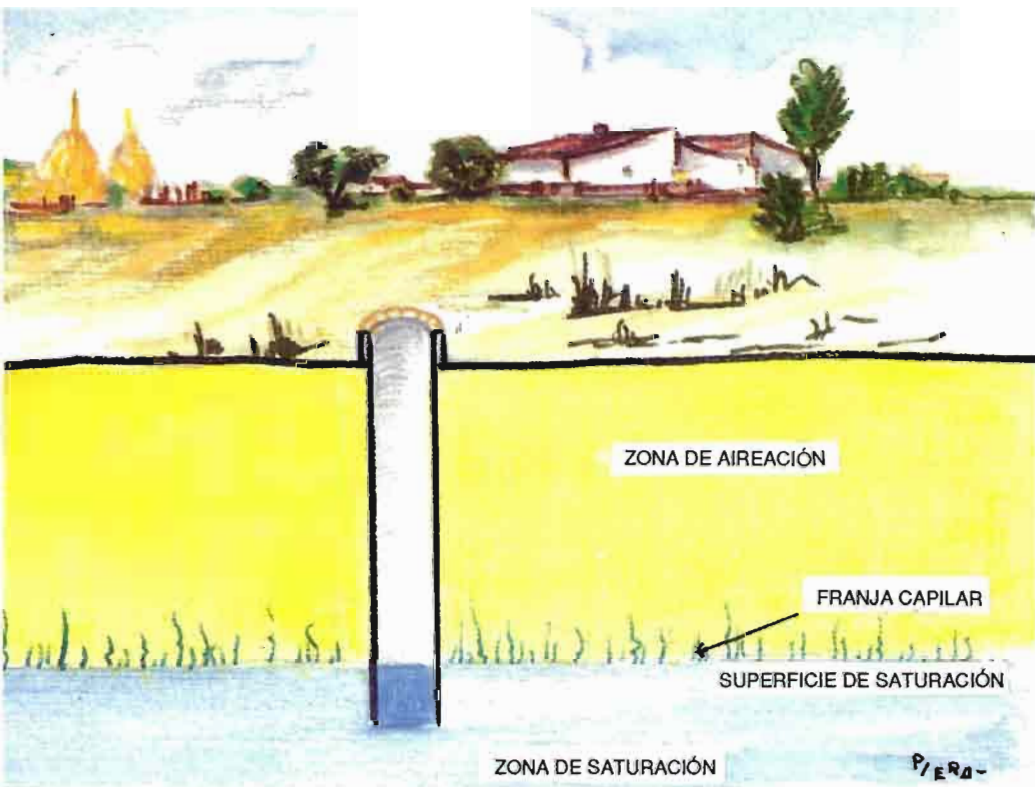


AGUAS SUBTERRANEAS



JOSE LUIS FUENTES YAGÜE

Ingeniero Agrónomo
IRYDA. Corazón de María, 8
28002 Madrid



AGUAS SUBTERRANEAS

RELACION ENTRE AGUA SUPERFICIAL Y SUBTERRANEA

Una parte de la precipitación caída (en forma de lluvia, nieve o granizo) discurre por la superficie terrestre formando arroyos y ríos, lo que constituye la *escorrentía superficial*. Otra parte se infiltra en el terreno, rellenando poros y fisuras; cuando éstos se saturan, el agua fluye por gravedad hacia los manantiales, ríos o mares, dando lugar a la *escorrentía subterránea*.

Las aguas superficiales y las aguas subterráneas están muy relacionadas, pues es muy frecuente que el agua subterránea aflore en fuentes y manantiales para seguir un recorrido superficial, mientras que en otros casos el agua superficial se infiltra, pasando a formar parte del agua subterránea. En muchas ocasiones, los ríos superficiales sirven de desagüe natural a las corrientes subterráneas, por cuya causa aquéllos siguen llevando agua aunque transcurran largos períodos de tiempo sin llover.

La relación entre las aguas superficiales y subterráneas resulta muy patente en el curso de muchos ríos. Cuando el agua circula por el álveo de un cauce asentado sobre un terreno permeable no consolidado, una parte del caudal rellena los poros de ese terreno, formando un manto de *aguas subálveas* que discurre a la par del río superficial (Fig. 1). Por tanto, en torno al río superficial fluye otro río subterráneo que discurre a mucha menos velocidad que el anterior. Cuando el nivel del agua se sitúa por debajo de la superficie del cauce, la totalidad del agua es subterránea.

Desde el punto de vista de su explotación hay que tener en cuenta una serie de características diferenciales entre las aguas superficiales y subterráneas:

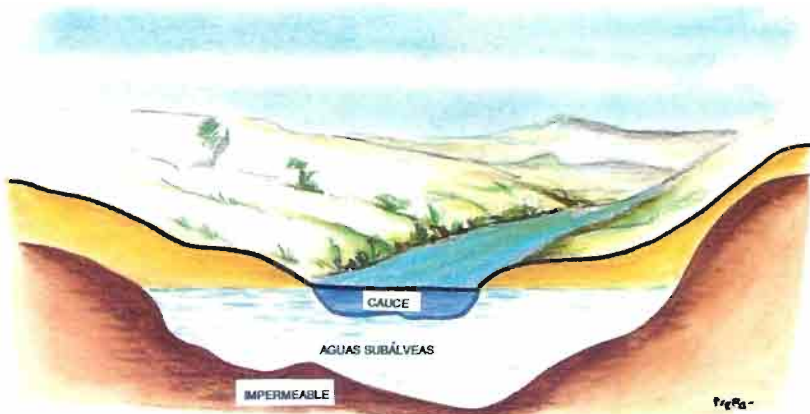


Fig. 1.-Las aguas subálveas son aguas subterráneas que circulan en torno al álveo de un río asentado sobre terreno poroso.

- La velocidad de desplazamiento de las aguas superficiales es muy superior (del orden de las 100.000 veces) a la de las aguas subterráneas.
- El volumen de agua subterránea almacenada es mucho mayor que el volumen del agua que discurre superficialmente en un momento dado.
- Las aguas que discurren superficialmente se concentran en un pequeño número de ríos, mientras que las aguas subterráneas se mueven y ocupan grandes extensiones.
- Las corrientes superficiales tienen grandes variaciones de caudal, mientras que las subterráneas experimentan unas variaciones muy pequeñas.

Distribución del agua subterránea

Las aguas superficiales se infiltran en el terreno por los poros y las grietas del suelo, hasta llegar a una cierta profundidad en donde todos los huecos están llenos de agua. Esta zona se llama *zona de saturación* o *capa freática*. Su límite superior se llama *superficie de saturación* o *superficie freática* (Fig. 2).

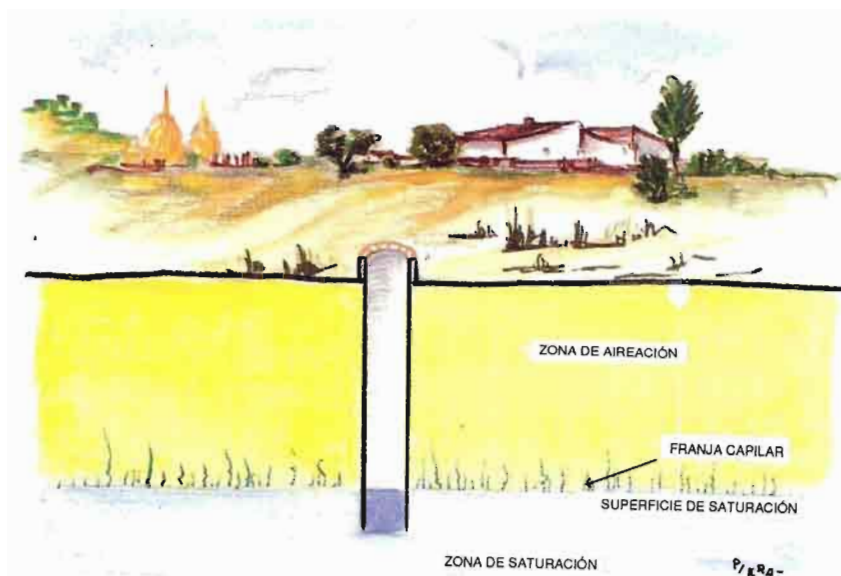


Fig. 2.-Distribución del agua subterránea.

La zona comprendida entre la superficie de saturación y la superficie del suelo, llamada *zona de aireación*, está recorrida por el agua que se infiltra hacia abajo y el vapor de agua que tiende a escapar hacia la atmósfera.

El agua de la zona de saturación asciende por capilaridad por los pequeños intersticios del terreno, formando una *franja capilar* de mayor o menor espesor, según la naturaleza del terreno: puede no existir o elevarse uno, dos o hasta tres metros por encima de la superficie de saturación. Esta franja capilar se observa por encima del agua en las orillas arcillosas de los ríos cuando el terreno forma un talud desprovisto de vegetación. Cuando los antiguos poceros llegaban en una perforación a esa franja capilar sabían que el final de la obra estaba cercano, pues estaban a punto de llegar a la zona de saturación.

El límite inferior de la zona de saturación puede llegar a grandes profundidades (hasta 10.000 metros). El agua más profunda



de esta zona permanece estancada, por lo que llega a ser tan salada o más que el agua del mar, como ocurre con el agua que sale de algunos sondeos petrolíferos; sólo las partes superficiales son aprovechables, debido a que se renuevan por una lenta circulación que termina por lavar el exceso de sales disueltas.

En algunas ocasiones, en las proximidades de la superficie del suelo hay un terreno saturado de poco espesor, separado de la verdadera zona de saturación. Estas aguas se llaman *aguas suspendidas*. La figura 3 representa una zona de aguas suspendidas retenidas por una ligera capa impermeable. Los pozos que atraviesan sólo la zona de aguas suspendidas suministran muy poco caudal (pozo A). Si se profundiza hasta atravesar la zona impermeable (pozo B), el pozo se seca, debido a que su agua se pierde en la zona permeable del fondo. Cuando el pozo llega a la zona de saturación, el agua mana en abundancia (pozo C).

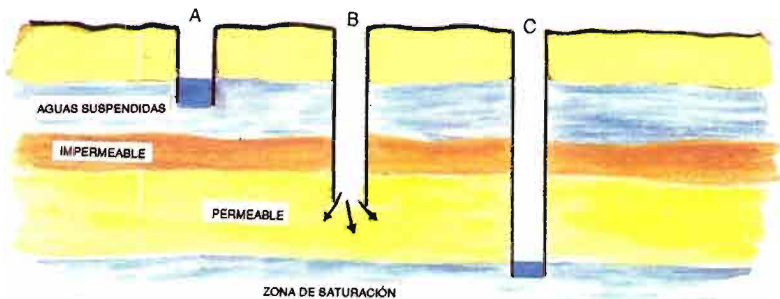


Fig. 3.—Aguas suspendidas retenidas por una delgada capa impermeable.

En algunas formaciones geológicas no se dan zonas de saturación como las anteriormente descritas. Es el caso de las calizas y dolomitas, que bajo la acción de las aguas meteóricas ligeramente ácidas se solubilizan, formando fisuras y cavidades de considerable tamaño, por donde el agua circula formando corrientes y lagos subterráneos. Este fenómeno, llamado *karstificación*, confiere a las rocas de esta naturaleza una considerable capacidad para almacenar agua.

Acuíferos

Se llaman acuíferos las formaciones geológicas que contienen agua subterránea. Desde un punto de vista práctico, un acuífero ha de ser capaz de almacenar y transmitir agua en cantidad susceptible de ser explotada económicamente. Las formaciones arcillosas, por ejemplo, son capaces de almacenar grandes cantidades de agua, pero no la transmiten con facilidad, por lo que no pueden ser considerados como acuíferos.

Un acuífero se comporta como si fuera un embalse, en donde hay que considerar: un caudal de entrada, un caudal de salida y una capacidad de almacenamiento y regulación.

El caudal de entrada o *recarga de agua* está constituido, generalmente, por el agua infiltrada procedente de precipitaciones, aguas superficiales, riegos, aguas residuales, etc.

En régimen general de funcionamiento del acuífero, la salida o *descarga de agua* se produce por el afloramiento superficial en fuentes y manantiales o mediante descarga subterránea hacia los cauces de los ríos, otros acuíferos vecinos o el mar. En el caso de acuíferos explotados por el hombre, la salida del agua se produce, también, mediante bombeo.

La capacidad de almacenamiento de un acuífero viene determinada por su volumen (definido por su extensión y espesor) y por su porosidad y fisuración.

La reserva es la cantidad de agua almacenada en el acuífero. Hay que diferenciar entre *reserva variable*, que puede variar según las entradas y salidas de agua, y la *reserva invariable*, que es independiente de la cuantía de las entradas y salidas.

La reserva variable se puede explotar de forma indefinida, mientras que la reserva invariable se puede explotar una sola vez, salvo que se haga una recarga con aguas superficiales.

Tipos de acuíferos

Atendiendo a sus características se pueden considerar diferentes tipos de acuíferos:



A) Según los materiales constituyentes

- *Acuíferos porosos.* Están constituidos por materiales sueltos no consolidados (gravas y arenas, generalmente). El agua circula con facilidad por los poros o espacios que dejan entre sí las partículas sólidas (Fig. 4).

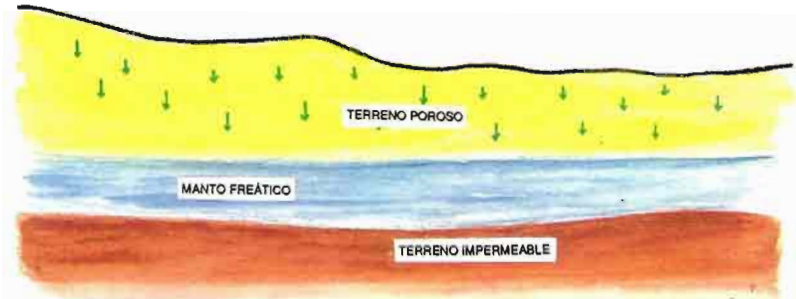


Fig. 4.-Acuífero poroso. El agua que se infiltra en el terreno poroso forma un manto freático saturado de agua, ante la barrera del terreno impermeable.

- *Acuíferos fisurados.* Están constituidos por rocas consolidadas, en donde el agua circula por las fisuras y grietas formadas en las mismas. Algunas rocas (tales como las calizas y dolomitas) bajo determinadas condiciones son solubles al agua, con lo cual las fisuras se agrandan, formando conductos y cavidades de considerable tamaño, fenómeno que recibe el nombre de karstificación (Fig. 5).

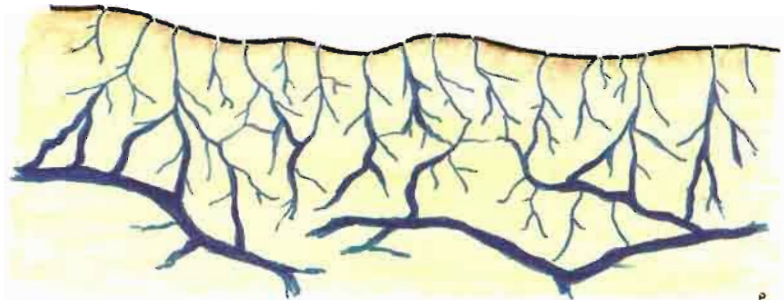


Fig. 5.-Acuífero fisurado. Por el fenómeno de karstificación, las fisuras de la roca aumentan progresivamente de tamaño, lo que permite la infiltración, retención y circulación de importantes cantidades de agua.

En las rocas consolidadas que no tienen esta característica (granito, gneis, pizarra, cuarcita, etc.), sólo actúa el fenómeno de meteorización, con lo cual las fisuras son más pequeñas, menos numerosas, discontinuas y más superficiales que en el caso anterior. La penetración del agua queda limitada, por lo general, a la zona superficial (Fig. 6). Por otra parte, al haber poca comunicación entre las fisuras, cuando se perforan estos terrenos aparece muy poca cantidad de agua, sin que ello suponga la carencia de la misma.

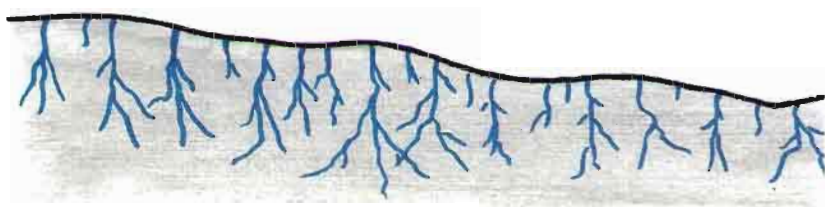


Fig. 6.-Acuífero fisurado sin karstificación de la roca. Sobre éste sólo actúa la meteorización, con lo cual las fisuras son pequeñas y poco profundas.

- *Acuíferos porosos y fisurados.* Las areniscas y los conglomerados son un tipo de roca intermedia entre las consolidadas y las no consolidadas. Están formadas por materiales sueltos (arena en el caso de las areniscas y grava en el caso de los conglomerados) unidos mediante un cemento (generalmente calcáreo o silíceo).

B) *Según el grado de presión* a que está sometida el agua, los acuíferos pueden ser:

- *Libres, no confinados o freáticos.* La superficie del agua está a la presión atmosférica, debido a que no tiene encima ningún terreno que actúe como capa confinante. Por tanto, al ser perforado el acuífero mediante un sondeo, el nivel piezométrico de este sondeo (es decir, la cota a que se estabiliza el nivel del agua) coincide con el nivel del agua en el acuífero (Fig. 7).

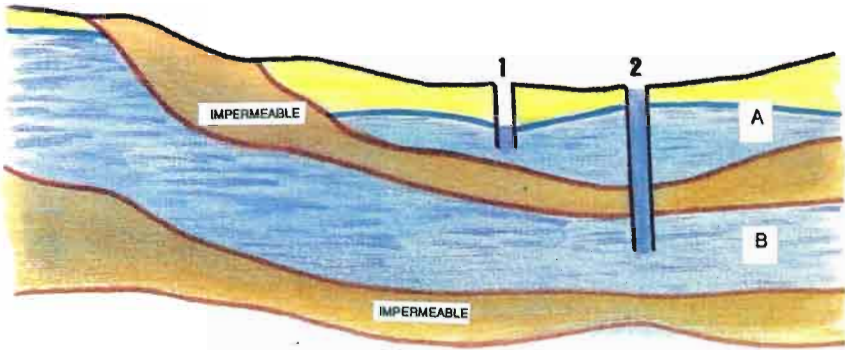


Fig. 7.-A) Acuífero libre. El nivel piezométrico del pozo 1 coincide con el nivel del agua del acuífero. B) Acuífero confinado. El nivel piezométrico del pozo 2 está situado a una cota en que la presión de la columna de agua se iguala con la presión del acuífero.

- *Cautivos, confinados o a presión.* El techo del acuífero está limitado por una capa de terreno impermeable, con lo cual el agua está sometida a mayor presión que la atmosférica (Fig. 7). Cuando se perfora un sondeo, el agua asciende en el mismo hasta que la presión de la columna de agua se iguala con la presión del acuífero. El agua surge por sí sola hasta la superficie del suelo cuando el nivel piezométrico del sondeo se sitúa por encima de la cota del terreno (*sondeo surgente o artesiano*).
- *Semicautivos o semiconfinados.* El techo del acuífero está limitado por un terreno semipermeable, con lo que se dan unas características intermedias entre los dos tipos anteriormente citados.

Explotación de acuíferos

El funcionamiento de un acuífero en régimen natural se puede comparar a un depósito con tuberías de entrada y de salida de agua (Fig. 8). En estas condiciones el acuífero está, por lo general, mal utilizado, ya que no siempre se aprovechan convenientemente los manantiales, ni tampoco se pueden controlar las descargas a otros acuíferos.

En la figura 9 se representa la explotación de un acuífero me-

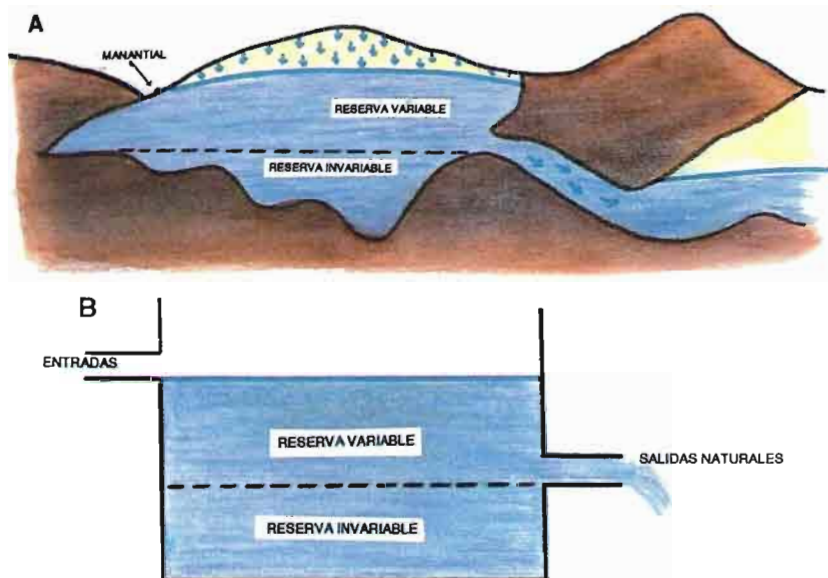


Fig. 8.-A) Funcionamiento de un acuífero en régimen natural. La salida del agua tiene lugar mediante descarga a manantiales y a otros acuíferos próximos. B) Comparación del acuífero con un depósito dotado de entradas y salidas de agua.

diente bombeo. El mejor rendimiento se obtiene cuando se bombea la totalidad de la reserva variable.

Cuando la explotación es muy intensa y prolongada pueden aparecer dos efectos indeseables:

- *Descenso del nivel piezométrico de los sondeos*, que ocurre cuando el caudal de bombeo supera al de las entradas, con lo cual va disminuyendo progresivamente la reserva hasta que llega un momento en que el acuífero se vacía totalmente.

En ocasiones puede estar justificada la sobreexplotación del acuífero, a condición de que se haga de una forma controlada para cubrir el déficit de la reserva invariable. Esto se puede hacer de varias maneras: dejar que el acuífero se recargue de una forma natural durante el invierno mediante aportaciones de aguas superficiales, dejar de bombear hasta que el nivel piezométrico de los sondeos alcance la cota

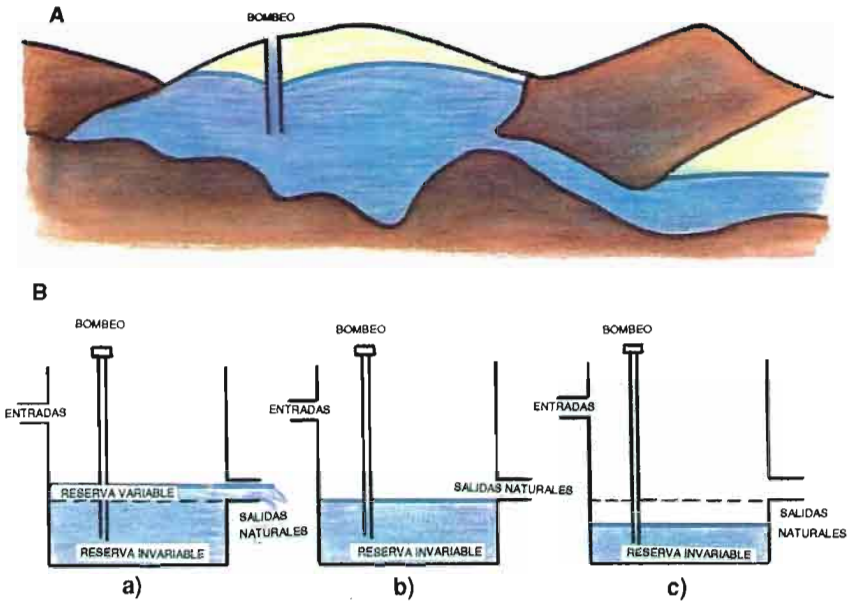


Fig. 9.-A) Funcionamiento de un acuífero explotado con diversos caudales de bombeo. B) Comparación del acuífero con un depósito. a) El bombeo no agota la reserva variable. b) El bombeo agota toda la reserva variable. c) El bombeo agota progresivamente la reserva invariable.

debida, y recargar el acuífero artificialmente con aguas superficiales sobrantes.

- *Salinización del agua.* Se produce en los acuíferos que están en comunicación con aguas saladas. La sobreexplotación de estos acuíferos da lugar a un flujo de agua salada hacia los mismos, lo que modifica el contenido salino, pudiendo llegar a límites peligrosos.

Los acuíferos constituyen un patrimonio muy importante de la naturaleza, de cuya explotación racional se sacan efectos positivos, ya que se aprovecha un recurso renovable. Su gestión exige una participación coordinada entre los usuarios y las administraciones públicas.

La gestión racional de los recursos hidráulicos de una comarca exige las siguientes condiciones:

- Conocimiento de los acuíferos: características geométricas (extensión, espesor, naturaleza de sus límites), clase de terreno y sus características hidráulicas (porosidad, permeabilidad, etc.), régimen hidráulico (recarga, circulación y descarga), profundidad a que se encuentra el agua en cada zona, calidad del agua, etc.
- Control del agua bombeada, que puede hacerse mediante un tubo portasondas para medir el nivel del agua y un caudalímetro para medir el caudal sacado.
- Adopción de medidas precisas cuando se produzcan desviaciones sobre la planificación prevista.

Manantiales

Las fuentes o manantiales son los puntos en donde el agua subterránea aflora a la superficie. Su utilidad es doblemente interesante:

- Se pueden explotar directamente o previa ampliación, mediante la construcción de captaciones adecuadas.
- Proporcionan información de la constitución y características de los acuíferos.

Según la forma en que el agua aflora a la superficie, se establecen diferentes tipos de manantiales.

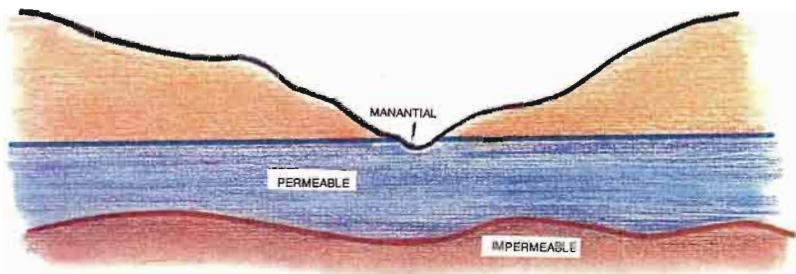


Fig. 10.-Manantial de emergencia o de vaguada. El agua aflora en donde el nivel freático se sitúa por encima de la superficie del terreno.



- *De emergencia o de vaguada.* La zona de saturación o nivel freático de un acuífero libre, bajo terreno ondulado, se sitúa por encima de la cota del terreno, surgiendo el agua en las vaguadas o depresiones situadas por debajo de ese nivel freático (Fig. 10). Estos manantiales están sujetos a las variaciones de nivel freático originadas por las condiciones climáticas.
- *De vertedero.* Estos manantiales se sitúan, por lo general, en los afloramientos de formaciones impermeables situadas entre otras permeables, surgiendo el agua a través de las discontinuidades del terreno (Fig. 11).

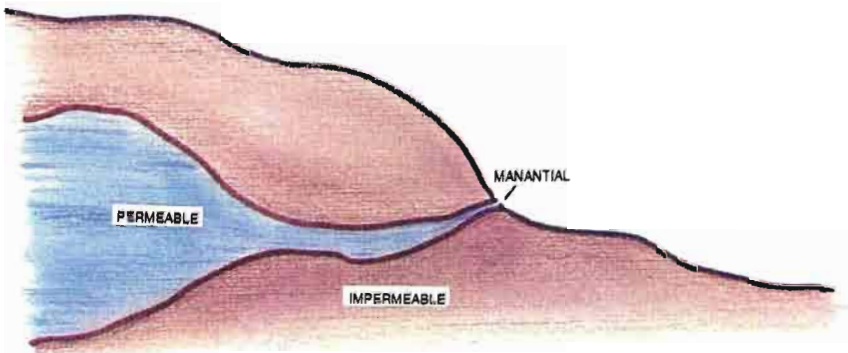


Fig. 11.–Manantial de vertedero. El agua contenida en la capa permeable aflora en la discontinuidad que presenta el terreno impermeable.

- *De filón o de grieta.* El agua de un acuífero, confinado o a presión, asciende por las grietas de las zonas fisuradas hasta que aflora a la superficie (Fig. 12). En ocasiones el agua asciende desde zonas muy profundas, conservando una temperatura más o menos elevada (*fuentes termales*).

Captación de aguas subterráneas

La captación de aguas subterráneas se realiza mediante pozos y sondeos. El pozo ordinario es una captación con diámetro superior a un metro (normalmente de 2-3 metros) y con una

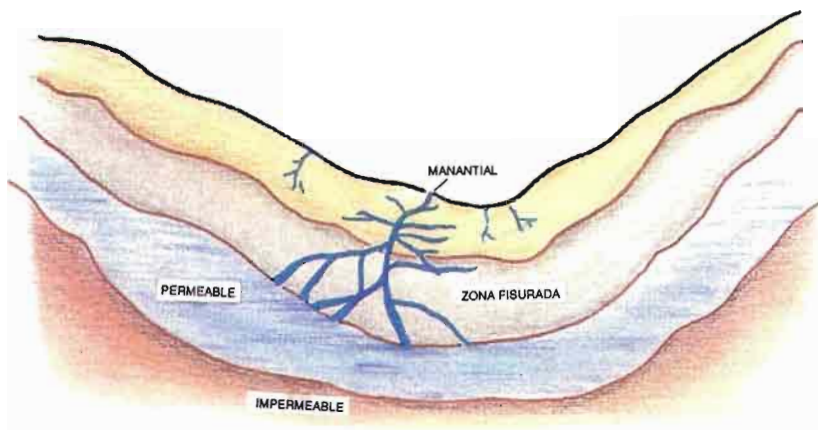


Fig. 12.-Manantial de filón o de grieta. El agua de un acuífero a presión asciende por la zona fisurada hasta que aflora en la superficie del terreno.

profundidad que no suele sobrepasar los 15-20 metros. El sondeo es una captación con diámetro inferior a 60 centímetros y una profundidad que excede los 20 metros.

El pozo se reviste con obra de fábrica o con anillos prefabricados de hormigón. El sondeo se suele entubar con tubo metálico.

Las características diferenciales entre pozo y sondeo son las siguientes, teniendo en cuenta que, en cualquier caso, los pozos sólo se construyen cuando el acuífero es poco profundo:

- Los pozos se llenan de agua cuando sobrepasan la superficie de saturación, por lo que no pueden profundizar mucho más allá de esa cota, mientras que los sondeos pueden penetrar profundamente en la zona de saturación.
- Para una misma altura de profundización dentro de la zona de saturación, la superficie filtrante de un pozo es mucho mayor que la de un sondeo.
- El caudal de agua que pasa a través de la superficie filtrante viene en función de la permeabilidad del terreno. Por tanto, el pozo es ventajoso cuando la zona de saturación es a la vez poco permeable y de poco espesor.
- El caudal aumenta cuanto más se profundiza en la zona de



- saturación, debido al aumento de la presión hidrostática. En este caso es más conveniente el sondeo que el pozo.
- El sondeo tiene menor volumen que el pozo, por lo que se agota antes en el bombeo. Por otra parte, el caudal que viene a través de la superficie filtrante disminuye a medida que el agua se almacena y sube de nivel. Por ambos motivos, el sondeo funciona de forma intermitente en el bombeo, mientras que el pozo suministra un caudal más regular. En el primer caso es necesario construir un depósito regulador que vaya acumulando agua para extraerla a medida que se precise, mientras que en el caso del pozo no es necesario el depósito regulador, o puede ser más pequeño.

Construcción de sondeos

Previamente a la construcción del sondeo es preciso hacer un estudio hidrogeológico para tener la mejor información posible de dónde hay que realizarlo. Cuando existan otros sondeos en la zona, éstos nos suministrarán datos que ayuden a determinar el comportamiento del nuevo sondeo.

Por lo general la construcción de un sondeo comprende las siguientes operaciones:

- Perforación.
- Entubación.
- Relleno de grava.
- Desarrollo.
- Cementación.
- Ensayo de bombeo.

Perforación

Para la perforación se utilizan tres métodos: percusión, rotación y rotoperforación.

Percusión. Su fundamento consiste en fragmentar la roca mediante la elevación y caída de un trépano de acero unido a una

barra de mucho peso. Los detritos que se forman se sacan periódicamente al exterior, mezclados con agua, mediante una cuchara o válvula de aspiración, consistente en un tubo con una válvula en la parte inferior que se abre desde abajo hacia arriba: cuando desciende el tubo, los detritos penetran en el interior levantando la válvula, que se cierra por su propio peso al ascender.

Este método se emplea preferentemente para perforar terrenos duros.

Rotación. Este método consiste en desgastar el terreno mediante la rotación de un trépano o broca montado en el extremo de un tubo que comunica con el exterior. Durante la perforación se hace circular una corriente continua de lodos que tiene las misiones siguientes:

- Ayuda a disgregar la roca.
- Enfría y lubrica el trépano.
- Arrastra hasta la superficie los detritos formados.
- Consolida las paredes de la perforación, evitando su desmoronamiento.

La inyección de lodos puede hacerse de dos formas:

- Se introducen a presión por el interior del tubo y ascienden por el espacio anular comprendido entre el tubo y las paredes del sondeo (circulación directa).
- Se introducen por el espacio anular y son aspirados por el tubo (circulación inversa).

La circulación inversa necesita menor potencia, pero exige un diámetro mayor de la perforación.

Rotopercusión. Este método es una combinación de los dos anteriores: el trépano golpea el fondo de la perforación a la vez que gira. Se utiliza en terrenos muy consistentes donde no es necesaria la entubación.



Entubación

La entubación tiene por misión evitar el derrumbamiento de las paredes del sondeo (cuando éstas no son de roca consolidada), a la vez que permite el paso del agua del acuífero. Se efectúa con tubería ciega en la zona no saturada y con tubería perforada o *filtro* en la zona de saturación.

Los tubos se sueldan unos a otros a medida que se van colocando, evitando la formación de rebabas en el interior de la tubería, ya que originarían importantes pérdidas de carga.

A lo largo de la tubería, con una separación de 12-20 metros, se colocan exteriormente unas tiras de chapa soldadas por un extremo (centradores), cuya misión consiste en evitar que la tubería descansa sobre la pared de la perforación, lo que dificultaría el empaque de grava que se hace posteriormente.

El diámetro de tubería más normal es el de 300-400 milímetros, desde la superficie hasta una profundidad de 20 metros por debajo de la bomba; a partir de ese punto se puede reducir el diámetro a 200-300 milímetros mediante un cono de reducción. El espesor del tubo será superior a cinco milímetros, para evitar el colapso del sondeo por aplastamiento del tubo.

El mayor diámetro de la entubación, que acarrea un incremento de precio, no está compensado por un incremento paralelo del caudal. El porcentaje de aumento de caudal en función del diámetro es el siguiente:

Diámetro	D	2D	3D	4D	6D	8D
Caudal	C	1,12C	1,19C	1,25C	1,35C	1,43C

La eficacia del sondeo depende, en gran parte, del tipo de filtro. Un filtro inadecuado dificulta el paso del agua a su través, provocando una pérdida de carga, con el consiguiente aumento del coste de la elevación.

Desde el punto de vista práctico, el filtro ha de reunir las siguientes características:

-
- Resistencia suficiente para soportar las presiones del agua, sin que se produzca su aplastamiento. También ha de ser resistente a los ataques químicos del agua.
 - Distribución uniforme de las ranuras, con el fin de proporcionar un flujo de agua uniforme. Deben rechazarse los filtros formados al rajar un tubo ciego con un soplete.
 - Abertura de las ranuras en forma de V, con el estrechamiento en la parte exterior. De este modo se reduce la velocidad de entrada del agua, lo que retarda la formación de incrustaciones que obstruyen el filtro.

El filtro más utilizado es el llamado de «puentecillo», en donde las ranuras de la chapa se originan por estampación.

El filtro debe cubrir un 30-40 por 100 del espesor del acuífero. En caso de que éste sea de gran espesor, no conviene colocar tramos muy largos de filtro, para no debilitar la columna de tubería del sondeo, por lo que se intercalarán tramos de tubería ciega entre otros de filtro.

El tamaño de los orificios del filtro viene en función de las arenas naturales del acuífero o de las gravas colocadas en el empaque. En el primer caso, el filtro debe retener el 30-40 por 100 de la arena; en el segundo caso, éste debe retener el 90 por 100 de las gravas.

Relleno de grava

Esta operación consiste en colocar grava calibrada y seleccionada en el espacio anular que queda entre la pared de la perforación y la tubería.

La grava debe ser silíceo, limpia, de forma redondeada y con un tamaño, como norma general, de 3-5 milímetros de diámetro.

El espesor de la capa de grava estará comprendido entre 8 y 20 centímetros. El límite inferior está determinado por la dificultad de su colocación. Un espesor superior a la cifra más alta reduciría la velocidad de entrada del agua, con el consiguiente riesgo de obstrucción ocasionada por los finos del sondeo. El espesor más adecuado es de 10-12 centímetros de grava.



Desarrollo del sondeo

El desarrollo del sondeo tiene por finalidad eliminar los elementos finos que quedan dentro de la perforación (después de realizar la entubación y el empaque de gravas), a la vez que se consigue la ordenación por tamaño de las gravas, quedando las más gruesas junto a los orificios del filtro (Fig. 13).

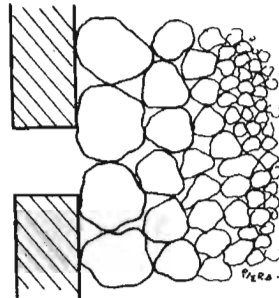


Fig. 13.-Ordenación del tamaño de las gravas junto al filtro, después de efectuado el desarrollo del sondeo.

Existen varios métodos de desarrollo basados en conseguir la entrada y salida del agua a presión a través del filtro. En otras ocasiones se utilizan agentes dispersantes que facilitan la eliminación de arcillas y lodos de perforación.

Cementación

La cementación consiste en fijar la tubería al fondo de la perforación mediante hormigón, con el fin de evitar su posible desplazamiento ocasionado por corrientes subterráneas. Se hormigona también la parte superior del sondeo, entre la pared y la tubería, para evitar la contaminación ocasionada por aguas superficiales.

Ensayo de bombeo

El ensayo de bombeo tiene por finalidad conocer el comportamiento del sondeo, lo que permite dimensionar el equipo de bombeo y la profundidad a que debe instalarse para obtener el máximo rendimiento de este equipo.

Antes de empezar el ensayo se recomienda bombear con un caudal bajo y constante hasta que el nivel del agua se estabilice. Se tendrá la precaución de evacuar el agua sacada a suficiente distancia del sondeo para evitar que esta agua se infiltre en el acuífero.

A continuación se aumenta progresivamente el caudal, procediendo de forma escalonada. Por ejemplo, se mantiene el caudal constante durante una hora, se mide mediante una sonda eléctrica de flote el descenso del nivel del agua y se deja que el nivel se estabilice de nuevo antes de hacer la siguiente medición con un caudal mayor.

Se hace un gráfico del ensayo, anotando, en papel milimetrado, los caudales en el eje de abscisas y los descensos de nivel en el eje de ordenadas (Fig. 14). A caudales bajos se observa que el descenso de nivel aumenta casi proporcionalmente con el caudal; pero a partir de un cierto caudal, el descenso de nivel aumenta con mucha rapidez. Este aumento rápido del descenso del nivel, que sobreviene sin un aumento significativo de caudal, denota que se ha alcanzado la capacidad límite del sondeo. La zona de caudal más favorable se sitúa antes del punto de inflexión de la curva (punto crítico). Como es natural, cuando el caudal de con-

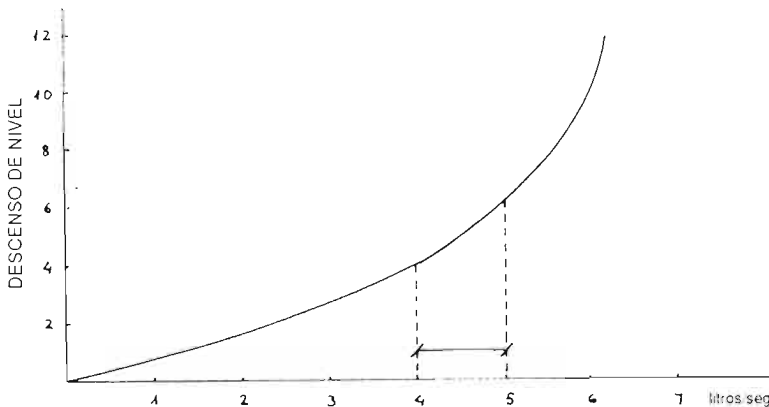


Fig. 14.-Gráfico de ensayos de caudal. La zona de explotación más favorable viene indicada en la figura (4-5 litros/segundo). Para mayor caudal, el descenso de nivel es muy acusado.



sumo sea inferior al óptimo de la captación se elegirá la bomba apropiada a las necesidades, sin utilizar la captación a pleno rendimiento.

Aforo de pozos ordinarios

El aforo de los pozos ordinarios se puede hacer de forma semejante a como se indicó anteriormente en el ensayo de bombeo para sondeos; pero es más fácil proceder de la siguiente forma:

- Se bombea agua a bajo caudal constante hasta que el nivel del agua se estabilice.
- A continuación se bombea con un caudal constante mayor que el caudal que mana del pozo. Como consecuencia, el nivel del agua desciende. Se mide el caudal que se está bombeando (en litros/segundo) y el tiempo que dura el bombeo.
- Una vez que la bomba se ha parado, se mide el tiempo que tarda el pozo en recuperar el nivel estable.

Resulta evidente que la cantidad de agua bombeada será igual a la cantidad que mana el pozo durante el tiempo de bombeo, más la cantidad que mana el pozo durante el tiempo de recuperación.

El caudal que mana el pozo viene dado por la siguiente fórmula:

$$C_m = \frac{C_b \times t_b}{t_b + t_r}$$

C_m = Caudal que mana el pozo, en litros/segundo.

C_b = Caudal de bombeo, en litros/segundo.

t_b = Tiempo de bombeo, en minutos.

t_r = Tiempo de recuperación, en minutos.

Ejemplo:

Se pretende calcular el caudal que mana un pozo, para lo cual

se bombean seis litros/segundo durante treinta minutos. El tiempo que tarda el agua en recuperar el nivel estable es de cincuenta y cinco minutos.

Solución:

$$C_m = \frac{C_b \times t_b}{t_b + t_r} = \frac{6 \text{ l/seg.} \times 30 \text{ min.}}{30 \text{ min.} + 55 \text{ min.}} = \frac{6 \text{ l/seg.} \times 30 \text{ min.}}{85 \text{ min.}} = \frac{180}{85} \text{ l/seg.} = 2.12 \text{ l/seg.}$$

Contaminación de las aguas subterráneas. Formas de propagación

La contaminación del agua subterránea consiste en la alteración de su calidad natural, de tal modo que queda total o parcialmente inutilizable para la finalidad a que se destina.

Cuando el foco de contaminación está muy localizado, de tal forma que afecta a una zona concreta, se dice que la contaminación es *puntual*; es el caso, por ejemplo, de un vertedero situado sobre la superficie del suelo. Debido a la depuración natural que se produce en el suelo, la actividad contaminante va disminuyendo progresivamente a medida que nos alejamos del foco de contaminación. Se dice, en cambio, que la contaminación es *difusa* cuando afecta directamente a una zona más o menos extensa, como ocurre, por ejemplo, en el caso de la contaminación de un acuífero libre situado bajo una zona de regadío en donde se abona con exceso de nitrógeno.

La propagación de la contaminación en el acuífero se desarrolla de tres formas distintas, según se considere la situación del contaminante:

- *Propagación desde la superficie.* El caso más frecuente de contaminación puntual es la acumulación de residuos sólidos, cuyo material soluble es lixiviado o lavado por el agua de lluvia y arrastrado hasta el acuífero (Fig. 15). La contaminación difusa más frecuente es la causada por la actividad agrícola con el empleo de fertilizantes y pesticidas. El

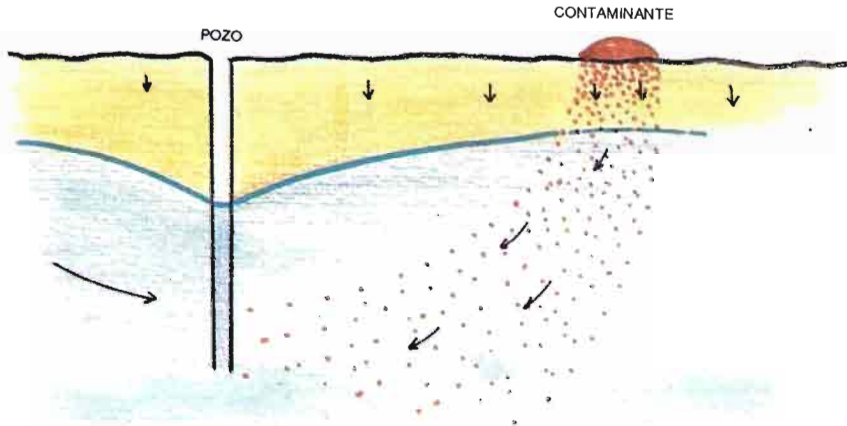


Fig. 15.-Contaminación de un acuífero provocada por lixiviación de contaminantes solubles situados en superficie.

agua de lluvia o de riego arrastra por lixiviación estos productos hasta la zona saturada del acuífero (Fig. 16).

- *Propagación subterránea desde la zona no saturada.* Uno de los casos más frecuentes de contaminación de este tipo es el provocado por la depuración de aguas residuales domésticas (Fig. 17). El riesgo es mayor cuando el sistema de evacuación se concentra en un área pequeña o en terrenos que

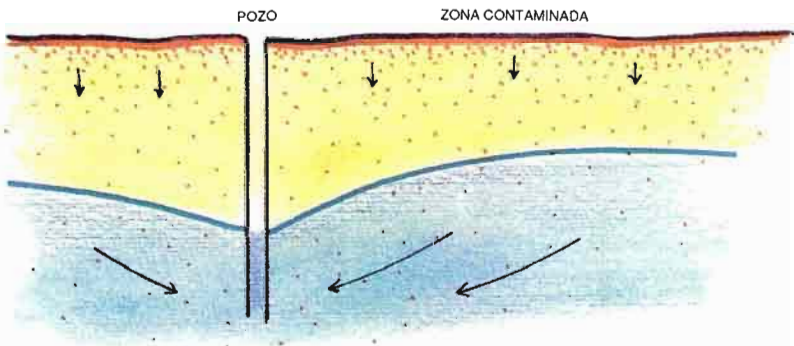


Fig. 16.-Contaminación difusa provocada por la actividad agrícola (empleo de fertilizantes, pesticidas, etc.) que son lixiviados por el agua de lluvia o de riego.

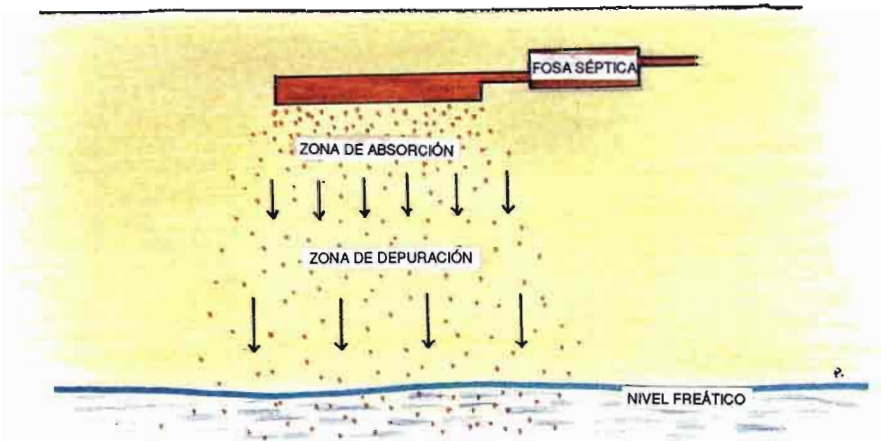


Fig. 17.-Contaminación de un acuífero provocada por los efluentes de una fosa séptica.

favorecen la infiltración. A pesar de la depuración que se produce en el terreno, pueden llegar contaminantes hasta la zona saturada del acuífero. También se produce esta forma de contaminación con la acumulación de residuos líquidos industriales que se depositan en depresiones del terreno o en excavaciones. Resulta especialmente peligrosa la situación cuando los residuos líquidos se depositan en graveras abandonadas cuyo fondo está muy próximo a la zona de saturación.

- *Propagación desde la zona saturada.* La contaminación más directa y más peligrosa se produce cuando se utilizan pozos de inyección profunda para evacuar las aguas residuales. Este método de evacuación sólo se puede utilizar con grandes precauciones y siendo consciente de sus limitaciones.

El bombeo de agua de pozos situados en las proximidades de un cauce superficial contaminado provoca un flujo inducido desde ese cauce hacia el pozo (Fig. 18). Al cabo de cierto tiempo de extracción continua, el pozo extrae agua contaminada.

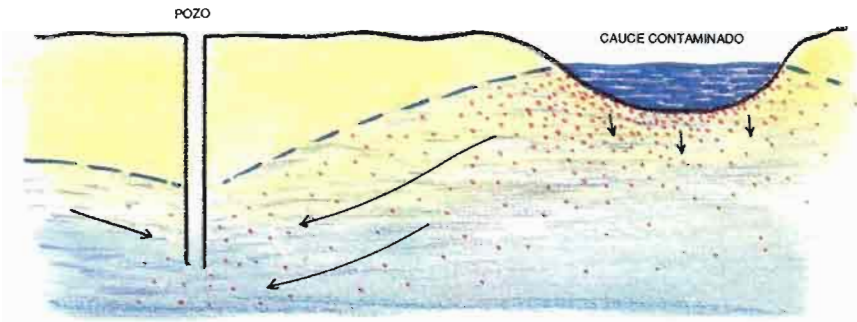


Fig. 18.-Contaminación de un acuífero provocada por el flujo inducido de agua contaminada procedente de la infiltración de aguas superficiales.

Fuentes de contaminación

Las causas que originan la contaminación de los acuíferos pueden clasificarse en cuatro grupos:

- Contaminación por actividades domésticas y urbanas.
- Contaminación por actividades agrícolas y ganaderas.
- Contaminación por actividades industriales y mineras.
- Contaminación por intrusión marina.

1. Contaminación por actividades domésticas y urbanas

Los residuos sólidos procedentes de estas actividades se colocan en vertederos, en donde las materias solubles son lixiviadas por el agua de lluvia. La contaminación de los acuíferos no aparece inmediatamente, pero puede durar muchos años, aun después de la desaparición del vertedero. Cuando éste se coloca en un lugar inadecuado desde el punto de vista hidrogeológico, la contaminación se extiende hasta puntos muy alejados, a pesar de la depuración natural que se produce en el terreno. El emplazamiento de los vertederos y su control, ejercido por técnicos competentes, son los únicos medios seguros para evitar o aminorar la contaminación.

La contaminación producida en los vertederos de residuos

sólidos urbanos se agrava cuando en ellos se vierten, también, residuos sólidos industriales.

Los residuos líquidos procedentes de las actividades doméstica y urbana se evacúan a través del alcantarillado, que, a su vez, desagua, en la mayor parte de las ocasiones, en cauces fluviales, con o sin depuración previa. En núcleos aislados y en localidades pequeñas, la evacuación se realiza, generalmente, por medio de fosas sépticas o pozos negros.

El mayor riesgo de contaminación de acuíferos causada por contaminantes líquidos se produce por infiltraciones desde las redes de saneamiento, pozos negros, fosas sépticas, etc. Los cauces superficiales contaminarían los acuíferos cuando hubiese recarga de éstos con dichos cauces contaminados o en cualquier tipo de conexión río-acuífero. En cualquier caso, el riesgo aumenta en áreas porosas favorables a la infiltración o en zonas de recarga de acuíferos kársticos.

Las aguas subterráneas son raramente contaminadas por bacterias patógenas, salvo en el caso de terrenos con rocas fisuradas. Los terrenos porosos (arenas, arenas arcillosas, areniscas poco cimentadas, etc.) constituyen un filtro natural tanto más eficaz cuanto más fina sea la granulometría. Las aguas que contienen estas formaciones están normalmente libres de bacterias patógenas. En cambio, las aguas contenidas en rocas fisuradas (calizas, areniscas duras) no deben ser consumidas sin un análisis previo, ya que pueden existir caminos fáciles que llevan directamente los contaminantes hacia los acuíferos.

Hay que tener en cuenta que para recoger y transportar una muestra de agua es preciso respetar las normas exigidas por el laboratorio. Una exposición prolongada al aire y al sol puede destruir los gérmenes patógenos antes de haber sido detectados.

La contaminación de acuíferos causada por contaminantes domésticos y urbanos se previene mediante las siguientes actuaciones:

- Impedir la llegada de contaminantes al acuífero mediante perímetros de protección de las captaciones próximas a los focos contaminantes.



- Emplazar adecuadamente los nuevos vertederos y desagües de efluentes líquidos.
- Llevar control de todos los focos contaminantes.
- Tratar adecuadamente los residuos líquidos antes de su vertido a cauces superficiales.

2. Contaminación por actividades agrícolas y ganaderas

La contaminación originada por las actividades agrícolas y ganaderas es, seguramente, la causa más importante y más generalizada de la contaminación de acuíferos. Las actividades que generan los principales problemas son las siguientes:

- *Fertilización.* Los fertilizantes nitrogenados son los que originan mayor grado de contaminación. En condiciones normales de cultivo, los compuestos nitrogenados, tanto orgánicos como inorgánicos, evolucionan rápidamente a nitratos, que no son adsorbidos por el suelo y pueden, por tanto, ser lixiviados por el agua de drenaje. El amonio es retenido por el complejo adsorbente del suelo, por lo que su presencia en las aguas subterráneas es mínima (menos de 1 por 100 del nitrógeno total lixiviado).

Se ha comprobado que la mayor parte del nitrógeno contenido en las aguas superficiales y subterráneas procede de la descomposición de la materia orgánica del suelo, sobre todo cuando ese proceso ocurre durante el otoño. El abonado nitrogenado aplicado en forma de fertilizantes químicos no es la causa de la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas (salvo en el caso de regadíos intensivos), ya que aplicado en dosis habituales es absorbido por las plantas o se pierde en la atmósfera bajo formas gaseosas.

En algunas zonas se ha detectado un incremento alarmante de nitratos en las aguas subterráneas, sobrepasando los límites máximos establecidos por la CEE para aguas potables. El consumo de estas aguas puede tener efectos nocivos para la salud, sobre todo en el caso de niños lactantes.

La mayor concentración de nitratos ocurre en la parte

superior de la zona saturada, por lo que la profundidad de la captación influye en la concentración de contaminante. Cuando la zona saturada tiene poco espesor, el contaminante se distribuye, al cabo de más o menos tiempo, por todo el acuífero.

Los fertilizantes fosfatados y potásicos no suelen acarrear problemas de contaminación en el agua subterránea, ya que los iones correspondientes son retenidos por el complejo adsorbente del suelo y hay, por tanto, poca lixiviación por las aguas de lluvia o de riego.

- *Aplicación de productos fitosanitarios.* Los productos fitosanitarios aplicados al suelo o a las plantas son contaminantes en cuanto que pueden ser lixiviados por el agua de drenaje. El grado de contaminación viene en función de varios factores: toxicidad, persistencia en el suelo, grado de solubilidad, concentración del producto, etc.

En general, los productos organoclorados son los que constituyen mayor riesgo, por su elevada persistencia y toxicidad; la baja solubilidad y el elevado grado de adsorción por el suelo limitan ese riesgo. Los pesticidas organofosforados se degradan con facilidad y son fuertemente adsorbidos por el suelo, por lo que representan un riesgo menor que los anteriores. Los herbicidas a base de ácidos fenoxialquílicos son poco tóxicos, pero comunican mal sabor y olor. Los herbicidas a base de nitrofenol son muy tóxicos y muy solubles, por lo que alcanzan con facilidad al acuífero.

- *Riego.* Las plantas absorben únicamente una mínima parte de las sales aportadas por el agua de riego, por lo que dichas sales son lixiviadas, en última instancia, por el agua de drenaje, pasando a formar parte del agua subterránea. La cantidad de sales que pasan al acuífero por este concepto viene en función de varios factores: calidad del agua, dosis de riego, contenido de sales del suelo, etc. El riesgo de aumento de salinización se incrementa con la reutilización, aguas abajo, del agua de riego sobrante.

En zonas de regadío intensivo es frecuente la contamina-



ción por nitratos, especialmente cuando se utilizan sistemas de riego con poca eficiencia (riego por gravedad).

- *Vertido de estiércol y purines.* El estiércol sólido o fluido y los purines líquidos procedentes de la actividad ganadera son una fuente importante de nitrógeno y, por consiguiente, de nitratos, que pueden contaminar las aguas subterráneas cuando se incorporan al suelo con el riego en zonas inadecuadas desde el punto de vista hidrogeológico. Los lixiviados procedentes de la actividad ganadera intensiva suelen tener altas concentraciones de gérmenes patógenos.

El riesgo de contaminación causado por la ganadería extensiva es escaso, ya que los residuos se dispersan por un área extensa, lo que favorece su autodepuración en el suelo.

3. Contaminación por actividades industriales y mineras

La contaminación producida por actividades industriales es tan variada como el tipo de industria que la origina. La contaminación ocasionada por actividades mineras se produce, sobre todo, por las evacuaciones de los lavaderos de mineral y por la lixiviación que provoca el agua de lluvia en las escombreras.

Los residuos industriales sólidos se eliminan por medio de escombreras y vertederos, mientras que los líquidos se vierten, generalmente, en cauces superficiales, en excavaciones o en acuíferos salinos o secos. El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas aumenta cuando estos vertidos se hacen en emplazamientos inadecuados desde el punto de vista hidrogeológico o se llevan a cabo sin ningún control. Mención especial merecen los residuos radiactivos, que exigen un emplazamiento con unas condiciones muy estrictas debido a su peligrosidad y persistencia.

4. Contaminación por intrusión marina

En los acuíferos costeros, el agua salada se introduce, como si fuera una cuña, por debajo del agua dulce, debido a la mayor densidad de aquélla. En la separación entre el agua salada y el

agua dulce se forma una *interfase* o zona en donde el agua tiene una salinidad intermedia. Cuando existe equilibrio natural, el agua marina permanece estacionaria, mientras que el agua dulce, alimentada por corrientes subterráneas, fluye hacia el mar (Fig. 19).

Cuando se produce un bombeo intenso de agua dulce, el flujo de ésta hacia el mar disminuye, lo que provoca un avance hacia tierra adentro de la cuña de agua salada, a la vez que se eleva el nivel de la interfase. Si el bombeo es excesivo continúa el ascenso de la interfase, llegándose a captar agua salobre en las captaciones. En casos extremos cesa el flujo de agua dulce hacia el mar y el agua salada tiende a rellenar todo el acuífero.

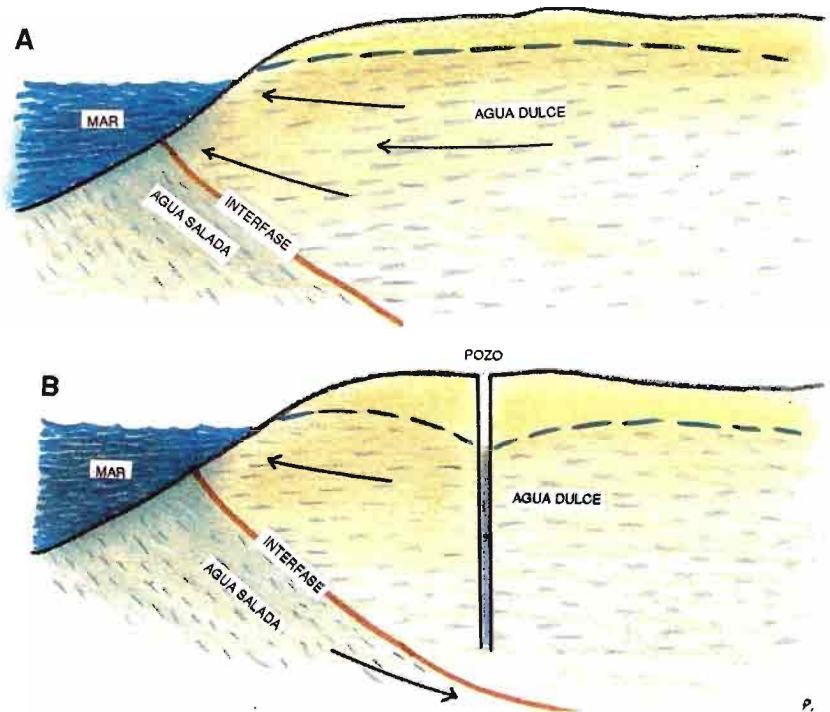


Fig. 19.-Contaminación por intrusión del agua del mar. A) El agua dulce fluye hacia el mar. B) El bombeo excesivo provoca una intrusión del agua salada en la zona de agua dulce. La zona de interfase agua salada-agua dulce se introduce tierra adentro.



La salinización de los acuíferos costeros se evita llevando un control de los mismos para no permitir la intrusión del agua marina más allá de lo permisible.

Lucha contra la contaminación

Los *métodos preventivos* de lucha son aquellos que tienen por finalidad evitar que se produzca la contaminación. Los *métodos curativos* son los que se aplican cuando la contaminación ya se ha producido.

Las condiciones en que fluye el agua subterránea, especialmente la contenida en un medio poroso, confieren a la contaminación de estas aguas unas características distintas a las de las aguas superficiales. En general, las aguas subterráneas están mejor protegidas que las superficiales, salvo que el contaminante se aplique directamente a la zona saturada del acuífero. Una vez que se ha producido la contaminación, resulta difícil detectarla a tiempo y conocer su evolución. De todo ello se deduce que los métodos preventivos son mucho más eficaces que los curativos.

Las actuaciones más destacadas de los métodos preventivos son las siguientes:

- Establecer perímetros de protección prohibiendo o limitando ciertas actividades en las zonas de recarga de los acuíferos y en las proximidades de las captaciones.
- Emplazar adecuadamente los vertederos y desagües de afluentes líquidos.
- Controlar los vertederos y lugares de almacenamiento y conducción de residuos contaminantes.
- Depuración natural de contaminantes líquidos mediante vertido a zonas de suficiente poder autodepurador, o depuración artificial en plantas de tratamiento.
- Racionalizar la fertilización nitrogenada y el drenaje en zonas de regadío.
- Controlar la inyección directa de aguas residuales en pozos y sondeos.

-
- Controlar el bombeo en sondeos próximos al litoral, para evitar la intrusión del agua marina en el acuífero.

En cuanto a los métodos curativos, cabe destacar las siguientes actuaciones:

- Formar barreras de presión o depresión que modifican el flujo del agua subterránea. Para ello se bombea agua de pozos abiertos entre el foco contaminante y las captaciones a proteger.
- Formar barreras subterráneas impermeables entre la zona contaminante y el acuífero.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Cursillo de hidrología para Agentes de Extensión Agraria. B. Martí, A. Núñez, A. Ballester.

Aguas subterráneas. A. Murcia Viudas. Ed. Ministerio de Agricultura. *Hidrología subterránea.* E. Custodio, M. R. Llamas. Ed. Omega.

La captación de aguas subterráneas. J. Pimienta. Ed. Editores Técnicos Asociados.

Captación de aguas subterráneas para riego. D. Rincón Agudo. Ed. Junta de Castilla y León.

Las aguas subterráneas en Aragón. J. Fernández Moreno. Surcos núms. 25 y 26.

Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en España. Ed. Instituto Geológico Minero.



MINISTERIO DE AGRICULTURA PESCA Y ALIMENTACION

INSTITUTO NACIONAL DE REFORMA Y DESARROLLO AGRARIO

DIRECCION GENERAL DE INFRAESTRUCTURAS Y COOPERACION

Corazón de María, 8¹ 28002-Madrid