al.*, 2001 y 2009).

Si la contaminación se produce desde la superficie del terreno, o a poca profundidad, y se ha descubierto al poco tiempo de iniciarse, una medida generalmente eficaz –aunque no la única– es la retirada del terreno afectado para su posterior tratamiento. Este tipo de actuación está especialmente indicada para reducir la contaminación de determinados hidrocarburos pesados, ya que su propagación es lenta.

En el caso de fuentes de contaminación permanentes, la primera medida correctora es la localización del foco contaminante y suprimirlo si es posible. Las técnicas que pueden aplicarse según los casos, serían: impermeabilización, drenajes, recubrimientos con arcillas que impidan la infiltración de la lluvia y el desvío de aguas fluviales y pluviales, etc.

PRESENTE Y FUTURO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El agua subterránea es un recurso natural potencialmente renovable, aprovechado por el hombre. Su utilización, de indudables beneficios, contribuye a mejorar el bienestar social, económico, cultural y lúdico (López-Geta *at al.*, 2001 y 2009).

Con el transcurso de los años las exigencias del hombre han sido mayores. Así, la sociedad actual no sólo pide agua en cantidad suficiente, sino con la calidad acorde con el uso al que se va a destinar. Esta condición hace que el agua subterránea, por su excelente calidad en general, juegue un papel relevante en el abastecimiento urbano, situación que, no obstante, no ocurre en España con la misma intensidad que en otros países de nuestro entorno.

Para que su uso sea posible sin efectos no deseados, es imprescindible conocer con precisión la diversidad de aspectos que concurren en el estudio del agua, necesarios para planificar su utilización y hacer un uso sostenible de la misma. Cuando no ha sido así se han originado graves problemas especialmente por falta de agua disponible (en cantidad, en calidad o en ambas), lo que ha afectado a la población, al medio ambiente (espacios naturales, zonas húmedas, etc.) y a la economía.

En las últimas décadas del pasado siglo XX, sobre todo a partir de los años 60, en España se realizó un gran esfuerzo de investigación, con nuevos métodos y nuevas tecnologías, que ha permitido catalogar los principales acuíferos, definir su geometría y determinar los parámetros hidrogeológicos y su funcionamiento hidrodinámico; así como cuantificar los recursos y reservas hídricas, el grado de explotación y su disponibilidad. Este importante esfuerzo también ha llevado a caracterizar la composición física-química de las aguas subterráneas y a identificar los principales problemas: explotación intensiva, contaminación por nitratos, fertilizantes o plaguicidas, por intrusión de agua del 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 producidos durante estos años y las situaciones nuevas que se han ido originando –aumento de las explotaciones, fenómenos de contaminación, etc. – no estaban soportadas por una legislación acorde con la 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 legislativas fueron resueltas en gran medida con la entrada en vigor de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas, modificado posteriormente a través del Texto Refundido, al recoger en su propio articulado y en otras normativas que emanan de ella, aspectos relativos a la implantación de redes de observación de los niveles piezométricos y de calidad del agua subterránea y de su calidad, de los volúmenes de agua extraídas, elaboración de normas de explotación de los acuíferos, determinación de áreas de recarga de las captaciones destinadas al abastecimiento urbano, etc. Este cuerpo legislativo también contempla otras medidas adicionales de gran interés, como las relativas al ahorro de agua o a la mejora de las infraestructuras de distribución. Recordemos que las pérdidas originadas en las conducciones de agua destinadas al suministro urbano llegan, a veces, a superar el 40%, y que las destinadas a la actividad agrícola no están adecuadamente evaluadas, aunque posiblemente sean superiores a las urbanas, debido a la antigüedad y deterioro de muchas de las infraestructuras.

La posibilidad que ofrece la utilización de las aguas subterráneas y los acuíferos es muy diversa, si se tiene en cuenta el volumen de reservas 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. Entre las distintas alternativas, se pueden destacar las siguientes:

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 regulación.
- **Alternativa más favorable:** su aplicación viene determinada por ser ésta la solución idónea, al reunir mejores condiciones técnicas, económicas y ambientales.
- **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.
- **Mejora de la garantía de suministro e incremento de las disponibilidades hídricas:** se puede conseguir mediante el uso conjunto de las aguas subterráneas y superficiales.
- **Disponibilidad de recursos adicionales en emergencias y períodos de sequía:** la gran capacidad y el volumen de agua almacenada en los acuíferos permite disponer de agua que puede paliar fácil y adecuadamente los problemas que surjan en esas situaciones.

LOS ACUÍFEROS COMO MEDIO PARA LA MEJORA DE LA GESTIÓN HÍDRICA

La utilización de los acuíferos con este objetivo está basada en aprovechar su capacidad de almacenamiento, muy superior a la aportada por las infraestructuras de regulación superficial, lo que permite:

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

APROVECHAMIENTO DE LAS RESERVAS HÍDRICAS ALMACENADAS EN LOS ACUÍFEROS

Se puede aplicar 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, una recarga natural anual por debajo de los valores medios. En estos casos, no se trata de incrementar los caudales medios a extraer, sino sustituir los déficits anuales que se generen y que, posteriormente, en períodos de mayores lluvias, serán sustituidos al incrementarse la recarga.

- **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 explotación hasta la disponibilidad de nuevos recursos externos (trasvases).



Uso conjunto de las aguas superficiales, subterráneas, regeneradas y desalinizadas

La operación de **uso conjunto** contribuye a mejorar o satisfacer plenamente una demanda concreta de agua mediante el uso coordinado de las aguas superficiales, subterráneas, regeneradas y desalinizadas. Este sistema aprovecha la complementariedad hidrológica de los embalses superficiales y la de los acuíferos. En los primeros se dispone de un volumen capaz de retener una 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.

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, y de la calidad del agua disponible en cada uno de ellos.

Con ello se consigue aprovechar una mayor cantidad de agua superficial, 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 abastecimiento, como un elemento adicional que proporciona seguridad.

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 estas fuentes (a través de recarga artificial), o en destino (mediante el uso de depósitos o canales), consiguiéndose una calidad final adecuada. O bien en conseguir un uso más eficiente en términos energéticos.

Políticas, estrategias y medidas de gestión

En la actualidad, con la **Directiva 2000/60/CE** del Parlamento Europeo y del Consejo, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, la Unión Europea organiza la gestión de las aguas superficiales, continentales, de transición, aguas costeras y subterráneas, con el fin de prevenir y reducir su contaminación, fomentar su uso sostenible, proteger el medio acuático, mejorar la situación de los ecosistemas acuáticos y paliar los efectos de las inundaciones y de las sequías.

Las medidas previstas en el plan de gestión en cada una de las demarcaciones existentes tendrán por objeto:

- **Prevenir** el deterioro, mejorar y restaurar el estado de las masas de agua superficiales, lograr que estén en buen estado químico y ecológico y reducir la contaminación debida a los vertidos y emisiones de sustancias peligrosas.
- **Proteger**, mejorar y restaurar las aguas subterráneas, prevenir su contaminación y deterioro y garantizar un equilibrio entre su captación y su renovación.
- **Preservar** las zonas protegidas.

Los objetivos anteriores deberán alcanzarse en el plazo de quince años desde la entrada en vigor de la Directiva, pero dicho plazo podrá retrasarse o modificarse siempre que se respeten las condiciones establecidas por la Directiva.

Los Estados miembros fomentarán la participación activa de todas las partes interesadas por la aplicación de esta Directiva, en particular en lo que se refiere a los planes de gestión de las demarcaciones hidrográficas.

La Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro, tiene como objetivo prevenir y luchar contra la contaminación de las aguas subterráneas.

La protección de las aguas subterráneas es una prioridad de la política medioambiental de la UE por varias razones:

- Cuando están contaminadas, es más difícil regenerar las aguas subterráneas que las aguas de superficie, y las consecuencias pueden prolongarse durante décadas.
- Las aguas subterráneas se utilizan mucho para la captación de agua potable, para la industria y para la agricultura, por lo que su contaminación puede ser peligrosa para la salud humana y para el desarrollo correcto de estas actividades.
- Las aguas subterráneas constituyen el caudal de base de muchos ríos (pueden representar hasta un 90% del caudal de alguno de ellos), por lo que pueden influir en la calidad de las aguas de superficie.
- Estas aguas sirven de tampón en los períodos de sequía y son fundamentales para conservar los humedales

En el **Acuerdo Andaluz por el Agua**, de febrero de 2009, se formularon las bases para su gestión en la Comunidad Autónoma de Andalucía: el agua no es un recurso exclusivamente económico, sino que también constituye un bien cultural, ambiental y un principio de prosperidad para todos. Además de una responsabilidad económica, se plantea una nueva ética del agua en Andalucía, entendiéndose por ésta una visión más amplia en la relación sociedad-recurso.

Las líneas de desarrollo de esta nueva visión de los recursos hídricos en Andalucía son:

- Una gestión comprometida con las generaciones futuras, lo que implica alcanzar los objetivos europeos sobre el buen estado de las masas de agua y de los ecosistemas asociados.
- Garantía de disponibilidad del agua como elemento básico para las personas y los usos productivos, para la calidad de vida y la creación de empleo y de riqueza.
- Respeto a la unidad de cuenca y la gestión integral del agua, considerando la totalidad de las aguas que conforman el ciclo hidrológico, incluidas las aguas costeras y de transición.
- Una gestión del agua basada en la calidad del servicio que se presta a la ciudadanía, con compromisos explícitos y la participación activa de los agentes sociales y económicos.
- Un sistema de tarificación que sea adecuado para recuperar, en la medida de las capacidades económicas, los costes de la gestión del agua, incluidos los costes ambientales, y que al tiempo incentive un uso responsable.
- El impulso a la I+D+i en materia de aguas coordinando esfuerzos de iniciativa pública y privada.

Con estas líneas se pretenden los siguientes objetivos:

- Alcanzar un buen estado de las aguas, dentro del plazo indicado por la Unión Europea (2015), compatibilizando la restricción ambiental con los usos productivos e invirtiendo la tendencia a la degradación de los ecosistemas.
- Garantizar la disponibilidad del agua, a través de una gestión prudente, teniendo en cuenta los efectos previsibles del cambio climático y las situaciones de sequía.
- Proteger el dominio público hidráulico que incluye el agua, el patrimonio hídrico sobre el que discurre y sus zonas de protección.
- Gestionar el riesgo por avenidas, mediante la delimitación y protección de los terrenos inundables y una adecuada gestión de la seguridad de presas, embalses y balsas.

Anexos

GLOSARIO DE TÉRMINOS

BIBLIOGRAFÍA





ACUICLUÍDO: Formación geológica que puede contener agua, pero en la que la captación de un caudal apreciable no es posible en condiciones económicas aceptables, ya que, debido a la baja permeabilidad, el agua subterránea no circula significativamente en condiciones normales (bajo la acción de la gravedad), sino que es retenida en los poros.

ACUÍFERO: Formación geológica cuyos poros pueden ser ocupados por el agua y en los que ésta puede circular libremente, en cantidades apreciables, bajo la acción de la gravedad hacia los manantiales o captaciones artificiales (pozos, sondeos o galerías).

ACUÍFERO COLGADO: En la zona no saturada de un acuífero regional pueden existir capas discontinuas o lentejones de baja permeabilidad, en las que se retiene parte de la recarga durante un periodo más o menos largo de tiempo. El agua subterránea almacenada en estos acuíferos situados por encima del nivel freático regional, es descargada hacia la zona saturada inferior o bien hacia el exterior a través de pequeños manantiales.

ACUÍFERO CONFINADO: Acuífero limitado en su parte superior por una capa de permeabilidad muy baja, a través de la cual el flujo es prácticamente inapreciable. El material acuífero está enteramente saturado, de modo que en las perforaciones que alcanzan el límite superior impermeable, el agua asciende por encima del mismo, eventualmente hasta la superficie (captaciones surgentes o artesianas).

ACUÍFERO LIBRE: Acuífero en el que no existe capa confinante de baja permeabilidad; en el caso más simple, el material permeable se extiende hasta la superficie, de modo que sólo en una parte del mismo todos los poros están ocupados por agua. Por encima del límite superior de esta zona saturada (superficie o nivel freático) los poros, al menos en parte, están ocupados por aire, de modo que constituyen una zona no saturada.

ACUÍFERO MULTICAPA: Acuífero que presenta diferentes niveles saturados en la vertical, separados por otros tantos tramos impermeables.

ACUÍFERO SOBREEXPLOTADO: Acuífero en el que los recursos renovables medios son inferiores a las extracciones por bombeo, por lo que hay consumo continuado de reservas.

ACUÍFUGO: Formación geológica que no dispone de poros susceptibles de ser ocupados por el agua y, consecuentemente, tampoco puede transmitirla. Es equivalente en la práctica a una formación impermeable o de muy baja permeabilidad.

ACUITARDO: Roca o sedimento cuyos poros pueden contener agua, pero ésta sólo puede ser transmitida muy lentamente. En consecuencia, aunque estos materiales no son aptos para la ubicación de captaciones, pueden jugar un importante papel, en determinadas condiciones, en la recarga vertical o lateral de otros acuíferos.

AEROSOL: Suspensión de partículas de muy pequeño tamaño, sólidas o líquidas, en un gas (habitualmente, el aire).

AFORO: Medida del caudal de agua circulante por un río, que drena un manantial o que es capaz de suministrar una captación artificial (pozo o sondeo).

AGOTAMIENTO: Periodo del tiempo en el que se produce la disminución paulatina del caudal de un manantial en régimen no influenciado, es decir, ligado al descenso progresivo del nivel freático del acuífero que se produce en los momentos del año en que el acuífero no recibe alimentación.

ALIMENTACIÓN O RECARGA (de un acuífero): Aportes de agua de cualquier origen, que recibe un acuífero. Componente del balance hídrico de un acuífero que representa la suma de todas las cantidades de agua que el acuífero recibe, ya sea de forma natural o introducidas artificialmente, durante un período de referencia.

ALUVIALES: Sedimentos detríticos, habitualmente no consolidados, de génesis fluvial. Por lo general, por su alta permeabilidad, presentan gran interés hidrogeológico.

AMBIENTES PALEOGEOGRÁFICOS: Medios sedimentarios en los que se han originado en el pasado diferentes tipos de sedimento.

ANTICLINAL: Se dice del plegamiento de las capas del terreno en el que los materiales geológicos del núcleo son más antiguos que los de los flancos.

AZUD: Construcción hidráulica cuya función es la de represar agua de un río o arroyo para facilitar la derivación del agua hacia acequias para regadío u otros usos.

BALANCE HÍDRICO (de un acuífero): Cuantificación de las cantidades de agua recibidas y emitidas en un período determinado por un acuífero, expresada en forma de ecuación, de tal modo que la diferencia entre las entradas y las salidas deben ser igual a la variación de las reservas (del agua almacenada) en el período considerado. Se denominan componentes del balance a cada una de las variables que intervienen en el mismo; entre las entradas, merecen ser citadas las que proceden de la infiltración de una parte de la precipitación o de la escorrentía superficial, el retorno de riegos, es decir la llegada al acuífero del excedente de agua de riego, las aportaciones laterales de otros acuíferos, etc; entre las salidas las más importantes son las concentradas en forma de manantiales, las difusas a los cursos de agua, la descarga hacia otros acuíferos, las salidas directas al mar, y las extracciones por bombeo, entre otras.

BASAMENTO: Complejo indiferenciado de rocas de cierta antigüedad, infrayacentes a aquellas que afloran en una región.

CABALGAMIENTO: Desplazamiento de orden kilométrico de un bloque o escama por encima de otro subyacente a lo largo de un plano de falla poco inclinado.

CANCHALES: Depósito de fragmentos rocosos angulosos acumulados a los pies de las laderas o paredes rocosas superficiales.

CARBONÁTICOS (materiales, acuíferos, etc.): Rocas de naturaleza calcárea o dolomítica o acuíferos ligados a las mismas. Las rocas sedimentarias más importantes de este grupo son las calizas y dolomías, en las que el mineral predominante es respectivamente la calcita, o carbonato de calcio y la dolomita o carbonato cálcico-magnésico.

CAREOS: Aplicación del agua mediante zanjas escavadas en la superficie del terreno, con la finalidad principal de lavar el suelo o recargar acuíferos.

CARGA HIDROSTÁTICA: Presión existente en cualquier punto de la zona saturada de un acuífero equivalente a la altura piezométrica.

CAUDAL DE BASE: Caudal correspondiente a las aportaciones (de un manantial o río) al final del período anual de agotamiento, es decir, cuando la descarga de los acuíferos se realiza en régimen no influenciado, por haber cesado la recarga del sistema.

CAUDAL ESPECÍFICO: Caudal extraído en un pozo o sondeo por unidad de descenso producido. Habitualmente se expresa en litros/segundo por metro.

CAVERNAS O CUEVAS: Formas endokársticas de conducción con desarrollo horizontal en el interior de los macizos rocosos carbonáticos o evaporíticos originados por la disolución de la roca a favor de los cursos de agua subterránea. Se consideran activas cuando circula agua por ellas, e inactivas cuando se sitúan muy por encima del nivel del acuífero.

COBERTERA: Conjunto de formaciones geológicas, de origen sedimentario, por encima del basamento.

COEFICIENTE DE AGOTAMIENTO: Constante hidrodinámica propia de un manantial. Su valor caracteriza la ley de decrecimiento exponencial, en régimen no influenciado, del caudal del manantial.

COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO: Relación entre el volumen de agua liberado por una columna de acuífero de superficie unidad, cuando el nivel piezométrico desciende una unidad, y un volumen unitario de acuífero. En los acuíferos confinados este valor depende muy directamente de la compresibilidad y la expansibilidad del agua y del medio acuífero y del espesor de éste. En los acuíferos libres, el coeficiente de almacenamiento equivale en la práctica a la porosidad eficaz.

COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA: Es el cociente, expresado en tanto por ciento, de las aportaciones totales de agua de una cuenca hidrográfica respecto a la precipitación.

COEFICIENTE DE INFILTRACIÓN: Es el cociente, expresado en tanto por ciento, de la infiltración de agua en el subsuelo respecto a la cantidad de agua precipitada, expresadas ambas por lo general por sus valores medios anuales.

COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (o conductividad hidráulica): Parámetro que expresa cuantitativamente la permeabilidad de un material frente a la circulación de un fluido de densidad y viscosidad determinadas. Puede definirse como el volumen de dicho fluido que atraviesa, por unidad de tiempo y bajo el efecto de un gradiente hidráulico unitario, una unidad de superficie perpendicular a la dirección del flujo, en condiciones tales que sea aplicable la ley de Darcy.

COMPOSICIÓN QUÍMICA E ISOTÓPICA: Conjunto de sustancias químicas, y los respectivos valores isotópicos de algunas de estas sustancias (oxígeno e hidrógeno fundamentalmente) que incorpora el agua en su circulación por el terreno.

COMUNIDADES DE RIBERA: Grupo de especies vivas que caracterizan los ambientes que bordean a ríos y arroyos.

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (de las aguas): Facultad de transmitir la corriente eléctrica debido a la presencia de las sales disueltas en el agua. Es una magnitud indicativa, por tanto, del contenido salino total de un agua, con el que mantiene una relación directa. Se mide en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (microsiemens por centímetro) y se suele referir a una temperatura estándar de 25°C . El agua subterránea natural presenta valores de algunos centenares de $\mu\text{S}/\text{cm}$.

CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA: Ver coeficiente de permeabilidad.

CONO DE DEPRESIÓN: También llamado cono de bombeo. El término alude a la forma que adopta el nivel piezométrico alrededor de una captación sometida a extracción, de modo que los descensos provocados por el bombeo son mayores cuanto menor es la distancia al pozo.

CORDILLERA BÉTICA: Alineación montañosa que conforma la unidad geológica y orográfica del S y SE de la Península Ibérica. Se formó durante la orogenia alpina, a finales del Mioceno, hace unos 15 a 10 millones de años.

CUENCA HIDROGRÁFICA: Territorio vertiente a un mismo cauce o conjunto de cauces.

DARCY (Ley de): Ley que expresa la proporcionalidad entre el caudal (q) de un líquido que circula a través de un medio poroso y el gradiente hidráulico (i) de la siguiente forma: $q=ki$, donde k es una constante característica del medio. Esta ley sólo es válida cuando el flujo es laminar. El coeficiente k se llama permeabilidad o conductividad hidráulica y responde a la expresión $V=kh/l$, donde V es la velocidad, h la carga hidrostática y l la longitud del flujo.

D.B.O. (Demanda bioquímica de oxígeno): Medida de la cantidad de oxígeno necesaria para eliminar la materia orgánica contenida en el agua mediante procesos biológicos aerobios, de modo que constituye un índice de contaminación. Usualmente se refiere a cinco días, lo que se representa con las siglas DBO_5 y se expresa en mg/l de oxígeno.

DEMANDA DE AGUA: Volumen de agua que es requerido en un entorno determinado para los diferentes usos (urbano, agrícola, industrial o ambiental) en las condiciones económicas en que esta agua es ofrecida.

DESCARGA (de un acuífero): Conjunto de las salidas de agua, de cualquier tipo, de un acuífero; las más usuales se producen por bombeos, surgencias y de forma oculta hacia otros acuíferos limítrofes o el mar. Se suele expresar en hm^3/a o su equivalente en millones de $\text{m}^3/\text{año}$. Se habla de descarga difusa cuando ésta se produce a través de numerosas pequeñas surgencias próximas entre sí.

DETRÍTICOS (materiales, acuíferos,...): Calificativo relacionado con el origen de un tipo de rocas, constituidas por la acumulación de fragmentos de diversa naturaleza y tamaño; las partículas constituyentes reciben distintos nombres según su tamaño que, de menor a mayor son: arcilla, limo, arena y grava. El comportamiento frente

a la circulación hídrica puede variar en las rocas constituidas por los mayores tamaños de grano, que son las que por su permeabilidad presentan mayor interés hidrogeológico, según que los granos estén o no trabados entre sí con la presencia de una matriz (constituida por granos de menor tamaño) o de cemento (de precipitación química).

DETRITUS: Resto de la disgregación en partículas de una masa sólida obtenida por el útil de corte de máquina perforadora de sondeos. También se conoce como ripio.

DIACLASA: Fractura en una roca sin desplazamiento relativo de los bloques.

DOLINAS: Depresiones cerradas de origen kárstico. Constituyen una de las formas superficiales más habituales del modelado kárstico. Existen diversos tipos, siendo los más frecuentes los de disolución, las de colapso y las aluviales. El desarrollo de un gran número de dolinas sobre una superficie da lugar a la formación de un campo de dolinas, mediante un proceso denominado dolinización. La coalescencia de varias dolinas da origen a las uvalas, las cuales pueden evolucionar en casos extremos hasta la formación de un polje, o depresión kársticas de tamaño kilométrico.

DOMINIO PALEOGEOGRÁFICO: Regiones de la superficie terrestre de dimensiones considerables, individualizadas geodinámicamente, y con características estratigráficas y tectónicas comunes.

DUREZA: Alude, normalmente, al contenido total de iones de calcio y magnesio disueltos presentes en un agua. Es indicativa del poder incrustante. Hay varios tipos de dureza; la más usada, la dureza total, se expresa en grados franceses ($1^\circ F = 10 \text{ mg/l de } \text{Co}_3\text{Ca}$ equivalente).

EDAR: Estación Depuradora de Aguas Residuales.

EMBALSE SUBTERRÁNEO: Término equivalente al de acuífero, pero que hace especial referencia a la existencia de un volumen de agua subterránea almacenado (reservas) y de unos recursos hídricos renovables, cuya regulación (e incluso su cuantía) puede ser además incrementada mediante determinadas actuaciones, como la recarga artificial, o la regulación de manantiales.

ENDOKARST: Karst subterráneo, o conjunto de formas de disolución desarrolladas en el interior de los macizos kársticas, como consecuencia de la circulación de agua a través de las discontinuidades.

ENDORRÉICO: Las aguas de un territorio que fluyen hacia el interior de éste, sin desagüe a un río o al mar.

ENSAYO DE BOMBEO: Prueba que consiste en bombear agua subterránea de una captación durante un cierto período de tiempo y observar la variación que se produce en los niveles piezométricos del acuífero. Puede usarse tanto para conocer la capacidad o el rendimiento de una captación, como para determinar las características hidráulicas del acuífero.

ESCAMAS: Masa de rocas de grandes dimensiones que se apila o se desplaza sobre otras, mediante un cabalgamiento.

ESCORRENTÍA (superficial): Parte de la precipitación que discurre de forma superficial sobre el terreno. También se habla de escorrentía subterránea cuando el agua fluye por debajo del suelo, y de escorrentía subsuperficial o hipodérmica cuando el agua discurre por debajo del suelo pero muy próxima a la superficie. La suma de todas ellas es la escorrentía total.

ESPELEOTEMAS: Depósitos de origen químico (fundamentalmente calcita y aragonito) generados en el interior de las cuevas. Los más habituales son las estalactitas, que son concreciones que enraízan en el techo; estalagmitas, que se disponen sobre el suelo; y columnas, que son estalactitas y estalagmitas unidas, y cortinas, aunque existe una gran variedad de tipos, con morfología y orígenes diferentes.

ESTACIÓN DE AFOROS: Dispositivo hidráulico construido o instalado en el cauce un río o en la salida de un manantial donde se mide el caudal de agua que lleva una corriente expresado en volumen por unidad de tiempo.

ETAP: Estación de Tratamiento de Aguas Potables.

EVAPOTRANSPIRACIÓN: Se incluyen bajo esta denominación el conjunto de procesos por los que una parte del agua de precipitación es devuelta en forma de vapor desde la superficie continental a la atmósfera, sin que pase a infiltrarse hacia el subsuelo. Las dos componentes significativas, englobadas en esta variable, son la evaporación desde la superficie del suelo o desde las superficies de agua libre y la transpiración vegetal. Es necesario distinguir entre evapotranspiración potencial y evapotranspiración real. Evapotranspiración potencial es la evapotranspiración que tendría lugar, en unas condiciones climáticas dadas, si no hubiese limitación en la cantidad de humedad disponible en el suelo, de modo que ésta pudiera satisfacer completamente la demanda atmosférica. La evapotranspiración real es la que realmente se produce bajo unas condiciones dadas por el clima y de contenido de humedad del suelo, de modo que la demanda atmosférica no puede ser satisfecha si el suelo no dispone del agua suficiente.

EXOKARST: Karst superficial o externo. Comprende el conjunto de formas de disolución desarrolladas en la superficie de los macizos kársticos; los más habituales son las dolinas y los lapiazes.

FACIES HIDROQUÍMICAS: Clasificación de las aguas subterráneas en función del compuesto químico más abundante en disolución. Existen facies aniónicas (carbonatada, sulfatada y clorurada) y catiónicas (cálcica, magnésica y sódica).

FALLA DE DESGARRE: Variedad de falla en la que el movimiento relativo entre los bloques es predominantemente horizontal, en la orientación de la dirección del plano de falla.

FORONÓMICO: Relativo a los aforos, es decir a las medidas de los caudales.

FREATOFITAS (o VEGETACIÓN FREATÓFILA): 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, pero donde el nivel freático no es muy profundo. Un ejemplo típico lo constituye el tradicional 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.

GALERÍA: Túnel artificial excavado en un acuífero, con la finalidad de captar aguas subterráneas por gravedad. También se denomina galería los conductos endokársticos de trazado subhorizontal.

GEOTERMÓMETRO: Es un término aplicado a diferentes técnicas o indicadores que sirven para determinar las temperaturas a que se han producido ciertos procesos geológicos. En concreto, se aplican en hidrogeología para determinar la “temperatura de base” en relación con manifestaciones hidrotermales de aguas subterráneas calientes.

GLACIS: Superficie y depósito correlativo con pendiente muy suave, que enlaza una zona de mayor relieve con otra prácticamente llana.

GOURS: Concreciones en forma de pequeñas presas semicirculares, desarrolladas sobre una pendiente por la que circula un flujo de agua temporal o permanente, ubicadas en el interior de las cavidades kársticas.

GRADIENTE HIDRÁULICO: Es la variación, con la distancia, de la altura del nivel piezométrico de un acuífero en una dirección dada. Esta dirección suele ser la de máxima pendiente de la superficie piezométrica, que coincidiría con las de las líneas de corriente.

HIDROGEOLOGÍA: Ciencia, que estudia las aguas subterráneas.

HIDROGRAMA: Gráfico que representa la variación en el tiempo de alguna variable relacionada con el agua; muy en particular, se utiliza este término para referirse a las gráficas que representan la variación en el tiempo del caudal de un manantial (o de un río) o del nivel piezométrico en un pozo o sondeo.

HUMEDAL: Zona húmeda. Depresión suave del terreno que está temporal o permanentemente inundada, regulada normalmente por aportes de aguas superficiales y/o subterráneas, y en constante interrelación con la flora y fauna asociada.

INFILTRACIÓN (INFILTRACIÓN EFICAZ): Es el flujo de agua descendente desde la superficie del terreno hacia los niveles más profundos del suelo o hasta la zona saturada. Se denomina “infiltración eficaz” a la fracción, expresada como porcentaje de la precipitación media anual, que alcanza la zona saturada y contribuye, por tanto, a la recarga de los acuíferos (equivalente a coeficiente de infiltración).

INTRUSIÓN MARINA: Efecto natural o artificial, en los acuíferos costeros, debido a la penetración tierra adentro de la interfase agua dulce-agua salada. Bien de forma natural por disminuir la recarga o alimentación o por efecto antrópico, puede reducirse significativamente el flujo subterráneo de agua dulce que descarga al mar.

ISOHIDROHIPSA (LÍNEA): Línea que une los puntos de la superficie piezométrica situados a una misma cota. El conjunto de líneas isohidrohipsas correspondientes a una serie de cotas regularmente espaciadas, proyectadas sobre un plano, constituye el mapa piezométrico del acuífero, es decir el mapa de “curvas de nivel” de la superficie piezométrica correspondiente.

ISOPIEZA O LÍNEA ISOPIEZOMÉTRICA: Este término se utiliza a menudo como equivalente a curva de nivel de la superficie piezométrica. Sin embargo, tal utilización es incorrecta, pues el término isopieza significa literalmente “igual presión”, carácter que realmente es propio de cualquier línea situada sobre la superficie piezométrica, dado que todos los puntos de ésta se encuentran a presión atmosférica. Por esta razón, las curvas de nivel de la superficie piezométrica deben ser denominadas más propiamente isohidrohipsas.

ISÓTOPO: Se dice que dos átomos son isótopos o presentan una relación de isotopía cuando teniendo el mismo número atómico, es decir, el mismo número de protones en su núcleo, poseen distinto número másico, es decir, distinto número de neutrones en su núcleo. Los isótopos más utilizados en hidrogeología son los de los elementos constituyentes de la molécula del agua, oxígeno e hidrógeno.

ISOYETA (O ISOHIETA): Línea que une, en un mapa, puntos de la superficie que reciben igual cantidad de precipitación.

KÁRSTICO: Se denomina kárstico a un paisaje que muestra aspectos morfológicos peculiares en relación con la disolución de rocas, similares a los que existen en la región denominada Karst clásico, entre Eslovenia e Italia. Desde el punto de vista hidrogeológico, los terrenos kársticos se caracterizan por un marcado predominio de la circulación subterránea sobre la superficial. Dicha circulación suele realizarse a favor de huecos o conductos que, en algunos casos, adquieren grandes dimensiones, por lo que el flujo subterráneo se realiza a velocidad alta. Por otra parte, el fuerte condicionamiento estructural en la orientación de tales huecos o conductos motiva una gran anisotropía en los valores de la permeabilidad.

LAPIACES: Morfología exokárstica, caracterizada por la presencia de pequeñas depresiones, canales y surcos separados por crestas agudas, formados por el efecto disolvente del agua, actúa sobre la superficie de la roca carbonática expuesta al aire libre o enterrada a poca profundidad. Los hay de muy diferentes tamaños, desde microlapiaces, de algunos milímetros, hasta lapiaces de grandes crestas que pueden superar la decena de metros.

LEY DE DARCY: Ver Darcy.

LIMNÍGRAFO: Aparato que permite obtener un registro gráfico (limnigrama) de la evolución en el tiempo de la altura de una lámina de agua subterránea. Utilizado especialmente para controlar la variación del nivel piezométrico en una captación o el caudal de un manantial o río en una estación de aforos.

LÍNEA DE CORRIENTE: Representa la trayectoria teórica, desde el punto de vista macroscópico, de una partícula de agua en movimiento.

LÍNEA EQUIPOTENCIAL: La que une puntos con igual potencial o carga hidráulica, en un medio acuífero con flujo bidimensional (considerado en un plano vertical u horizontal). En tres dimensiones se puede definir, de igual manera, una superficie equipotencial.

LISÍMETRO: Dispositivo utilizado para medir la infiltración del agua en el terreno. Están concebidos también para la medida directa de la evapotranspiración.

LITOESTRATIGRAFÍA: Distribución y características litológicas de las formaciones rocosas de una unidad determinada, ordenadas en el tiempo geológico según su orden de sedimentación.

LIXIVIADO: Líquido producido cuando el agua percola a través de cualquier material permeable, enriqueciéndose en sólidos disueltos y materia en suspensión. Por lo general, se utiliza en relación con vertederos de residuos sólidos urbanos.

LLUVIA ÚTIL: Fracción de la precipitación no evapotranspirada y que, por tanto, representa los recursos hídricos totales de una cuenca; de este modo, la lluvia útil se convierte en escorrentía superficial y escorrentía subterránea.

MACIZO IBÉRICO: Aflora al norte de la Depresión del Guadalquivir, y, dentro de Andalucía, forma las alineaciones montañosas de Sierra Morena (norte de Jaén, Córdoba, Sevilla y Huelva). Está constituido por un conjunto de rocas metamórficas (pizarras, cuarcitas, calizas marmóreas) y plutónicas (granitos y rocas afines), de edades comprendidas entre el Precámbrico y el Paleozoico, plegadas y estructuradas en bandas de dirección noroeste-sureste, limitadas por importantes fracturas de alcance regional que la compartimentan en tres zonas: Centro – Ibérica (ocupa la parte más oriental, Jaén y Córdoba), Ossa – Morena (en la zona central, Córdoba y Sevilla) y Sudportuguesa (en la parte más occidental, Huelva).

MANANTIAL: Cualquier tipo de manifestación hacia el exterior del agua subterránea. Equivale al término surgencia. Posee infinidad de sinónimos locales, como nacimiento, naciente, surgencia, manadero, rezume, rezumadero, fuente, alfaguara, vertiente, venero, mina, cimbra, madre, ojo, nucle, trampal, borreguil y otros muchos.

MANTO DE CORRIMIENTO: Cabalgamiento de gran escala de unas formaciones geológicas sobre otras, con un salto o desplazamiento en la horizontal de varios kilómetros.

MAPA PIEZOMÉTRICO: Representación cartográfica de la superficie piezométrica de un acuífero (ver isopieza e isohidrohipsa), construida por interpolación de medidas puntuales de la profundidad del nivel piezométrico en diferentes puntos.

MINERALIZACIÓN: Concentración de diferentes iones y sustancias disueltas en el agua.

MODELO (de un acuífero): Representación conceptual y teórica simplificada de un acuífero. La elaboración de un modelo exige definir la estructura del sistema (límites, características geométricas, etc.) y formular las leyes que relacionan las entradas del sistema y sus respuestas (salidas), de acuerdo con los parámetros que intervienen en dichas relaciones. Los modelos pueden ser de varios tipos: reducidos, analógicos, matemáticos, de flujo o de transporte, entre otros.

MODELO MATEMÁTICO: El término se refiere generalmente a la formulación matemática de las relaciones entre los impulsos o entradas y las respuestas o salidas del sistema, teniendo en cuenta los parámetros físicos del acuífero. Un modelo de este tipo consigue simular, con auxilio del tratamiento de datos de ordenador, el comportamiento del acuífero frente a diferentes actuaciones sobre el mismo.

MURO: Es la superficie original inferior de una formación geológica, un estrato o capa, o un filón.

NECESIDAD DEL AGUA: Cantidad y calidad de agua que resulta imprescindible para alcanzar los objetivos de los diversos usos. En la práctica, sinónimo de demanda de agua.

NIVEL FREÁTICO: Superficie que abarca 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.

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. En acuíferos libres, coincide con el nivel freático. En acuíferos confinados, el nivel piezométrico está situado por encima del nivel freático.

OROGENIA ALPINA: La orogenia es el conjunto de procesos geológicos que se producen en el borde de las placas tectónicas y que dan lugar a la formación de una cadena montañosa y el rejuvenecimiento de otras. La orogenia alpina es una de las más recientes, ha tenido lugar en los últimos 65 millones de años, aunque su fase más acusada tuvo lugar hace unos 15 a 10 millones de años.

ÓSMOSIS: Difusión de un líquido a través de una membrana semipermeable que separa dos disoluciones de dicho líquido a concentraciones distintas.

PALEOCAUCE: Antiguo cauce fluvial actualmente inactivo, relleno por sedimentos y enterrado en la secuencia sedimentaria.

PALUSTRE: Material depositado en los ambientes de marismas, actuales o pasadas.

PARÁMETROS HIDROGEOLÓGICOS: Características de los acuíferos que rigen su comportamiento frente a la circulación hídrica y a influencias externas (alimentación, extracciones, etc.). Parámetros fundamentales son la porosidad, el coeficiente de almacenamiento y la permeabilidad o conductividad hidráulica. Otros derivan de los anteriores; así, la transmisividad es el producto de la permeabilidad por el espesor saturado.

PELÁGICO: Alejado de la costa. Se aplica a algunos tipos de sedimentos que se originaron en medios marinos tranquilos y profundos, lejos de la acción del oleaje y la dinámica litoral.

PERCOLACIÓN: Proceso de infiltración en el terreno, por debajo de la zona de influencia radicular, de aguas utilizadas para el riego. Es frecuente que dichas aguas arrastren en disolución componentes químicos utilizados en agricultura (abonos, pesticidas, etc.).

PERMEABILIDAD: Cualidad de un material que consiste en permitir que el agua (u otro fluido) circule a través de sus poros. Se expresa cuantitativamente por medio del coeficiente de permeabilidad.

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

PIEZÓMETRO: Dispositivo artificial utilizado para medir la altura que alcanzaría el agua subterránea en un punto dado de un acuífero.

PLACA DE ALBORÁN: Microplaca tectónica situada entre la Península Ibérica y África, que comenzó a derivarse hacia el noroeste hasta colisionar con el borde del Macizo Ibérico, hace unos 30 millones de años. Esta colisión provocó la formación de la Cordillera Bética.

PLACA IBÉRICA EMERGIDA: Placa tectónica continental emergida contra la que colisionó la Placa de Alborán. Está formada por materiales geológicos muy antiguos, además de estar muy deformada y metamorfoseada.

POLJE: Depresión cerrada de tamaño kilométrico, situada en una región kárstica, con vertientes generalmente escarpadas y fondo llano formado por sedimentos detríticos finos.

PONOR: Sumidero que drena las aguas superficiales de un polje o depresión kárstica de gran tamaño.

POROSIDAD: Relación entre el volumen de huecos, interconectados o no, contenidos en una roca o sedimento y el volumen total de la roca o del sedimento. La porosidad así definida se denomina “total”, aunque en hidrogeología es de empleo más común la porosidad “eficaz”, es decir la interconectada que permite el movimiento de los fluidos.

POROSIDAD EFICAZ: Relación entre el volumen de agua gravífica (agua que una roca o sedimento puede liberar por efecto exclusivamente de la gravedad) y el volumen total de la roca o sedimento.

POROSIDAD (PRIMARIA Y SECUNDARIA): Estos términos hacen alusión al origen de los huecos que determinan la porosidad de una roca o sedimento. Cuando los huecos corresponden a los espacios que existen entre los granos originales que integran una roca o sedimento, la porosidad se denomina “primaria” o intergranular, mientras que si son efecto de procesos de fracturación, de disolución o ambas, de la roca, la porosidad se denomina “secundaria”. No se trata de términos excluyentes y, de hecho, en una misma roca pueden coexistir ambos tipos de porosidad.

PREBÉTICO: Dominio geológico de la Cordillera Bética que ocupa la zona más cercana al Macizo Ibérico, el cual era el paleocontinente. Está formado por sucesiones de rocas sedimentarias que comprenden desde el Trías al Mioceno.

PRESIÓN HIDROSTÁTICA: Presión ejercida por una columna de agua en reposo, tanto sobre el fondo del recipiente que lo contiene como sobre las paredes o la superficie de cualquier objeto sumergido en él.

PUNTOS DE AGUA: Relación del conjunto de manantiales, surgencias naturales, pozos y sondeos entre otros, ubicados en un determinado ámbito geográfico, tanto si sus aguas se utilizan como si no, y cuyos datos son recogidos en un estadillo que refleja su condición administrativa, técnica e hidrogeológica.

RECARGA ARTIFICIAL: Procedimiento por el que se inyecta o añade en un acuífero agua desde la superficie. Puede realizarse por distintos métodos, ya sea favoreciendo la infiltración en superficie (método sólo aplicable en acuíferos libres) o procediendo a inyectar en una perforación (en acuíferos confinados es la única solución viable). Esta técnica contribuye a una mejor regulación de los recursos mediante el almacenamiento subterráneo de excedentes superficiales estacionales; de hecho, constituye un buen ejemplo de uso conjunto de recursos superficiales y subterráneos.

RECARGA NATURAL O ALIMENTACIÓN: Ver Alimentación.

RECURSOS HÍDRICOS: Volumen de agua renovable anualmente en un acuífero o en una cuenca hidrográfica. Sus unidades son las de un caudal, y se expresa habitualmente en hm³/año. A veces se distingue entre recursos “propios”, como es el caso, por ejemplo, de la infiltración por precipitación sobre los afloramientos del acuífero, y recursos “externos”, cuando la recarga procede de alimentación lateral de otro acuífero, de percolación de aguas superficiales o de recarga artificial.

RÉGIMEN DE DESCARGA: Modo regular o habitual de salida de agua.

REGULACIÓN DE MANANTIALES: Explotación o bombeo de uno o más manantiales (o la descarga a un río), con objeto de adecuar su funcionamiento a las exigencias y distribución en el tiempo de la demanda, de modo que se consigue un mejor aprovechamiento de los recursos para el uso considerado.

RESERVAS HÍDRICAS: Alude al volumen de agua almacenada en un embalse subterráneo por debajo de las cotas de emergencia de los manantiales. El agua subterránea de un acuífero puede dividirse en recursos (renovables anualmente) y reservas (no renovables). El término reservas puede matizarse con diferentes calificativos que hacen referencia a otras tantas circunstancias hidrogeológicas.

RESIDUO SECO: Peso de las sales precipitadas al evaporar un volumen conocido de agua, en laboratorio, a una temperatura de referencia (105-100 °C o 180 °C). El residuo seco constituye una medida de la salinidad del agua.

RETORNO DE RIEGOS: Agua que llega a la zona saturada procedente de la infiltración del agua de riegos. Se expresa, usualmente, como porcentaje de la cantidad de agua aplicada; el retorno de riegos depende de muchos factores (tipo de riego, cultivos, dotación, permeabilidad, etc.). Puede ser responsable de

un enriquecimiento progresivo en sustancias disueltas de las aguas subterráneas, sobre todo en climas áridos.

R.T.S.: Reglamentación Técnico-Sanitaria para el abastecimiento y control de calidad de las aguas potables de consumo público (B.O.E. nº 226, 20 de septiembre de 1990).

ROCAS METAMÓRFICAS: Las que han experimentado profundas transformaciones físicas y químicas debido a fuertes incrementos de la presión y de la temperatura, por lo general ligados a fenómenos orogénicos regionales. Las más abundantes son las pizarras, los esquistos y los gneises. Las posibilidades de formar acuíferos en estas rocas quedan reducidas a la zona alterada superficial o a las fracturas por fallas y diaclasas, que permiten a veces una apreciable circulación de agua. Tienen notable importancia para abastecimiento a pequeños núcleos y ámbito rural.

ROCAS SEDIMENTARIAS: Son las que provienen de sedimentos que se han consolidado debido a procesos de diagénesis. Se pueden clasificar según su origen en rocas detríticas evaporíticas (conglomerados, areniscas, arcillas), rocas químicas (calizas, dolomías), y rocas organógenas (carbones e hidrocarburos naturales). Muchas rocas sedimentarias constituyen importantes acuíferos, como las calizas y dolomías o los conglomerados y areniscas.

ROCAS EVAPORÍTICAS: Un tipo de rocas sedimentarias formadas por la evaporación de masas de agua superficiales. Las principales rocas evaporíticas son el yeso y la anhidrita (sulfato cálcico hidratado y anhidro) y la halita (sal común).

SALINIDAD: Término indicativo del contenido total en sales disueltas en un agua determinada. Suele expresarse también por el residuo seco (contenido en sales precipitadas al evaporar un litro de agua) o, indirectamente, por la conductividad eléctrica.

SALINIZACIÓN: Proceso de enriquecimiento progresivo, en el espacio y/o en el tiempo, de la concentración de sales disueltas en el agua. Este proceso puede ser de origen natural (disolución de minerales y rocas) o antrópico (intrusión marina, sobreexplotación de acuíferos).

SIMA: Cavidad kárstica de trazado fundamentalmente vertical.

SINCLINAL: Tipo de pliegue de las capas geológicas cuyo núcleo es más moderno que los flancos.

SINCLINORIO: Conjunto de pliegues complejos que forman parte de una amplia estructura geológica, cuyas formaciones del núcleo son más modernas que las de los flancos.

SISTEMAS MORFODINÁMICOS: Conjunto de procesos, estados y formas que se desarrollan en una zona determinada en función del agente externo predominante, como el agua, el viento o el hielo.

SOBREEXPLORACIÓN (de un acuífero): Se dice cuando de forma generalizada, en el espacio y/o en el tiempo, se explota un volumen de agua superior a los recursos medios del acuífero, lo que provoca la utilización de las reservas, y un descenso continuado de los niveles de las aguas subterráneas.

SONDEO SURGENTE: Perforación en el que el agua mana libremente por la boca, debido a que esta se halla a mayor presión que la atmosférica, al haberse captado un nivel acuífero confinado.

SUTRATO O MURO: (de un acuífero): Formación geológica infrayacente de carácter impermeable.

SUMIDERO: Lugar en el que se infiltra de manera localizada un caudal de aguas superficiales. Puede ser penetrable por el hombre o no.

SUPERFICIE FREÁTICA: Superficie superior de la zona saturada en un acuífero libre.

SUPERFICIE PIEZOMÉTRICA: Superficie definida por todos los puntos en los que la presión del agua, de un acuífero libre o confinado, es igual a la presión atmosférica. Su geometría puede establecerse a partir de las observaciones del nivel piezométrico en un número suficiente de pozos que penetren sólo ligeramente en la zona saturada. El límite superior de la zona saturada de un acuífero libre constituye un caso particular de superficie piezométrica (superficie freática).

TECHO: Es la superficie original superior de una formación geológica, un estrato o capa, o un filón.

TECTONIZADAS: Muy afectadas por la actividad tectónica, es decir los fenómenos de plegamiento, metamorfismo y/o de fracturación.

TEMPERATURA: Potencial calorífico referido a cierto origen. Se expresa en grados Celsius o centígrados (°C); el 0°C de esta escala de temperatura corresponde al punto de congelación del agua, y el 100°C a la transformación en vapor de agua.

TERRA ROSSA O ARCILLA DE DESCALCIFICACIÓN: El residuo insoluble de color rojizo, producto del proceso de disolución de la caliza, compuesto por minerales de la arcilla y óxidos de hierro, suele ocupar el fondo de las depresiones kársticas.

TRANSMISIVIDAD: Parámetro hidrogeológico que representa el producto del coeficiente de permeabilidad por el espesor saturado de acuífero (en un medio isótropo). Puede ser interpretado como el caudal del agua que atraviesa una franja de acuífero, orientada perpendicularmente al flujo, de anchura unidad y bajo un gradiente hidráulico unitario.

TRÉPANO: Herramienta de corte utilizada en un sistema de perforación a percusión para la realización de un sondeo. Consiste en una pieza de gran peso acabada en aristas cortantes, que realiza el trabajo de rotura, disgregación y trituración de la roca.

TURBIDITA: El depósito de sedimentos correspondientes a corrientes de turbidez en medio submarino, caracterizado por la presencia de sucesivas secuencias sedimentarias, con una parte inferior constituida por un lecho grano clasificado de sedimentos clásticos y otras capas suprayacentes de arenas, arcillas limosas y arcilla.

USO CONJUNTO: Gestión de los recursos hídricos que contempla el aprovechamiento racional de las aguas superficiales y las subterráneas, así como las desaladas y regeneradas, de acuerdo con las características globales de la cuenca hidrográfica y la distribución de la demanda.

USO DEL AGUA: Aplicación concreta del agua para un fin determinado. Los usos principales del agua son: abastecimiento urbano, agrícola e industrial.

UVALA: ver Dolina.

VENTANA TECTÓNICA: Recinto de la superficie terrestre cartografiable en el que por erosión, queda al descubierto una unidad tectónica inferior, completamente rodeada por unidades tectónicas superiores.

VERGENTE: Inclinado. En una estructura tectónica se refiere a la inclinación del plano axial (en el caso de pliegues) o del movimiento de un bloque a favor del plano de falla.

ZONA NO SATURADA: Es la zona comprendida entre la superficie del terreno y el nivel freático, en la que los poros que existen en la roca o en el suelo están vacíos, o contienen agua a presión inferior a la atmosférica, además de aire y otros gases.

ZONA SATURADA: La que los poros están ocupados en su totalidad por agua. Es la zona más alejada de la superficie del acuífero.

ZONAS DE REZUME: Áreas en las que el agua sale al exterior en gotas o con un caudal muy pequeño a través de los poros o discontinuidades de la roca.

ZONA EXTERNA: En el caso de la Cordillera Bética, representa una de las dos grandes zonas en las que se divide. Está limitada al Norte, por el Macizo Ibérico o la Cuenca del Guadalquivir, y al Sur, por la Zona Interna, al Oeste con las Unidades del Campo de Gibraltar, y al Este con el Mar Mediterráneo. Se caracteriza por estar formada por una cobertera sedimentaria de edad Triásico-Mioceno, muy deformada con pliegues, fracturas y cabalgamientos.

ZONA INTERNA: En el caso de la Cordillera Bética, una de las dos zonas en la que se divide esta alineación montañosa. Se compone de formaciones antiguas, de edad Paleozoico-Terciario, con una intensa deformación tectónica. La mayoría de las rocas que las constituyen son metamórficas y se apilan en sucesivas unidades tectónicas superpuestas. Son tres los complejos tectónicos diferenciados, ordenados de más bajo a más alto en el dispositivo estructural: Nevado-Filábride, Alpujarride y Maláguide.



- Alfaro, P. Andreu, J.M., González J. et al. 1999. Itinerario Geológico de la Cordillera Bética. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, Colegio Oficial de Biólogos y CAM, Alicante.
- Anguita Virella, F. y Moreno Serrano, F. 1993. Procesos geológicos externos y Geología Ambiental. Editorial Rueda, Madrid.
- Antigüedad, I.; Morales, T y Uriarte J.A. 2007. Los acuíferos kársticos. Casos del País Vasco. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 15: pp 325-332.
- Antoranz Onrubia, M. A., y Martínez Gil, F. J. 2003. El agua y el sistema educativo español. en La Directiva Marco del agua: realidades y futuros.pp 385-424.
- Ávila Álvarez; Fernández Salinas y Silva Pérez 2002. La Sierra Morena de Sevilla: una encrucijada de naturaleza y cultura. Revista Ería, 60: pp 55-79 .
- Bach, J. 2007. Las aguas subterráneas. Enseñanza de las ciencias de la tierra 15:pp 226-227.
- Bar, V. 1989. Children's views about the water cycle. Science Education 73:pp 481-500.
- Brassington, R. 1995. Field Hydrogeology. John Wley and Sons Ltd, Chichester. 175 pp.
- Calvo D. , Molina, M.T. 2006. Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente 2º Bachillerato. Editorial Mc-Graw-Hill, Madrid.
- CIHS. 1997. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. CIHS, Barcelona.pp
- Clarke, R., Lawrence, A., y Foster, S. 1996. Groundwater: a threatened resource. United Nations Environment Programme, Nairobi. 37 pp.
- Clarke, R., Lawrence, A., y Foster, S. 1996. Groundwater: a threatened resource. United Nations Environment Programme, Nairobi. 37 pp
- Conxita Marquez, J. B. 2007. Una propuesta de análisis de las representaciones de los alumnos sobre el ciclo del agua. Enseñanza de las ciencias de la tierra 15:pp 280-286.
- Cortés, A. L., y San Román, J. 2006. Varias visiones en torno al agua subterránea. en Actas de los XXII Encuentros de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Zaragoza, 13-16 de septiembre de 2006.
- Díaz del Olmo, F. 2004. Patrimonio Geológico de Andalucía. ENRESA, Madrid
- Dickerson, D., y Dawkins, K. 2004. Eighth grade students' understandings of groundwater. Journal of Geoscience Education 52:pp 178-181.
- García Díaz, J. E. 1998. Hacia una teoría alternativa de los conocimientos escolares. Diada, Sevilla.
- González Ramón, A.; Rubio Campos y López Geta, eds. 2006. El agua subterránea en el Parque Natural de las Sierras de Cazorla, Segura y Las Villas (Jaén).Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Colección Hidrogeología Espacios Naturales; nº 1, Madrid. 204 pp.

IGME, 1984. Protección de las aguas subterráneas en los abastecimientos. Ministerio de Industria y Energía. Secretaria General de la Energía y Recursos Minerales. 14 .pp.

IGME, 1985. Investigación y evolución de los recursos hidráulicos subterráneos de los sectores norte de las provincias de Huelva, Sevilla y Córdoba. Tomo I: Memoria y Mapas. 96 pp.

Junta de Andalucía, 2009. Acuerdo Andaluz por el agua. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, Sevilla.

Junta de Andalucía, 2008. Conociendo la Naturaleza. Sendero del Cerro del Hierro. Parque Natural de la Sierra Norte de Sevilla. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, Sevilla .

Junta de Andalucía, 1996. Plan de Ordenación de los Recursos Naturales y Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Natural de la Sierra Norte de Sevilla . Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, Sevilla.

Junta de Andalucía, 2004. Plan Andaluz de Humedales. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla. 263 pp.

López Geta, J.A; J.M. Fornés; G. Ramos, y Villaroya, M. 2001. Las aguas subterráneas. Un recurso natural del subsuelo”. Fundación Marcelino Botín. IGME, Madrid. 94 pp.

López-Geta, J.A. 2009. Importancia de la geología e hidrogeología en la investigación y gestión de los humedales. En: López-Geta, J.A., Fornes, J (Eds.). La a geología e hidrogeología en la investigación y gestión de los humedales. Serio: Hidrogeología y Aguas Subterráneas, nº 28. Madrid. 9-30.

Manzano, M., y Custodio Gimena, E. 2007. Las aguas subterráneas en Doñana y su valor ecológico. Enseñanza de las ciencias de la tierra 15:pp. 305-316.

Márquez, C.; Bach, J. 2007Una propuesta de análisis sobre las representaciones de los alumnos sobre el ciclo del agua. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 15: pp 280-286.

Meléndez Fuster, 1994. Geología. Editorial Paraninfo, Madrid.

Miller Tyler, G. Jr. 2002. Introducción a la Ciencia Ambiental, desarrollo sostenible de la Tierra. Un enfoque integrador. Editorial Thomson, Madrid. 333-366.

Ministerio de Medio Ambiente. 2006. Informe sobre “Evaluación de la calidad de las aguas subterráneas en la cuenca del Guadalquivir (años 2005-06). Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Ministerio de Medio Ambiente, Sevilla.

Moreno, C.; Sáez, R. y González, F. 2008. Guía geológica e itinerarios. Parque Natural de la Sierra Norte de Sevilla. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, Sevilla. 210 pp.

Moore, J. E., Zaporozec, A., y Mercer, J. W. 2005. Una introducción al agua subterránea. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Mexico. 83 pp.

Nebot Castelló, R. 2007. El ciclo del agua en una garrafa. Enseñanza de las ciencias de la tierra 15:pp 333-340.

OFEG, 2003. Delimitations des zones de protection des eaux souterraines en milieu fissuré. Guide pratique. Office Fédérale de l'Environnement, des Forêts et du Paysage, Berene.

Pulido-Bosch, A., y Rodríguez Estrella, T. 2007. Los acuíferos costeros y el suministro de agua de mar a las plantas desaladoras. Enseñanza de las ciencias de la tierra 15:pp 274-279.

Rebollo Ferreiro, L. F., y Martín-Loeches Garrido, M. 2007. Diez preguntas elementales sobre aguas subterráneas. Enseñanza de las ciencias de la tierra 15:pp 240-249.

Reyero Cortiña, C., Calvo, M., Vidal, M. P., García García, E., y Morcillo Ortega, J. G. 2007. Las ilustraciones del ciclo del agua en los textos de Educación Primaria. Enseñanza de las ciencias de la tierra 15:pp 287-294.

Rodríguez de la Rosa, M. 1991. Acercamiento de la Ribera del Huéznar; batería de actividades medioambientales". Editorial Guadalmena. Colección Didáctica del Sur. CEP Lora del Río, Sevilla.

Shiklomanow, I. A. 1997. Comprehensive assessment of the freshwater resources of the world: assessment of water resources and water availability in the world. World Meteorological Organization and Stockholm Environment Institute, Stockholm.

Tarback E. y Lutengs F. 2004. Ciencias de la Tierra. Una introducción de la Geología Física. Editorial Pearson, Madrid, 213-265.

Tóth, J. 1980. Cross-formational gravity-flow of groundwater: a mechanism of the transport and accumulation of petroleum (the generalized hydraulic theory of petroleum migration). en A. S. i. Geology, editor. Problems of petroleum migration. pp 121-167 pp.

Bibliografía en Internet:

The Glove Program. Teacher Guide. Globe, 2005:

<http://www.globe.gov>

http://www.ucm.es/info/diviex/proyectos/agua/experimentos_aula_modelosde-acuiferossubterraneos.html

<http://www.unesco.org/histagua>

<http://elcerrodelhierro.blogspot.com>

<http://ga.water.usgs.gov/edu>

http://www.ec.gc.ca/Water/en/nature/grdwtr/e_gdwtr.htm

<http://earthsci.org>

ISBN 978-84-7840-862-7



9 " 788478 " 408627 "