

CONTAMINACIÓN DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS: TIPO DOMÉSTICO E INDUSTRIAL

L. Candela Lledó

Dep. de Ingeniería del Terreno y Geociencias-UPC

RESUMEN

Si bien los posibles orígenes de la contaminación de las aguas subterráneas son muy variados, se puede llegar a establecer una clasificación en función de la actividad que los origina. Entre dichas actividades cabe destacar las de tipo doméstico e industrial. La contaminación de tipo doméstico se produce principalmente a través de fosas sépticas, pozos negros, fugas de alcantarillado, vertido de aguas de letrinas, entre otros. En general se trata de una contaminación de tipo orgánica y biológica, en la que también están presentes detergentes y además productos farmacéuticos y de higiene personal (*PPCPs*), que incluyen a las medicinas, productos para diagnóstico médico, fragancias y cremas protectoras solares. La contaminación industrial es tan diversa como las actividades que la pueden originar y puede producirse durante el proceso de producción, almacenado o transporte. La contaminación puede deberse a la presencia de compuestos inorgánicos (metales y no metales), orgánicos (plaguicidas, derivados del petróleo, productos de tintorería) y en menor medida radiactivos

Palabras clave: *aguas subterráneas, contaminación industrial, contaminación doméstica*

INTRODUCCIÓN

El problema de la contaminación de las aguas subterráneas no es algo nuevo en la literatura. Posiblemente, la referencia más antigua es el trabajo clásico del Dr. John Snow, que en 1854 relacionó las más de 500 muertes producidas por cólera en el distrito del Soho Londinense como consecuencia de la contaminación producida en un solo pozo (Stamp, 1964). Sin embargo, es a partir de los años 80 cuando se empieza a considerar la contaminación de las aguas subterráneas como un problema real y de cierta magnitud.

Los factores que han contribuido a la dificultad en el conocimiento de los acuíferos contaminados incluyen los siguientes aspectos: la variada toxicidad de los contaminantes; las diversas formas en las que se produce la contaminación; el complejo comportamiento de los contaminantes en suelo, agua y medio rocoso; la diversidad de condiciones hidrogeológicas existentes y sus variaciones a lo largo del tiempo y el lento transporte a través del medio poroso. Además se debe añadir el que muchos contaminantes sean incoloros, inodoros e insípidos y en consecuencia, difícilmente detectables.

Por otro lado, la detección de muchos compuestos químicos, en especial los de tipo orgánico, requiere de técnicas de analíticas muy sofisticados, por lo que su muestreo sistemático se hace inviable o prohibitivo desde el punto de vista económico. El análisis, extensión y severidad de la contaminación está limita-

do por el ingente crecimiento de compuestos procedentes de la industria química orgánica. Se estima que anualmente entre 500 y 1000 nuevos compuestos aparecen en el mercado, que dan lugar a miles de compuestos comerciales.

Es difícil el poder realizar un análisis exhaustivo sobre los tipos de contaminantes más frecuentes en los acuíferos. A partir de la bibliografía existente se conoce que el número total de sustancias químicas detectadas en las aguas subterráneas es del orden de 200. Se incluyen en el total unos 175 compuestos orgánicos, 50 inorgánicos (metales, no metales y ácidos inorgánicos), elementos radiactivos y microorganismos. Algunos de ellos aparecen de forma natural en las aguas pero un gran porcentaje son de origen antrópico. Resultados procedentes de Estados Unidos, a partir del muestreo de unos 1000 pozos de Nueva Jersey en los que se analizaron 56 sustancias tóxicas (9 metales pesados y 47 compuestos orgánicos), dieron los siguientes resultados (Page, 1981): el 50% de los pozos presentaron concentraciones detectables de 1.1.1-tricloroetano, cloroformo y tetracloruro de carbono. Otros 20 compuestos orgánicos adicionales se detectaron entre el 10 y el 50% de las muestras. Además, alguno de los compuestos seleccionados aparecieron en concentraciones detectables en uno de cada dos pozos muestreados, concluyendo el estudio que las aguas subterráneas estaban casi tan contaminadas como las superficiales.

Por lo que respecta a la situación de la contaminación de acuíferos en nuestro país, dada la dificultad de reflejar todos los datos existentes, se remite al lector en especial a las publicaciones de las diversas jornadas sobre contaminación de acuíferos organizadas por la AIH en España en 1981, 1984 y 1998.

FUENTES DE CONTAMINACIÓN

Los posibles focos que pueden dar lugar a la contaminación de los acuíferos son muy variados y pueden clasificarse según su origen (doméstico, agrícola, industrial, etc.) o de acuerdo con las fuentes potenciales de contaminación (Custodio y Llamas, 1983). Mientras que la primera clasificación se centra en el tipo de contaminantes, la segunda se refiere a la naturaleza de la actividad que puede originar la contaminación.

Así, independientemente del tipo de contaminante, las actividades que pueden dar origen a contaminación se suelen clasificar en 6 categorías (OTA, 1984; Fetter, 1999)

- I- Introducción de sustancias en el terreno (fosas sépticas, pozos de inyección, aplicación sobre el terreno)
- II- Actividades diseñadas para almacenar, tratar o verter sustancias (vertederos controlados o incontrolados, contenedores, tanques de almacenamiento)
- III- Transporte de sustancias (tuberías, operaciones de transporte)
- IV- Descarga de sustancias como consecuencia de actividades planificadas (regadío, fertilización, drenaje de minas, escorrentía urbana)
- V- Contaminación inducida por modificación del sistema de flujo natural (pozos de producción, excavaciones)

VI- Producidas por actividades antrópicas (interacción agua superficial-subterránea, intrusión marina, lixiviado natural)

Dado que el objeto de este artículo es una presentación sucinta de la contaminación de origen doméstico e industrial, las fuentes que pueden originar la contaminación se asocian mayoritariamente a las debidas a vertido directo (I), almacenar, tratar o eliminar sustancias (II) y a la procedente del transporte de sustancias (III).

CONTAMINACIÓN DE ORIGEN DOMÉSTICO

Si se atiende a los contaminantes asociados, se puede decir que es esencialmente de tipo orgánica y biológica, cuyo origen es debido a la existencia de fosas sépticas, pozos negros, alcantarillado, y vertederos, entre otros. Además de los anteriores contaminantes se debe añadir la presencia de productos químicos de tipo doméstico (detergentes, plaguicidas) y los denominados productos farmacéuticos y de uso personal (PPCPs). Estos últimos (Daughton, 2001), constituyen un grupo específico de contaminantes cuya presencia en las aguas subterráneas se ha detectado especialmente en algunos países europeos, y que constituyen una nueva amenaza a las aguas subterráneas (Eckel *et al.*, 1993; Heberer *et al.*, 1998; Holm *et al.*, 1995; Seiler *et al.*, 1999).

Los vertederos urbanos suelen estar formados por desechos de papel, vidrio, metal, madera, etc., siendo su composición 55-65% doméstico y 35-45% comercial. Se supone que los vertederos controlados no contaminan, sin embargo, en los no controlados pueden llegar a depositarse de forma esporádica y furtiva, materiales tóxicos y peligrosos altamente contaminantes. La contaminación procedente de esta actividad, en el caso de producirse y llegar a afectar a los acuíferos, se caracteriza por la elevada concentración del lixiviado en TSD, DQO y dureza. En algunos casos se ha detectado la presencia de metales pesados (Hg, Cr, Ni, Pb, Al, Cd, Zn), pinturas, amalgamas dentales, etc. debido a vertidos no controlados.

Por lo que respecta a las fosas sépticas, si bien el fundamento en el que se basa su instalación es la capacidad depuradora del suelo para degradar las aguas negras, en el caso del alcantarillado, su efecto contaminador es debido a las fugas de agua en tuberías o accidentes. La proporción en la que interviene el distinto origen del agua se distribuye en un 40% procedente del WC; 30% del aseo personal; 15% de lavadoras y 10% de cocinas. Por lo que respecta a las fosas sépticas y alcantarillado, los contaminantes presentes se caracterizan por su composición orgánica. En las aguas procedentes del alcantarillado (agua residual urbana, tabla 1) se detecta la presencia de bacterias (*E. Coli*, *Clostridium*, *Salmonella*, *Trichomonas*), componentes orgánicos (detergentes, plaguicidas, disolventes, aceites y PPCPs) e inorgánicos (N, P, Cu, Pb, Fe, Zn, Mn).

La contaminación de las aguas subterráneas causada por esta actividad es fundamentalmente fecal, por lo que es frecuente la presencia de *E. Coli* y *Pseudomonas aeruginosa*, además de nitratos, incremento en el contenido de sales totales y cloruros. La presencia de nitratos suele aparecer cuando las aguas negras descargan directamente sobre la zona no saturada y se origina un ambiente oxidante. Si las condiciones son anaerobias o se realiza una descarga directa sobre el acuífero, se produce una disminución del contenido en nitratos junto con presencia de Fe^{2+} disuelto (Blarasin *et al.*, 2001).

| | mg/l |
|------------------|----------|
| Sólidos totales | 350-1200 |
| DBO | 110-400 |
| DQO | 250-1000 |
| TOC | 80-290 |
| Nitrógeno total | 20-85 |
| Orgánico | 5-35 |
| NH ₄ | 12-50 |
| Fósforo total | 4-15 |
| Aceites y grasas | 50-150 |
| Cloruros | 30-100 |

Tabla 1. Valores típicos de un agua residual urbana bruta (Mujeriego, 1990).

Productos farmacéuticos y de uso personal (PPCPS)

Recientemente y como respuesta a la gran reutilización de aguas residuales urbanas procedentes de las EDAR en agricultura, se viene demostrando un creciente interés por la presencia de los denominados productos farmacéuticos y de uso personal (*PPCPs*) en las aguas subterráneas y superficiales (Sedlak *et al.*, 2000).

Los denominados *PPCPs* constituyen un grupo muy complejo de compuestos químicos entre los que se incluyen medicinas, productos para diagnóstico (material para RX), fragancias y protectores solares. Aunque en su mayoría son compuestos orgánicos, la diferencia respecto a los agroquímicos es el presentar múltiples grupos funcionales. Este hecho complica grandemente su transporte y degradación, así como las técnicas analíticas que deben utilizarse para su monitoreo.

La mayoría del los *PPCPs* no son ni acumulativos ni volátiles, aunque los perfumes son tóxicos, bioacumulativos, persistentes y volátiles. Los efectos que pueden llegar a producir en el hombre y en la biota son desconocidos y al ser introducidos de una forma continuada en el medio se convierten en contaminantes persistentes, incluso si su semi-vida es corta.

El origen en el medio ambiente es diverso (Daughton, 2001). El mayor porcentaje procede de las medicinas que son excretadas a través de la orina y heces y que se incorporan a las aguas procedentes de los hospitales y domicilios (hecho que también ha planteado la utilización del los *PPCPs* como trazadores o indicadores de la procedencia de las aguas). En otras ocasiones, se origina a partir de lixiviado de vertederos, escorrentía en zonas de animales estabulados, descarga directa de aguas negras debido a tormentas e incluso a partir de la producción de proteínas por plantas modificadas genéticamente (conocido como biofarming).

En la actualidad se han identificado más de 50 compuestos individuales, además de esteroides y productos antimicrobianos en aguas de Estados Unidos (Tabla 2) y algunos países europeos. Si se considera que el número de compuestos aptos de ser clasificados como *PPCPs* y habitualmente más utilizados suele ser de unos 200, resta todavía una gran labor de investigación por realizar (Tabla 3).

| USO TERAPEÚTICO | COMPUESTO GENÉRICO | NOMBRE COMERCIAL |
|-------------------------------|---|---|
| analgésicos/antiinflamatorios | acetaminofen, diclofenac, ibuprofen, ketoprofen, naproxen | Tylenol, Voltaren, Advil, Oruvail, Naprosin |
| antimicrobianos | sulfonamidas, fluoroquinolonas | Diversos |
| antiepilépticos | carbamazepina | Tegretal |
| antihipertensos | bisoprolol, metoprolol | Concor, Lopresor |
| antineoplásicos | ciclofosfamida, ifosfamida | Cyclobastin, Holoxan |
| antisépticos | triclosan | Igrasan DP 300, dentífricos |
| anticonceptivos | estradiol | Oradiol |
| broncodilatadores | albuterol | Ventolin |
| reductores del colesterol | clofibrato, gemfibrozil | Atromid-S, Lopoid |
| fragancias | fragancias policíclicas | Celestolida |
| ansiolíticos | diazepan | Valium |
| pantallas solares | metibencilideno | Eusolex 6300 |
| productos RX | diatrizoato | Hypaque |

Nota: Si bien el nombre genérico es universal, los nombres comerciales corresponden a los utilizados actualmente en EEUU.

Tabla 2. Productos farmacéuticos y de uso personal encontrados en el medio acuático (Daughton, 2001)

Por lo que respecta a su uso y aplicación, la mayor parte de los PPCPs son medicinas o productos farmacéuticos, aunque algunos de ellos se suelen aplicar también al control de plagas. Por ejemplo, el 4-aminopiridina (contra la arteriosclerosis) es utilizado como avicida; el warfarin (anticoagulante) conocido como raticida y algunos antibióticos usados en cultivos hortícolas para control de patógenos (Tabla 3).

El problema derivado de la presencia de estas drogas en agua reside en que pueden llegar a producir procesos neurovegetativos, alteraciones inmunológicas y endocrinas con efecto acumulativo en el hombre. Además hay que tener en cuenta que estos efectos pueden ser mucho más graves sobre la biota, dado que el umbral de daños es inferior al requerido por los humanos.

A la posible amenaza medioambiental de estos compuestos hay que añadir la problemática que encierra su identificación analítica, específica para cada uno de ellos; desconocimiento de tipos de compuestos y cantidades utilizadas, eficiencia en la eliminación de los compuestos y las posibles interacciones entre ellos u otros compuestos químicos. Se desconoce la capacidad de las EDAR para su completa degradación, dada su complejidad.

| USO TERAPÉUTICO | NOMBRE GENÉRICO |
|----------------------------|---|
| anticoagulantes | warfarin |
| antidiabéticos | insulina, sulfonilureas |
| antihistamínicos | famotidina |
| descongestivos | efedrina |
| diuréticos | hidroclorotiazida |
| expectorantes | guaifenesina |
| agentes gastrointestinales | varios |
| vasodilatadores | lisinopril, benazepril, fosinopril, quinapril |

Tabla 3. Algunos de los PPCPs más utilizados y de los que se desconoce su presencia en el medio acuático (Daughton, 2001).

CONTAMINACIÓN INDUSTRIAL

La característica asociada a todos los procesos industriales es el ser cambiantes en función de la evolución tecnológica y económica del mercado, de las materias primas empleadas y el producto elaborado. En consecuencia, la contaminación de origen industrial es tan variada como el tipo de industrias que las puede originar, aunque son de especial interés, por su magnitud, toxicidad y el riesgo de contaminación que puedan presentar las industrias petroquímicas, minera, procesado de materiales y su manufacturado. Se debe destacar que los vertidos considerados tóxicos y peligrosos (disolventes, inflamables, corrosivos y productos químicos diversos), son objeto de tratamiento especial para evitar que contaminen el medio.

Dicha contaminación es tanto de tipo orgánico como inorgánico y puede originarse durante los procesos de producción, transporte o almacenamiento de cualquier actividad industrial. También puede producirse por vertido de aguas residuales industriales (rotura de alcantarillado o colectores), por la presencia de focos contaminantes, como vertidos, subproductos o residuos de actividades industriales, o prácticas inadecuadas conducentes a la contaminación de suelos. De acuerdo con el inventario establecido sobre emplazamientos contaminados por residuos tóxicos y peligrosos (MOPTMA, 1993) se pueden distinguir unos 4500 en España.

Una clasificación sistemática de los contaminantes de origen industrial no es factible, por el elevado número existente y sus características, como se ha mencionada anteriormente. En la Tabla 4 se muestran los resultados procedentes del muestreo de 100 zonas con vertidos industriales en Holanda, indicando los tipos de contaminación más frecuente. Sorprende la importancia de los vertidos asociados a las fábricas de gas, que proliferaron en las ciudades de Europa para producción de energía eléctrica durante el siglo pasado.

Por lo que respecta a caudales vertidos de origen industrial, los sectores representados por el textil, curtidos, químico y alimentación son los que constituyen el 67% del total. Las afecciones más frecuentes a los acuíferos por vertidos de aguas residuales industriales son las correspondientes a contaminación por cloruros, metales pesados, disolventes organohalogenados e hidrocarburos. El origen de los cloruros suele ser por rotura o fugas de colectores de salmueras producidos en explotaciones mineras, como es el caso de Suria y Cardona en Cataluña (Godé, 1998). Los metales pesados están ligados a vertidos ilegales, aunque suele ser frecuente la presencia de Fe y Mn en medios reductores. La presencia de tetracloroetileno (TCE) y tricloroetileno (TRI) es bastante frecuente al ser ampliamente utilizados como desengradantes y disolventes en múltiples procesos industriales.

| Origen de la contaminación | Tipo de contaminante | Frecuencia (%) |
|---|--|----------------|
| Fábricas de gas | Hidrocarburos aromáticos, fenoles, CN ⁻ | 45 |
| Vertidos y vertederos controlados | Hidrocarburos halogenados, Bencenos, metales (Pb, Cd, Ni), CN ⁻ y plaguicidas | 26 |
| Producción y manipulado de productos químicos | Hidrocarburos halogenados, Bencenos, metales (Pb, Cr, Zn, As) | 13 |
| Electroplatinado | TRI, TCE, benceno, tolueno, Cr, Cd, Zn, CN ⁻ | 9 |
| Manufacturado de plaguicidas | Plaguicidas, Hg, As, Cu | 4 |
| Servicios de automoción | Hidrocarburos, Pb | 3 |

Tabla 4. Clasificación y origen de la contaminación del suelo producida por vertidos en Holanda a partir de 100 puntos muestreados (Boulding, 1995).

Por lo que respecta a hidrocarburos (denominados NPALs en la literatura anglosajona), es bastante habitual la presencia de fugas causadas por corrosión de depósitos, rotura de tuberías o accidentes. La magnitud de las fugas es muy variable, desde reboses ocasionales pero constantes en el tiempo, hasta grandes volúmenes causados por vertidos accidentales. La identificación de estos compuestos no es siempre fácil, dado que el producto comercial está constituido por la mezcla de un elevado número de especies, con distinto comportamiento medioambiental. Generalmente la contaminación producida por hidrocarburos se caracteriza por la presencia de BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno) en concentraciones de ng/l, pero con frecuencia, suelen presentarse sustancias orgánicas difícilmente identificables asociadas a los diversos tipos de naftas existentes en el mercado.

Las actividades que generan compuestos peligrosos, y en muchas ocasiones vertidos intencionados en forma sólida, líquida o semisólida, son las derivadas de la industria minera, procesamiento de materiales (asbesto, fundiciones, procesamiento madera, plástico y goma; artículos de piel; electroplatinado); manufacturado (química inorgánica, textil, farmacéutica, explosivos, plaguicidas, adhesivos); detergente y jabón maquinaria y productos mecánicos (aluminio, baterías, Cu). No se debe olvidar que compuestos industriales también son generados por tintorerías, talleres mecánicos, hospitales, fotoprocesado, compañías químicas, empresas de electroplatinado y refinerías de petróleo, y que en muchos casos han originado afecciones importantes en los acuíferos.

CONSIDERACIONES FINALES

El problema originado por la contaminación de las aguas subterráneas todavía no ha recibido la consideración merecida a través de los diversos programas ministeriales. Aunque los estudios se han multiplicado en los últimos años, especialmente a través de los organismos correspondientes de investigación resta una labor muy importante por desarrollar. Por lo que respecta a la contaminación de origen doméstico e industrial, su conocimiento es totalmente inadecuado por el desconocimiento de muchas de las zonas contaminadas, especialmente de tipo industrial (antiguas fábricas de gas, depósitos de gasolina, vertederos, lagunas de vertidos). Por lo que respecta a la contaminación de origen urbano, se plantea la necesidad de investigar los efectos de los PPCPs en las aguas subterráneas, dado el incremento en el uso futuro de las aguas residuales urbanas depuradas previsto en el Plan Hidrológico Nacional tanto en agricultura como en campos de golf.

REFERENCIAS

- Blarasin, M., Cabrera, A., Bettera, S., Frigerio, C., Pagliaricci, M. 2001. Escenarios e indicadores de contaminación urbana en medio anaerobio y aerobio en el acuífero freático, Río Cuarto, Córdoba, Argentina. En: Medina y Carrera (eds). *Las caras del Agua subterránea*, 83- 89.
- Boulding, R. 1995. *Practical handbook of Soil, Vadose zone, and groundwater contamination. Assessment, Prevention and Remediation*. Lewis, 948 pp.
- Custodio, E. y R. Llamas. 1983. *Hidrología subterránea*. Vol I y II. Omega, 2350 pp.
- Daughton, C.G. 2001 *Pharmaceutical in the Environment: Overarching Issues and Overview*. En: Daughton y Jones-Lepp (eds). *Pharmaceuticals and personal Care Products in the Environment: Scientific and Regulatory Issues*, Symposium Series 791; American Chemical Society, Washington D.C. pp. 2-38. (www.epa.gov/esd/chemistry/pharma/book-summary.htm).
- Eckel, W.P., Ross, B.; Isensee, R.K. 1993. Pentobarbital found in ground water. *Ground Water*, 31(5), 801-804.
- Fetter, C. 1999. *Contaminant Hydrology*. Prentice Hall, 500 pp.
- Gode, Ll. 1998. Sectores industriales implicados en la polución del agua. *Jornada Técnica: Vertidos de aguas residuales industriales an redes de saneamiento*, Zaragoza.

- Heberer, Th., Schmidt-Bäumler, K., Stan H. 1998. Occurrence and distribution of organic contaminants in the aquatic system in Berlin. Part I: Drug residues and other polar contaminants in Berlin surface and groundwater. *Acta Hydrochim. Hydrobiol.*, 26(5), 272-278.
- Holm, J.V., Rügge, K., Bjerg, P.L., Christensen, T.H. 1995 Occurrence and distribution of pharmaceutical organic compounds in the groundwater downgradient of a landfill (Grindsted, Denmark). *Environ. Sci. Technol.*, 29(5), 1415-1420.
- MOPTMA. 1993 Inventario Nacional de suelos contaminados.
- Mujeriego, R. 1990. Manual práctico de riego con agua residual municipal regenerada. UPC, Barcelona.
- Office of Technology Assessment-OTA. 1984. Protecting the Nation's Groundwater from Contamination. Vols I and II. (OTA-0-233; OTA-0276). OTA Washington, DC.
- Page, G.W. 1981 Comparison of Groundwater and Surface Water for Patterns and levels of contaminations by toxic substances. *Environ. Sci. Technol.*, (15), 1475-1481.
- Sedlak, D.L., Gray, J.L., Pinkston, K.E. 2000. Understanding microcontaminants in recycled water. *Environ. Sci. Technol.*, 34(23), 509A-5515A.
- Seiler, R.L., Zaugg, S.D., Thomas, J.M., Howcroft, D.L. 1999. Caffeine and pharmaceuticals as indicators of waste water contamination in wells. *Ground Water*, 37(3), 405-410.
- Stamp, D. L. 1964. *The Geography of Life and Death*. Cornell University Press, Ithaca, NY. 160 pp.