

Contaminación de las aguas subterráneas

1. Introducción

Recientemente gran parte de la investigación hidrogeológica se ha centrado en los problemas de la calidad del agua subterránea. Los objetivos pueden ser variados: encontrar agua subterránea de calidad aceptable, estudiar cómo la calidad del agua subterránea se ha visto afectada por actividades humanas, adoptar las medidas previas para que estos problemas no lleguen a producirse, predecir la evolución de un problema de contaminación si ya se ha producido, intentar remedirlo, etc...

La mala calidad del agua subterránea puede ser debida a **causas naturales** o a la **actividad humana**. En general, al hablar de *contaminación* nos referiremos a esta última, por ejemplo, un vertido industrial, aunque en muchas ocasiones la mala calidad del agua sea debida a causas naturales, y también se utilice el término *agua contaminada*. En muchas ocasiones, la distinción de si la causa es natural o antrópica no es fácil, pues una actividad humana no contaminante (en general, los bombeos) altera un equilibrio previo, provocando el deterioro de la calidad del agua subterránea.

Hay grandes **diferencias entre la contaminación de las aguas superficiales y de las aguas subterráneas** que hacen que la de éstas últimas sea más grave:

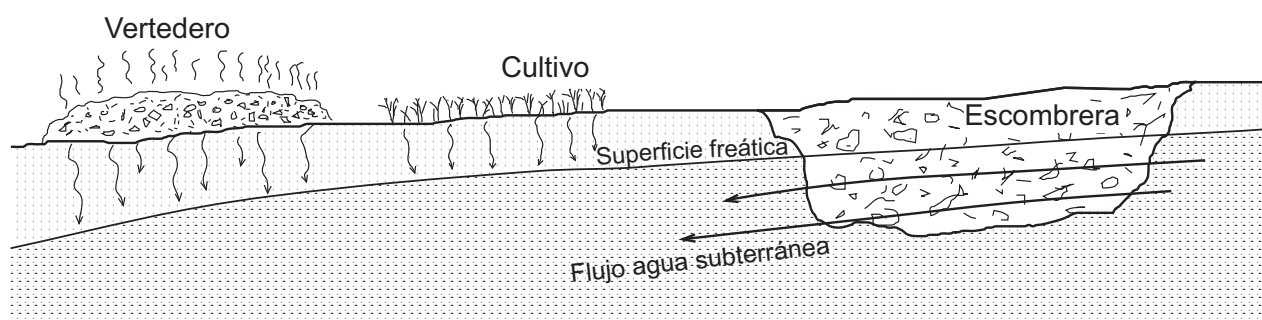
(1) En la **detección**: En aguas superficiales la contaminación es perceptible de inmediato, con lo que las posibles medidas de corrección pueden ponerse en marcha inmediatamente. En las aguas subterráneas, cuando se detecta el problema, pueden haber transcurrido meses o años.

(2) En la **solución**: Las aguas de un río se renuevan con la rapidez de su flujo, de modo que, anulado el origen de la polución, en un plazo breve la calidad del agua vuelve a la normalidad. En los acuíferos, como su flujo es tan lento y los volúmenes tan grandes, se necesita mucho tiempo para que se renueve varias veces todo el agua contenida en él, e incluso entonces el problema persiste por las sustancias que quedaron adsorbidas en el acuífero. La descontaminación de acuíferos por medios artificiales es muy costosa y normalmente sólo es aplicable en acuíferos superficiales y no muy extensos.

2. Modos de contaminación

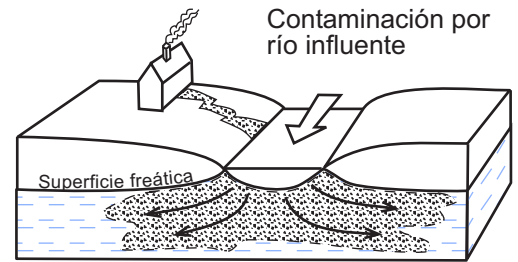
Las aguas subterráneas no están directamente expuestas a los efectos de las actividades humanas, desarrolladas normalmente en superficie. No obstante, las sustancias contaminantes llegan a los acuíferos de diversos modos:

- *Infiltración* de sustancias depositadas en superficie, o de la lluvia a través de ellas.
- Filtración de *sustancias almacenadas bajo tierra*, o disolución de ellas por el flujo natural del agua subterránea.

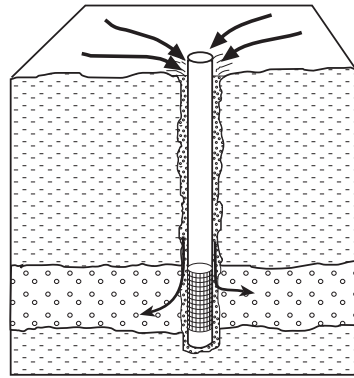


- Filtración desde un *río influente*
- *Derrames o rezumes accidentales* de depósitos o conducciones, superficiales o enterrados.

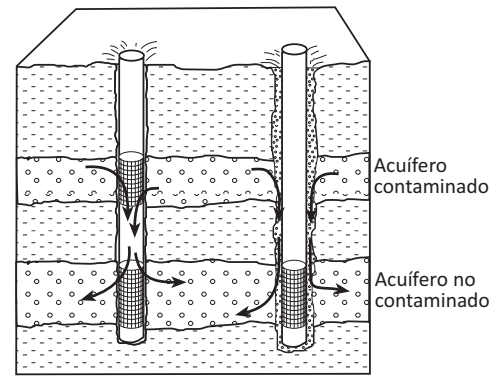
- Desde la superficie a través de captaciones abandonadas o mal construidas.
- Desde otro acuífero, a través de captaciones que comuniquen ambos acuíferos. Aunque no se haya colocado rejilla en el acuífero contaminado la comunicación aún puede producirse a través del empaque de gravas.
- Inyección en pozos. En ocasiones ocultamente, otras veces tras un minucioso estudio técnico.



A través de alguna de estas vías los contaminantes alcanzan en la mayoría de los casos la superficie freática más superficial, y posteriormente se expanden y difunden, siendo transportados por el flujo subterráneo.



Contaminación desde la superficie



Contaminación de un acuífero a otro

3. Actividades contaminantes

Las principales actividades humanas que generan contaminación de las aguas subterráneas se pueden englobar en los siguientes grupos:

a. Residuos sólidos urbanos.

Normalmente depositados en superficie, alcanzan la superficie freática los líquidos procedentes de los propios residuos o el agua de lluvia infiltrada a través de ellos, que arrastra todo tipo de contaminantes orgánicos e inorgánicos.

b. Aguas residuales

Las aguas residuales de los núcleos urbanos se vierten a cauces superficiales o en fosas sépticas. En ocasiones, tras una ligera depuración, se esparcen en superficie para aprovechar el poder filtrante del suelo ("filtro verde"). Los lodos resultantes de la depuración pueden representar después una segunda fase del mismo problema.

Aportan diversas sustancias contaminantes: Detergentes, Nitratos, Bacterias y virus, materia orgánica disuelta.

c. Actividades agrícolas

Muy difíciles de controlar al tratarse de contaminación difusa sobre grandes extensiones

- *Fertilizantes*: Aportan al agua compuestos de N, P y K. En algunos casos, se ha calculado que hasta el 50 % de los nitratos usados como fertilizantes llega al acuífero por infiltración.

- *Plaguicidas*: Bajo esta denominación genérica se incluyen insecticidas, fungicidas, acaricidas, nematocidas, rodenticidas, bactericidas, molusquicidas, herbicidas. Se han estudiado los distintos coeficientes de absorción, de degradación y la vida media de diversos pesticidas orgánicos. La persistencia oscila de una semana a varios años.

En ocasiones, las **sustancias resultantes de la degradación** del producto (*metabolitos*) son más peligrosas (más persistentes o más tóxicas) que el producto original. En otras ocasiones son las

impurezas que acompañan a los productos comerciales, y que escapan a los análisis de control, por no figurar en la composición del producto, las verdaderamente tóxicas.

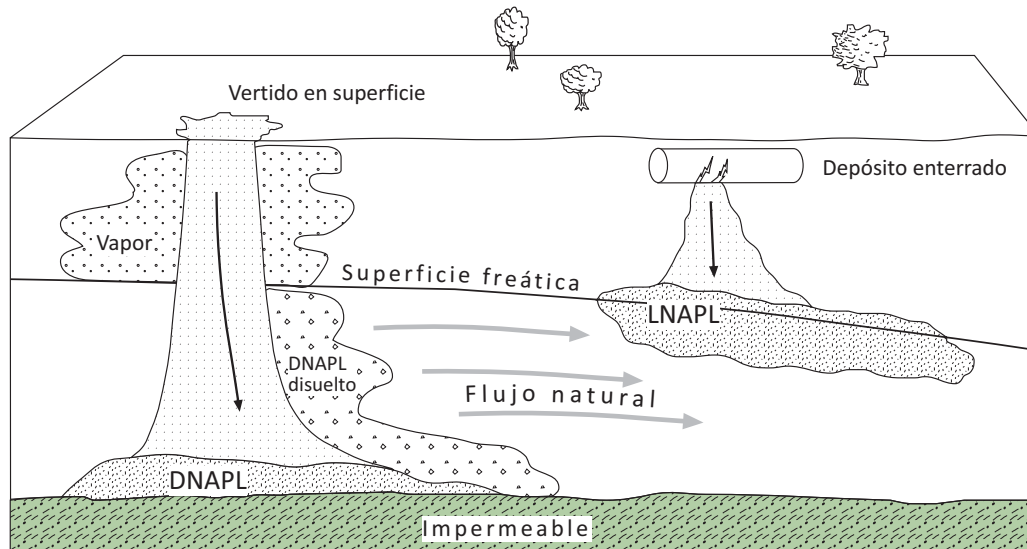
d. Ganadería

De los residuos de los animales proceden compuestos nitrogenados, fosfatos, bacterias, cloruros, y, en algunos casos, metales pesados. Normalmente no ocasionan problemas importantes, salvo en el caso de *grandes instalaciones*.. Resultan especialmente graves las granjas porcinas (los residuos líquidos se denominan *purines*).

e. Actividades industriales y mineras

Las vías de contaminación y las sustancias contaminantes son tan variables como los tipos de industrias. Pueden generar efluentes como las grasas de los mataderos o cualquier producto químico líquido. Cuando los residuos son sólidos, la principal fuente de contaminación será la lluvia infiltrada a través de la escombrera, que disolverá sustancias contaminantes para alcanzar finalmente el acuífero subyacente. Los casos más graves están relacionados con accidentes en balsas o estanques donde se depositaban los líquidos tóxicos.

En el caso de las **minas**, puede producirse por las labores de tratamiento del mineral o por la infiltración de la lluvia a través de escombreras.



Contaminación por líquidos no acuosos más o menos densos que el agua (Modif. de Fetter, 1999)

Mención especial merecen los **derivados del petróleo**. Estas sustancias llegan a la superficie freática por infiltración desde vertidos accidentales o por roturas de depósitos o conducciones. Algunos son menos densos que el agua (LNAPL)¹, con lo que se mantienen en la superficie del acuífero libre superficial, sólo una parte se disuelve. Otros hidrocarburos son más densos que el agua (DNAPL) y acaban en la parte baja del acuífero, aunque una parte puede disolverse.

f. Actividades nucleares

Podríamos incluirlas en el epígrafe anterior, aunque presentan unas características diferenciadoras.

En las **actividades mineras** correspondientes, se generan grandes volúmenes de roca, de los que ya ha sido extraído el mineral aprovechable, pero que constituyen residuos de baja actividad.

Los procesos de **refinado del mineral** generan subproductos sólidos y semisólidos con pequeñas concentraciones de diversos isótopos, de los que el más preocupante es el ²²⁶Ra.

Finalmente en los **reactores nucleares** u otras industrias que utilicen combustible nuclear se producen residuos de baja actividad y combustible usado, que son residuos de alta actividad, cuyo

¹ DNAPL: Dense Non-Aqueous Phase Liquid. LNAPL: Light Non-Aqueous Phase Liquid

almacenamiento debe ser especialmente cuidadoso en lugares donde no exista flujo de agua subterránea: Formaciones salinas profundas, rocas ígneas, formaciones arcillosas o zonas no saturadas (sin agua subterránea) en regiones áridas.

4. Prevención y control

a. Control en los posibles orígenes de la contaminación

La corrección de los problemas de contaminación en el caso de las aguas subterráneas es prácticamente imposible en la mayoría de los casos, por lo que hay que poner especial énfasis en que no llegue a producirse. Las medidas de prevención son generalmente obvias:

- *Basureros o escombreras*: Buscar lugares impermeables, o recoger los efluentes con sondeos o drenes.
- *Aguas residuales urbanas*: Depuración previa a los vertidos; precaución con la utilización de los lodos de depuración. Correcta construcción y vigilancia de conducciones y fosas sépticas.
- *Fertilizantes y plaguicidas*: Utilización racional y medida de estas sustancias.
- En *actividades industriales* de todo tipo: Estudio hidrogeológico previo de las permeabilidades y del sistema regional del flujo subterráneo. Especial precaución en el *almacenamiento bajo tierra* de residuos peligrosos.

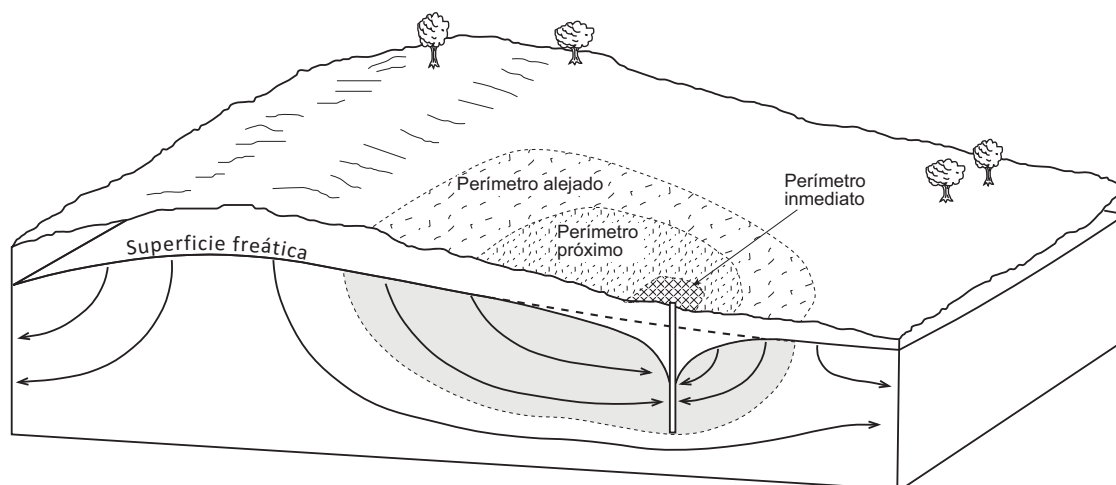
b. Control regional y en las captaciones

Debe existir una **red regional de control** periódico de calidad del agua subterránea, con especial atención a las áreas con captaciones para abastecimiento.

Perímetros de protección alrededor de las captaciones para abastecimiento (Martínez y García, 2003).

- Un perímetro *inmediato*, en terrenos de la misma propiedad de la captación, con vigilancia absoluta.
- Un perímetro *cercano* (del orden de cientos de metros), en el que se deben reglamentar las actividades que puedan afectar a la calidad de las aguas subterráneas.
- Un perímetro *lejano* que englobe las áreas de recarga del flujo subterráneo captado; en ocasiones puede ser de varios kilómetros y si no es posible la prohibición de ciertas actividades, sí se debe extremar la vigilancia y el control.

Construcción correcta de captaciones en general: Sellado en superficie, entubación ciega y/o sellado en los niveles acuíferos de mala calidad. Atención a los pozos abandonados



Perímetros de protección alrededor de una captación para consumo (A partir de Martínez y García, 2003)

5. Reacción de los acuíferos ante la contaminación

La reacción de los acuíferos ante la contaminación que reciben puede ser efectiva al principio, pero no es indefinida, y en muchas ocasiones es reversible: las sustancias precipitadas o retenidas son después disueltas de nuevo o liberadas.

a. Dilución

La dilución del relativamente pequeño volumen de contaminante en el enorme volumen del acuífero generalmente no soluciona el problema. A escala local, las concentraciones seguirán siendo un problema

b. Filtración mecánica

En materiales granulares finos pueden retenerse partículas en suspensión y microorganismos. En arenas gruesas, gravas o acuíferos fracturados, es casi inexistente. Además, la capacidad de cualquier filtro es limitada.

c. Precipitación

Pueden precipitar diversas sustancias según los cambios en el pH o el potencial redox del medio. Al igual que la filtración, puede disminuir fuertemente la permeabilidad del medio.

d. Procesos de oxidación reducción

Evolución de los compuestos nitrogenados. En la zona no saturada, el agua no contaminada es oxidante, transformando compuestos de N en NO_3^- (*nitrificación*), lo que es bueno para las plantas que pueden tomar el Nitrógeno que necesitan. Pero el exceso de nitratos que no toman las plantas, pasa a contaminar el agua, llega a los acuíferos donde las concentraciones de NO_3^- suben incesantemente.

Ya en el acuífero, el agua ha perdido gran parte de su carácter oxidante, pero si encuentra sustancias reductoras (en general, materia orgánica), el nitrato, NO_3^- actúan como oxidante, reduciéndose por dos posibles vías. En un caso se produce la *desnitrificación* (NO_3^- pasa a N_2O y a N_2), lo que es conveniente, puesto que son gases inocuos. Existe otra vía de reducción de los nitratos, que por razones bioquímicas (el proceso está regido por la actividad bacteriana) se da en menor proporción, en la que los nitratos NO_3^- se reducen a nitritos NO_2^- , lo que no es bueno: en la normativa española se admite hasta 50 mg/L de NO_3^- y solamente 0,1 mg/L de NO_2^- .

Otra implicación importante de los procesos de oxidación reducción en la calidad del agua subterránea es la reducción de sulfatos a sulfuros. El sulfato, SO_4^{2-} pasa a SH_2 (o $\text{SH}^- + \text{H}^+$). Este proceso confiere al agua un olor característico desagradable. Este proceso no es muy común, pues requiere unas condiciones más reductoras que los procesos anteriores de reducción de Nitratos.

En el caso de la reducción del sulfato, SO_4^{2-} a SH_2 al agua adquiere un olor que la hace inutilizable para el consumo.

e. Adsorción

Diversas partículas quedan adsorbidas (adheridas electrostáticamente a las partículas del terreno), especialmente en las arcillas. En éstas puede producirse un intercambio iónico: otros iones o moléculas sustituyen a Ca^{++} y Mg^{++} que estaban previamente adsorbidos en las arcillas

La capacidad de retención por este concepto tiene un límite, de modo que si la sustancia no se descompone, el terreno agotará su capacidad de retención. En ocasiones es solo una adsorción temporal, pero supone un mayor tiempo de permanencia del contaminante lo que proporciona mayor plazo de actuación a otros procesos.

f. Desintegración o descomposición

Los *elementos radiactivos* y algunos productos químicos, como los *pesticidas*, desaparecen con el paso del tiempo, se habla de desintegración radiactiva o de descomposición, en el caso de los

pesticidas. En ambos, el factor crucial es la *vida media* (tiempo en el que la concentración de la sustancia se reduce a la mitad). Esto será efectivo en elementos cuya vida media sea corta en relación con el tiempo de tránsito del agua en el acuífero. La vida media de algunos pesticidas es de unos pocos días, mientras que la de ciertos elementos radiactivos es de miles de años.

6. Medidas correctoras

Cuando la contaminación se ha producido y alcanzado gran extensión, la regeneración es inviable, técnica o económicamente. Las medidas, muy costosas, que en algunos casos pueden ser de alguna utilidad son de dos tipos:

a. Actuaciones en el origen de la contaminación:

- Remoción de tierras o residuos en superficie.
- Aislamiento de los residuos, con impermeabilizaciones verticales o bajo ellos.
- Si la superficie freática alcanza los residuos, hacerla descender, con barreras o bombeos.
- Controlar o desviar la escorrentía superficial.

b. Actuaciones en el acuífero

- Bombeo de la superficie del acuífero en el caso de productos petrolíferos, no miscibles, que por su menor densidad flotan sobre la superficie freática.
- Bombeo intenso del acuífero contaminado, a veces con caudal intermitente o variable para un mejor rendimiento. Eventualmente, inyección simultánea de agua limpia.
- Flujo forzado de aire o de vapor para volatilizar los contaminantes, normalmente en la zona no saturada.
- Construcción de barreras impermeables o filtrantes (con alguna sustancia que retenga o actúe sobre el contaminante) en acuíferos poco profundos.

En varios de estos procesos se utilizan las bacterias para degradar los contaminantes orgánicos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahuja, S. (2008).- *Arsenic Contamination of Groundwater: Mechanism, Analysis, and Remediation*. Wiley, 404 pp.
- Deutsch, W.J. (1997).- *Groundwater Geochemistry: Fundamentals and Applications to Contamination*, CRC Press, 221 pp.
- Fetter, C. W. (1999).- *Contaminant Hydrogeology*. Prentice-Hall, 2ª edición, 500 pp. (Reimpresión: Waveland Press, 2008)
- Martínez, C. y A. García (2003).- *Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio*. Instituto Geológico y Minero de España, 273 pp.
- Ongley, E.D. (1997).- *Lucha Contra la Contaminación Agrícola de los Recursos Hídricos*. Estudio FAO Riego y Drenaje - 55 . <http://www.fao.org/docrep/W2598S/W2598S00.htm>
- Smith, P. y J. G. Scott (2005).- *Dictionary of Water and Waste Management*, Elsevier, 480 pp.