

RETOS DE LA HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA

Emilio Custodio.¹
M. Ramón Llamas.²
A. Sahuquillo.³

Resumen:

La Hidrología subterránea es una rama de la Hidrología que trata de las diferentes formas y situaciones del agua bajo la superficie terrestre. Considera no solo al agua subterránea como un recurso sino también su papel esencial en la Naturaleza, en la geomorfología y en la geodinámica terrestre. Es una Ciencia y una Ingeniería cuyos principios básicos están razonablemente establecidos, pero que aún tiene numerosos aspectos por desarrollar, tanto desde el punto de vista científico como aplicado. En buena parte ello es debido a la complejidad del terreno y de las interacciones del agua con el mismo. Los fenómenos se pueden considerar a muy distintas escalas, desde la del poro o la microfisura a la del conjunto de fenómenos geológicos a escala regional. Con frecuencia se observa a una escala y las cuestiones a considerar o resolver están a otra diferente. Como sucede en otras Ciencias de la Naturaleza, el paso de una escala a otra tiene serios problemas conceptuales y prácticos. Aún se requiere un notable esfuerzo para el establecimiento de modelos conceptuales, de simulación numérica, de interpretación hidrogeoquímica y de conocimiento de los aspectos bioquímicos, tanto para entender el papel natural del agua subterránea, como para potenciar su valor como recurso económico, y también para lograr su uso sustentable, proteger de la contaminación y remediar los posibles efectos negativos debidos a su aprovechamiento. A los temas científicos y técnicos se unen los económicos y sociales, cada vez con mayor peso y relevancia. En este artículo se presenta la visión de los autores sobre la situación actual y la evolución futura basándose en las necesidades de conocimiento y desarrollo. Los aspectos socioeconómicos sólo se esbozan, aunque se reconoce que hoy son quizás los más relevantes a efectos prácticos. Este artículo no pretende ser un estado del arte y las referencias se limitan a algunas publicaciones orientativas.

Palabras clave: hidrología subterránea, hidrogeología, estado actual, retos de futuro, evolución del conocimiento.

Introducción

El Comité Coordinador del Decenio Hidrológico Internacional de UNESCO adoptó en 1965 la definición: “La Hidrología es la Ciencia que trata de las aguas terrestres, de sus maneras de aparecer, de su circulación y distribución en el globo, de sus propiedades físicas y químicas y sus interacciones con el medio físico y biológico, sin olvidar las reacciones a la acción del hombre” (véase Custodio y Llamas, 1976). Esta definición se puede seguir considerando válida, si bien últimamente se han abierto nuevas fronteras con la consideración del agua en otros lugares del espacio extraterrestre. En el pasado se ha ligado Hidrología a Recursos hídricos e Ingeniería hidráulica, pero hoy ésta limitación de la perspectiva ha sido superada. Se trata de una Ciencia de la Tierra que se enlaza estrechamente con las Ciencias ambientales, penetra los aspectos físicos, químicos y biológicos, y se extiende por ámbitos económicos, sociales y políticos (Dooge, 1999).

La Hidrología subterránea es aquella parte de la Hidrología que considera las aguas situadas

bajo la superficie del terreno, así como sus manifestaciones exteriores e intercambios con los otros medios que son objeto de la Hidrología (Custodio y Llamas, 1976; Price, 1996). Por supuesto que las fronteras entre las diferentes ramas de la Hidrología son difusas, como sucede con el conocimiento del agua en el suelo, donde confluyen las Hidrologías superficial, atmosférica, edáfica y subterránea, y las Ciencias con las que están relacionadas (Climatología, Edafología, Geología, Geofísica, Geoquímica y Biogeoquímica).

El término Hidrología subterránea se suele considerar que es sinónimo de Hidrogeología, aunque cabe introducir matices según el énfasis fisico-matemático o geológico. Pero no hay una diferenciación clara ni un acuerdo mayoritario. La denominación Geohidrología, actualmente de uso muy generalizado en Méjico, también ha sido a veces considerada como sinónima, pero más frecuentemente hace referencia a la Hidrología en su conjunto, con énfasis en sus aspectos fisicomatemáticos.

¹Dr. Ing. Ind., Catedrático del Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España. Temporalmente en el Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid, España.

²Dr. Ing. CCP, Catedrático del Departamento de Geodinámica, Universidad Complutense de Madrid, España.

³Dr. Ing. CCP, Catedrático del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Prácticamente la totalidad del agua a la que hace referencia la Hidrología cambia de lugar y de estado a lo largo del tiempo, pero sin variar esencialmente la cantidad total, en una circulación que conforma el ciclo hidrológico en sus fases principales: superficial, subterránea, oceánica, atmosférica, glacial y biológica. Cada fase del ciclo hidrológico tiene unas características propias que exige su tratamiento diferenciado dentro del conjunto. Así, a las aguas subterráneas, que son el objeto de la Hidrología subterránea, se les asocia un tiempo de tránsito largo o muy largo, y un almacenamiento asociado muy elevado en comparación con las aguas superficiales. Este flujo del agua subterránea es por lo común muy lento en comparación con la escala temporal humana, de modo que una parte del agua llega a considerarse a veces como separada del ciclo hidrológico "activo". Es lo que en ocasiones se llama agua "fósil" o no renovable, lo cual es más una cuestión de conveniencia que conceptual, aunque por otros motivos de carácter corporativo o personal hay quien insiste aún en establecer una marcada diferenciación. Dentro de las aguas subterráneas se incluyen circunstancias muy diferentes, desde el agua vadosa (del medio no saturado) a la que está ocluida o atrapada en rocas y minerales, e incluso la que está disuelta en magmas y en el manto. Por razones de importancia para la actividad del hombre se presta mayor atención al agua en los acuíferos y en los acuitardos, y también, más recientemente, en el medio no saturado.

El agua juega un papel muy singular en la Naturaleza. Junto con el oxígeno atmosférico constituye la circunstancia más peculiar de la Tierra respecto a los otros planetas del sistema solar. El agua es la base necesaria para la existencia de vida, pero también es una substancia esencial en la dinámica y evolución terrestre, incluso en la dinámica profunda al influir en las características de las rocas a alta presión y temperatura (Zang, 1999). Además el agua es un agente físico muy activo en la conformación del relieve terrestre y es un poderoso disolvente capaz de movilizar gran número de substancias. De ahí su importancia en la formación de rocas, sedimentos y yacimientos minerales, y que sea el vehículo principal del transporte de contaminantes. Todo ello incluye aspectos científicos muy diversos, de gran alcance y multifacéticos.

Además el agua es necesaria para la sociedad humana, no sólo para cubrir sus necesidades vitales esenciales sino para buena parte de sus actividades económicas. Por ello es también un recurso económico y un sujeto tecnológico.

Para disponer de agua en el espacio y en el tiempo, en la cantidad y calidad requeridas, se precisa una serie de actuaciones que implican alguna alteración del ciclo hidrológico natural, cuya importancia relativa depende de las circunstancias. Esas actuaciones son fruto de una Ingeniería, que es también parte de la Hidrología, que se aplica para conseguir unos servicios y obtener unos beneficios económicos y sociales. El estudio y conocimiento de los efectos de esas actuaciones también son objeto de la Ciencia hidrológica. También la corrección de los efectos negativos que se puedan producir supone aplicar nuevos conocimientos científicos y recursos de Ingeniería que se fundamentan en la Ciencia Hidrológica. Su aplicación al conjunto se basa en los principios éticos que deben regir toda la actuación del hombre.

De ahí que al hacer referencia en adelante a la Hidrología subterránea se consideren tanto los aspectos científicos como los técnicos, y que se estudie tanto el papel del agua en la Naturaleza como su carácter de recurso para satisfacer las necesidades humanas. No resulta siempre fácil mantener el adecuado equilibrio entre unos y otros. Sucede a menudo que, a causa de la presión social por disponer de agua para actividades del hombre, se hable del agua subterránea como un simple recurso económico, olvidando su papel en la Naturaleza. Pero también puede acontecer que, por defender la Naturaleza, se olvide que la conservación y disfrute de esa Naturaleza tiene poco sentido en ausencia del hombre o con una Sociedad pobre, en conflicto o que la ignora.

Gran parte del devenir presente y de los retos futuros de la Hidrología subterránea no están en los aspectos más estrictamente científicos y tecnológicos –aún siendo éstos importantes, desafiantes y atractivos– sino en los de carácter económico, social y político (Dooge, 1999). Aún hay poca experiencia en estos aspectos, se defienden puntos de vista controvertidos, notables intereses económicos, sociales y políticos entran en colisión, y en general se dispone de escasa capacitación sobre ellos, aún a alto nivel.

Este artículo es una visión personal de los autores sobre el momento actual de la Hidrología Subterránea y su evolución futura. No se trata de presentar detalladamente el estado del arte ni de realizar una revisión documentada de los problemas y su evolución. Por eso no se aporta un conjunto extenso de referencias que soporte cada aspecto, sino tan solo algunas pocas menciones de

textos y trabajos generales. Por razones de extensión del artículo y de la propia especialidad de los autores se pone más énfasis en los aspectos científico-técnicos que en los demás aspectos de carácter económico y social, que hoy son los que están adquiriendo mayor relevancia.

Sobre el conocimiento básico de la hidrología subterránea

Existe ya un razonable cuerpo de doctrina que sienta buena parte de los fundamentos básicos que definen y regulan el flujo del agua y el transporte de masa (de sustancias disueltas en el agua) en el terreno, tanto en el medio saturado como en el medio no saturado, a nivel macroscópico, es decir, promediando la complejidad del entramado de poros y fisuras en lo que se define como un volumen elemental representativo (Narashimhan, 1999; Apello y Postma, 1993; Custodio y Llamas, 1976). También hay modelos teóricos que explican aceptablemente bien el comportamiento microscópico (a escala igual o de mayor detalle que la del poro o fisura) y que para medios homogéneos y con cambios suaves explican los valores de las magnitudes características, tales como porosidad, conductividad hidráulica, difusividad molecular, dispersividad, coeficientes de sorción y de intercambio iónico, exclusión iónica y tortuosidad. No obstante, aún caben nuevos desarrollos básicos, en especial en aspectos que afectan al transporte de masa, tales como isoterms de sorción y coeficientes de reparto, y aún falta una sistematización que permita definir los valores de esas magnitudes en función de características del medio que sean fácilmente observables. Los principios del flujo en fisuras y fracturas es razonablemente conocido (NRC, 1996), pero su tratamiento generalizado y regionalizado requiere desarrollos adicionales.

Parte de los esfuerzos actuales tratan de definir mejor lo que se ha venido considerando como magnitudes fundamentales, para tener en cuenta la compleja naturaleza del medio subterráneo y su heterogeneidad, vista desde distintas escalas. La variabilidad espacial de las propiedades de los acuíferos y acuitardos es siempre elevada, aún en los que se consideran más homogéneos, e incluso considerando distancias muy pequeñas. Desde que Freeze (1975) inició el análisis de la influencia de la heterogeneidad del medio subterráneo se ha producido un auge espectacular de lo que ha llegado a ser la hidrología subterránea estocástica, que ha dado resultados importantes en el análisis del flujo y transporte subterráneo. En medios no

excesivamente heterogéneos se ha llegado a predecir los parámetros de flujo y dispersión a partir de las propiedades geoestadísticas de la conductividad hidráulica, y se ha explicado el carácter asintótico de la dispersividad. Pero en medios más heterogéneos, en general en medios con estructura de distribución espacial no gaussiana, la evolución de la contaminación puede ser muy distinta a la predicha por la ley de Fick, e incluso la dispersividad puede ser creciente continuamente. Esto sucede cuando la mancha de contaminación está influenciada por heterogeneidades a una escala más amplia o cuando existen zonas marcadamente más permeables. En medios heterogéneos el cambio de escala (escalado hacia arriba o hacia abajo) de la conductividad hidráulica presenta dificultades conceptuales y prácticas.

En general las heterogeneidades complican notablemente la descripción y cuantificación del flujo, y aún más el del transporte. El problema es más acusado en el flujo multifásico, tanto el que sucede en el medio no saturado (agua y aire) como en yacimientos de gas o petróleo (agua y gas y/o petróleo) o sistemas más complejos (contaminación del terreno por productos petrolíferos o disolventes orgánicos). En el caso de fluido heterogéneo miscible de densidad variable, como en el caso de intrusión de agua salina en un acuífero de agua dulce, se crean problemas adicionales. Las dificultades hacen aún más manifiestas cuando se trata de fluidos inmiscibles, donde las digitaciones y los efectos capilares pueden tener un efecto muy acusado.

La consideración del medio permeable como un medio heterogéneo al que sólo se puede acceder con un número reducido de perforaciones hace que la caracterización de las propiedades hidrodinámicas y de transporte de un acuífero tenga incertidumbres que dependen de las observaciones y medidas realizadas, y de su distribución espacial. La importancia de esas incertidumbres es mayor sobre el transporte de masa que sobre el flujo. Este problema es crucial para estudiar la migración de contaminantes. La interpolación de las conductividades hidráulicas o transmisividades medidas, o la asignación de valores medidos a determinadas capas o regiones de un acuífero si bien puede ser válida para tratar problemas de flujo, con frecuencia suele ser inadecuada para los de transporte de masa. Esto es debido a que los contaminantes pueden migrar mucho más fácilmente a través de caminos preferenciales.

El tratamiento estocástico permite disminuir las incertidumbres, o al menos tratarlas más cuantitativamente. Esto suele hacerse realizando múltiples simulaciones utilizando el método de Monte Carlo. Se pretende que los campos tengan la misma distribución estocástica y variabilidad espacial de las propiedades hidrodinámicas (conductividad hidráulica o transmisividad, aunque también pueden ser otras) que el campo real, el cual no se conoce más que en unos pocos puntos en los cuales también se pretende reproducir los valores de las magnitudes y variables medidas, tales como el potencial hidráulico o las concentraciones. El análisis de los resultados proporciona el riesgo inherente al proceso simulado. Los medios simulados que preservan la variabilidad espacial no son suaves, contrariamente a los medios obtenidos interpolando los datos, que representan el valor más probable en cada punto, pero que no preservan la variabilidad espacial. Éstos proporcionan resultados mucho más inseguros con respecto a la migración de contaminantes. Estos modos de tratamiento son relativamente recientes, y ya han aportado algunos avances notables al tratamiento cuantitativo. En esta línea se esperan notables avances en el futuro, tanto para el conocimiento del flujo y transporte de masa como para la evaluación de la incertidumbre asociada (Gómez-Hernández et al., 1997).

Aunque lo anteriormente comentado se refiere al flujo de fluido y transporte de masa, de modo similar se puede considerar el transporte de calor. De hecho los aspectos térmicos del terreno son importantes y están muy influenciados por el flujo del agua subterránea. También los principios básicos son bien conocidos, así como los parámetros macroscópicos que los definen. En medios granulares la temperatura del fluido y del medio puede suponerse que es la misma a una escala de tiempo no muy detallada, aunque en medios fisurados (asimilables a doble permeabilidad/porosidad) la difusión térmica entre fisura y bloque introduce una amortiguación y retraso de los cambios que hasta ahora sólo ha sido analizada preliminarmente.

La distribución de la temperatura del terreno y de sus variaciones en relación con el flujo del agua subterránea ha sido objeto de estudio desde hace largo tiempo, pero las aplicaciones han sido relativamente escasas, salvo en lo que respecta a cuestiones en relación con la energía geotérmica. Por ello cabe esperar que estas técnicas se desarrollen notablemente, con la condición de que los métodos para obtener la información térmica se mejoren notablemente.

La incertidumbre del valor de la recarga a los acuíferos

Es bien conocido como se produce la recarga a los acuíferos pero su cuantificación con precisión aceptable es uno de los grandes desafíos de la Hidrología subterránea (Custodio et al., 1997; Simmers, 1997), tanto en lo que respecta a su valor en un momento y lugar determinados, como a su estimación y cálculo en función de unas circunstancias dadas. Es una magnitud con una incertidumbre asociada importante, no sólo a causa de su propia génesis (precipitación, caudal en el cauce de un río) sino de la variabilidad espacial de las características del terreno sobre la que se produce. Las incertidumbres asociadas al conocimiento de la escorrentía superficial son similares o mayores que las inherentes a la estimación de la recarga a los acuíferos.

La determinación o cálculo de la recarga por diferentes métodos, en lo posible independientes, ayuda no sólo a disminuir la incertidumbre sino a corregir errores en los primeros momentos estadísticos (errores y desplazamientos en la media y/o medianas). Los diferentes métodos producen valores con distinta representatividad temporal y espacial. Unos representan la respuesta a un evento de precipitación o escorrentía o a un conjunto limitado de ellos, mientras que otros integran un gran número de eventos a lo largo de un largo periodo de tiempo, de modo que se obtienen valores medios. Estos valores medios a largo plazo pueden abarcar periodos que pueden incluir cambios climáticos significativos o modificaciones importantes del uso del territorio, y que por lo tanto no representan a un sistema sin tendencia. Éste es aún un campo de investigación abierto, además de tener implicaciones importantes para los estudios de la evolución climática pasada y la predicción de los cambios futuros.

En el caso de recarga por la precipitación atmosférica, los métodos de estimación (de balance de agua en el suelo, lisimétricos, de perfiles de humedad, de balance de cloruro de aporte atmosférico, de perfiles de cloruro, de balance isotópico de tritio, de transporte de cloro-36 termonuclear,...) están razonablemente bien establecidos. No obstante subsisten problemas de variabilidad espacial, que requieren un esfuerzo de transformación de escalas.

En áreas áridas y semiáridas tanto la recarga por la lluvia como por la escorrentía de tormenta son eventos singulares, poco frecuentes, que pueden

llegar a tener un papel muy importante en los sistemas acuíferos con un gran tiempo de permanencia del agua subterránea. Estos eventos están aún pobremente caracterizados y son mal conocidos, y además pueden responder a situaciones cambiantes y heterogéneas. Su caracterización requiere estudios más detallados. En ellos los aspectos isotópicos del agua tienen una relevancia especial. En estas áreas no es raro que la única recarga significativa se produzca durante eventos excepcionales de pluviometría y/o escorrentía, y por lo tanto de muy difícil observación y evaluación. Pero también hay circunstancias que permiten que en clima semiárido la recarga en años secos sea aún significativa.

La importancia de la cubierta vegetal sobre la recarga es algo que aún requiere un proceso de maduración importante, sobre todo cuando se procede a regionalizar las observaciones. A este respecto, el papel del bosque aún contiene aspectos importantes a investigar, como el efecto de macroporos, del escurrimiento a lo largo de los troncos y del atrapamiento de nieblas (en cuanto a humedad y a salinidad atmosférica), y el más importante de la evapotranspiración. En áreas extensas de arenas silíceas con vegetación moderada, el fenómeno de la repelencia de la superficie desnuda de la arena seca sobre las gotas de lluvia parece tener una importancia apreciable en la recarga concentrada en microdepressiones en áreas semiáridas y áridas. El fenómeno parece fácil de simular pero se desconoce en buena manera su parametrización y duración.

También la caracterización de la recarga por la lluvia sobre áreas de roca con suelo escaso o casi inexistente presenta retos importantes en el momento actual. La concentración de la escorrentía en fisuras situadas en depresiones del microrrelieve juega un papel esencial, así como la transmisión en profundidad de ese agua por la fisura y su interacción con las paredes de la misma en el medio no saturado.

En áreas áridas y semiáridas la infiltración de la escorrentía esporádica en piedemontes, abanicos aluviales y cauces, y su transformación en recarga a los acuíferos, presenta numerosos puntos aún poco conocidos en relación con la superficie inundada, la permeabilidad y espesor de los sedimentos de fondo en esas áreas y la capacidad de descolmatación del cauce durante las crecidas.

Una de las dificultades aún pobremente resueltas es la de escala, o sea como relacionar valo-

res de la recarga sobre un territorio extenso con una o pocas observaciones sobre áreas reducidas o puntuales, o como relacionar las distribuciones temporales con observaciones en determinados momentos o en intervalos de tiempo limitados.

La creciente importancia de la Hidrogeoquímica.

Para la caracterización del funcionamiento de los sistemas acuíferos, los métodos hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales son herramientas de gran interés, que en muchos casos se han desarrollado hasta hacer posible su utilización como herramienta convencional (Appelo y Postma, 1993). No obstante subsisten aspectos que no llegan a dilucidarse bien con el estudio de los componentes disueltos mayoritarios, de las especies isotópicas estables del agua (^{18}O y ^2H) y de algunas sustancias disueltas (^{13}C , ^{15}N , ^{32}S), y la datación derivada de algunos radioisótopos naturales cosmogénicos o introducidos en la atmósfera a gran escala (^3H , ^{14}C , ^{36}Cl). Por ello, en paralelo con la esperable gran mejora futura en las técnicas analíticas, se abren nuevos caminos. Tales son la cromatografía iónica de alta presión, la cromatografía de gases y las técnicas analíticas de plasma inductivamente acoplado en espectro de emisión o en espectrometría de masas. Las técnicas analíticas se pueden extender de forma eficaz a la mayoría de los elementos de la tabla periódica de forma sistemática. Si los muestras son representativas, y se puede evitar la contaminación de la muestra durante su manipulación, se abre un gran espectro de posibilidades, todavía sólo incipientemente exploradas. Las técnicas basadas en las relaciones iónicas, sobre todo cuando uno o dos iones son minoritarios o traza, han sido ampliamente extendidas por la mayor precisión analítica a concentraciones pequeñas y por lo tanto por la menor incertidumbre de la relación que se calcula. Tal sucede con la relación Cl/Br . La consideración de los iones Sr , Li , compuestos de B , Cs , Rb , ... es ahora más habitual y figura en numerosos estudios, aunque la interpretación aún es confusa y un tanto ocasional, incluso para la relación Na/K . La investigación probablemente afianzará nuevas técnicas de estudio e interpretación.

Algunos aspectos bien conocidos desde hace tiempo, como el origen de la presencia de concentraciones anómalas de As , V , F , B en ciertos acuíferos y acuitardos, aún no están satisfactoriamente resueltos, a pesar de su importancia sanitaria y económica. En algunos casos se requiere progresar en la especiación química de esas sustancias.

Al amparo de las notables mejoras en las técnicas analíticas se está trabajando mucho en el estudio de sustancias disueltas al estado de trazas, como ciertos metales pesados y tierras raras. Las relaciones de concentraciones pueden ser características de determinados ambientes geoquímicos, pero aún falta experiencia y guías claras de interpretación, además de protocolos de muestreo que aseguren la representatividad.

Los gases disueltos en el agua subterránea pueden tener un gran interés para caracterizar el origen de la misma o su ambiente (Aechebach-Herting et al., 1999), como la temperatura profunda de almacenamiento o las condiciones bajo las que se produjo la recarga, o determinadas reacciones químicas y bioquímicas. Las mayores dificultades han radicado no sólo en la aún insuficiente experiencia, sino además en como lograr un adecuado muestreo, tratamiento de la muestra y disponibilidad de laboratorios adecuados. Los gases nobles disueltos, con correcciones que ahora empiezan a entenderse bien, informan sobre la temperatura y altitud de recarga, y la acumulación de ^4He es proporcional al tiempo de permanencia del agua en el terreno. La relación $^3\text{He}/^3\text{H}$ extiende la utilidad del tritio como radioisótopo ambiental en condiciones apropiadas. Los radioisótopos ^{85}Kr y ^{39}Ar son nuevas herramientas de datación, aplicables una vez que se vayan sistematizando sus engorrosos protocolos de muestreo.

Las técnicas de espectrometría de masas han permitido ampliar notablemente la utilidad de la datación con ^{14}C al poderse utilizar muestras con sólo algunos mg de C. Esto es importante para aguas de muy bajo contenido en carbono biogénico disuelto, para las pequeñas muestras de agua de formaciones de baja permeabilidad y para el estudio del carbono orgánico disuelto. El aumento del número de laboratorios capacitados para esta técnica ampliará mucho su utilización. Su interés deberá ir acompañado del desarrollo paralelo de las técnicas de interpretación que permitan identificar las mezclas de carbono de diferentes orígenes con el fin de evaluar el valor inicial de carbono cosmogénico aportado por la recarga. Se trata de un importante desafío geoquímico.

El empleo de las variaciones isotópicas del uranio es aún incipiente, a pesar de que las técnicas de espectrometría alfa a emplear no son de gran complejidad. El estudio isotópico del Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), técnica bien establecida para rocas,

aparece también útil para identificar las reacciones roca-agua y el origen del agua. En el momento actual la utilización de la variación isotópica $^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$ sigue chocando con la escasa precisión analítica y la escasez de laboratorios capaces de medir esta relación con precisión suficiente. Esta relación isotópica, lo mismo que otras en relación con el Be y B, y quizás con otros elementos más pesados, en un futuro próximo pueden deparar técnicas nuevas y relativamente simples.

Aún existen lagunas importantes de conocimiento en relación con los procesos de detalle y la cinética de las reacciones químicas en el seno del fluido, entre el fluido y el sólido (Lichtner et al., 1996), y las de degradación de sustancias complejas inorgánicas y orgánicas. Ya se dispone de modelos conceptuales aceptables sobre el papel de los microorganismos y de las condiciones ambientales y de nutrientes que condicionan las actividades enzimáticas, pero aún queda abierto un amplio campo de investigación y desarrollo, en el que se consideren las diversas circunstancias del ambiente subterráneo.

Determinados aspectos de la coprecipitación de metales pesados con coloides es aún pobremente conocida, así como la evolución (maduración) posterior de los recubrimientos de alta hidratación. El estudio y análisis del transporte a través del terreno de los propios coloides requiere desarrollos científicos adicionales para su correcta comprensión, si bien existen progresos notables en cuanto a los inorgánicos, de buena manera propiciados por estudios en relación con residuos radioactivos.

La caracterización de sustancias orgánicas disueltas en el agua subterránea es uno de los progresos más notables de la química analítica en las últimas dos décadas, pero aún se está en los comienzos en lo que se refiere a métodos y técnicas optimizadas y asequibles, por un lado para el reconocimiento de qué sustancias están presentes, y por otro para la medida de sustancias específicas y de sus productos de degradación química y biológica que aparecen en las diferentes condiciones ambientales del agua subterránea y del medio no saturado. En general se requiere una gran especialización del personal y de la instrumentación, y métodos específicos, tanto de muestreo como de extracción y analíticos. Estas técnicas van dirigidas tanto al estudio de la contaminación antrópica (plaguicidas, productos farmacéuticos, disolventes orgánicos, hidrocarburos, colorantes, ...) como a los existentes naturalmente y que se incorporan

con el proceso de recarga, incluso de recarga en épocas pretéritas cuando se trata de sustancias persistentes. Cabe esperar que numerosas posibilidades estén aún por desarrollar o descubrir, y que su aparición surja en paralelo con las de las técnicas analíticas que las soportan.

En similares circunstancias se encuentra la determinación de las características microbiológicas de las aguas subterráneas y del medio subterráneo.

Los fundamentos y la práctica de la modelación numérica

La modelación del transporte de masa y calor en el terreno ha tenido un importante desarrollo en las dos últimas décadas, con buena disponibilidad de programas eficaces, con adecuados preprocesadores y postprocesadores, y con un conocimiento razonable de las limitaciones para evitar problemas numéricos. Pero la mayoría de programas son bidimensionales y para fluido homogéneo. La consideración de heterogeneidades, cuando éstas son conocidas, suele llevar a tiempos de cálculo largos o a dificultades en el manejo de los resultados. Estas dificultades pueden agrandarse notablemente al pasar a modelos de tres dimensiones, los que actualmente aún resultan poco abordables en situaciones con cierta complejidad ya que el número de elementos es muy grande y las heterogeneidades complican las matrices numéricas. Además los métodos de procesamiento de los resultados, a pesar de avances muy notables, aún resultan insuficientes o poco eficaces. Muy probablemente en los próximos años seguirán produciéndose avances substanciales que hagan que esos modelos sean más eficaces y amigables, con una amplia gama de opciones en cuanto a la complejidad de las situaciones a simular.

Sin embargo, las principales limitaciones no son las de los dispositivos de cálculo, sino la formulación de los modelos conceptuales y la obtención de valores representativos de las magnitudes que intervienen en el modelo, así como la definición de las condiciones iniciales y de contorno. Muchas veces tampoco se tienen suficientes datos históricos para calibrar el modelo. Cabe esperar que nuevos desarrollos instrumentales hagan que los esfuerzos deban concentrarse en su buen uso y adecuado desarrollo de su potencialidad, junto a desarrollos teóricos y observacionales.

Para comprobar el funcionamiento razonable de los modelos y comparar unos códigos de reso-

lución con otros, pocas veces se dispone de soluciones analíticas. Con frecuencia hay que recurrir a otros modelos ensayados -sólo hasta cierto punto validados- en situaciones hidrogeológicas bien documentadas, tanto a nivel de ensayo de laboratorio como de situación real. Estos análogos son escasos, aunque se ha hecho un notable esfuerzo para validar códigos de cara a su aplicación al estudio de repositorios de residuos nucleares y al estudio de casos de contaminación de acuíferos. Para ello se han seleccionado casos de estudio de laboratorio y reales (proyectos GEOVAL, INTRAVAL, ...) o lugares específicos muy bien documentados (vertedero de Borden, Cape Cod, mina de Stripa, ...). Un importante reto de futuro es aumentar la gama y calidad de esos análogos y casos reales, y con ellos efectuar ensayos de validación más profundos, en especial para las simulaciones en situaciones de complejidad creciente.

La aparición de códigos eficaces de calibración automática es reciente y se están produciendo notables desarrollos, que sin duda van a continuar hasta hacer que este modo de proceder sea estándar, pero requieren computadoras grandes y rápidas, que hoy no siempre están disponibles.

También se están introduciendo códigos que consideran que los valores de las magnitudes que conforman el problema hidrogeológico, incluidas las condiciones de contorno, están afectadas de una componente aleatoria. La calibración automática permite definir probabilidades. Este tipo de modelación, y la derivada de magnitudes borrosas (fuzzy), junto con un mayor uso de técnicas aleatorias tipo Monte Carlo, pueden llegar a constituir un importante grupo de opciones en el futuro, con computadoras capaces y rápidas, a condición de que se logren mejoras en las herramientas matemáticas y de interpretación de los resultados, y que se acoplen métodos ágiles de calibración automática.

Asociado a la calibración está la cuestión de la identificabilidad de las heterogeneidades del medio y de las condiciones de contorno a partir de un número limitado de medidas de magnitudes y de valores de las variables, con o sin error asociado. Estos problemas son objeto de reciente estudio y necesitan aún de notables desarrollos para obtener evaluaciones de esa identificabilidad y de su influencia en los resultados para unos determinados fines. La identificabilidad es en sí un concepto borroso, y lleva asociada una incertidumbre, cuyo valor depende del problema a resolver.

En el campo hidrogeoquímico se han desarrollado códigos numéricos asociados a extensas bases de datos que permiten diversos cálculos termodinámicos. En general se resuelven problemas de equilibrio químico en condiciones muy variables de temperatura y presión, en condiciones muy diversas. La evolución es hacia la mejora en las bases de datos, a la incorporación de la cinética química y a la progresiva incorporación de nuevas sustancias orgánicas, pero sin que se pierda la facilidad de utilización y en su caso el posible acoplo o integración en modelos de transporte de masa, si es esa la opción adoptada, en vez de la de incorporar los procesos a considerar directamente en el código numérico. En los últimos años se ha avanzado notablemente en la incorporación del transporte de masa reactivo con grandes gradientes de concentración o interacciones complejas.

Sobre la caracterización de las propiedades hidrogeológicas

Buena parte de la información sobre aguas subterráneas se ha obtenido y se obtiene con escasa atención a la dimensión vertical. Ésto puede producir distorsiones importantes en la medida del potencial hidráulico, pero sobre todo en la caracterización química e isotópica ambiental. Esto en buena parte es debido a una excesiva simplificación conceptual. Por otra parte los medios de reconocimiento y observación en profundidad son muy costosos cuando se trata de acuíferos profundos. La importancia de los acuitados en la configuración del flujo y del transporte de masa y de calor en los sistemas acuíferos no se ha conocido hasta épocas recientes, así como la necesidad de su observación, lo que requiere dispositivos y técnicas adecuadas, y en ciertos aspectos diferentes de las utilizables en acuíferos. Los desarrollos en sondeos de observación parecen suficientes, y actualmente es posible construir con adecuada precisión sondeos direccionales. Las técnicas de sensores y electrónicas tienen aún un gran campo para ofrecer instrumentación de observación y control adecuada a las necesidades a cubrir, y sobre todo dedicadas al agua con preferencia a las que se basan en propiedades físicas que sólo informan sobre lo que se desea medir de forma indirecta. En este campo hay que considerar tanto los sensores fijos como los métodos de testificación a lo largo de perforaciones.

En el campo de la geofísica de superficie se han ido produciendo progresivas mejoras de los métodos y de la instrumentación que los apoya (más sensible, ligera, amigable). Se han introduci-

do métodos más focalizados o selectivos, tales como los audiomagnetotéluricos o la resonancia magnética nuclear, aunque este último método -cuyo objetivo es la propia molécula de agua- aún necesita desarrollo y clarificar sus campos reales de aplicación. Por otro lado se han mejorado mucho los métodos rápidos de reconocimiento de tipo electromagnético transportable, incluyendo los de radar. Cabe esperar que en las próximas décadas aparezcan dispositivos e instrumentación más manejable, así como de captación y tratamiento automatizado de las señales y respuestas, incluso en el campo, además de mejorar la experiencia para la interpretación y aplicación de los resultados. Pero no cabe descartar la aparición métodos novedosos, fruto de los grandes avances en la electrónica y en la aplicación de procesos físicos, sobre todo para resolver problemas acuciantes de contaminación, de depósitos de residuos o de prevención de riesgos.

Las técnicas de sensores remotos (teledetección), tanto aerotransportados como desde satélite, aunque con frecuencia de valor indirecto en hidrogeología, son herramientas poderosas para reconocimientos territoriales. Los avances metodológicos son muy notables en cuanto a detalle y precisión, así como en la introducción de sensores especializados, como los que hacen referencia a la contaminación del terreno. Su interés hidrogeológico es principalmente en cuanto informan sobre condiciones de recarga, descarga y contaminación. Su valor se limita a la superficie del terreno. Parece difícil superar esta limitación, aunque las técnicas de radar oblicuo aerotransportado dan una pequeña penetración. Posiblemente los métodos y técnicas están aún lejos del pleno desarrollo y no sería raro algunas novedades singulares.

En los reconocimientos en profundidad mediante métodos geofísicos de testificación y ensayos en el interior de sondeos, las técnicas tomográficas, aún incipientes, ofrecen un amplio campo de posibilidades a desarrollar, en especial para caracterizar heterogeneidades, sistemas de fluido heterogéneo o multifásico, y problemas de contaminación, aunque también podrían ser aplicados a la definición de las estructuras que conforman los sistemas acuíferos.

Sobre el papel del agua subterránea en la Naturaleza

Buena parte de los esfuerzos de casi dos siglos de existencia de la Hidrología subterránea científica se han dirigido a la captación de las aguas subterráneas y al estudio de los problemas

que éstas crean sobre el terreno y las obras humanas. Pero el agua subterránea juega un papel esencial en la Naturaleza en numerosos aspectos, desde la escala global a la local.

La propia dinámica interna terrestre está influenciada por la modificación de las propiedades de las rocas profundas por la presencia de agua en los medios de alta presión y temperatura (Manning e Ingebuitsen, 1999). Ello afecta a las características reológicas y a la fusibilidad, y por tanto a los desplazamientos de magmas y al volcanismo. La presencia de agua es esencial en muchos procesos metamórficos, de transporte de sustancias y su deposición en las formaciones, las que son objeto de la mineralogía. Estos procesos son a escala planetaria y en un tiempo de decenas de millones de años.

La presencia de agua subterránea tiene un papel importante en los procesos tectónicos y en los materiales resultantes, en una amplia gama de escalas espaciales y temporales. En estos campos se han hecho progresos notables recientemente. Su modelación futura aportará conocimientos que ayuden mucho a la elaboración de modelos interpretativos que permitan mejorar el conocimiento, pero ello supone incorporar procesos básicos en la caracterización de los fenómenos.

También las aguas subterráneas pueden jugar un importante papel en la geodinámica externa, a diferentes escalas espaciales y temporales. Además de los clásicos procesos kársticos en las rocas solubles, por un lado mantienen el caudal de los manantiales y el caudal de base de los ríos, y por otro el estado de los niveles piezométricos puede favorecer los deslizamientos de ladera, una de cuyas manifestaciones más espectaculares y extremas son los lahares asociados al volcanismo.

La descarga de agua subterránea en áreas de relieve moderado da origen a humedales de muy diversa naturaleza, desde las turberas de climas templados húmedos hasta los oasis de áreas áridas, pasando por las franjas encharcadas o encharcadas de ribera o periféricas de formaciones deltaicas, tanto costeras como de borde (formando ecotonos), y a veces incluso interiores a las llanuras de inundación en forma de "ojos", a veces de arenas movedizas y lodazales permanentes (Custodio, 2000). También pueden crear o contribuir agua a lagos y lagunas. Donde el nivel freático es somero el agua subterránea mantiene extensiones de vegetación freatófila. En áreas frías la descarga de agua subterránea unas veces produce disconti-

nuidades en el permafrost y otras permite que éste se extienda en profundidad, en función de la tasa de descarga.

Todas estas características, y otras no mencionadas, si bien conocidas desde hace mucho tiempo, no han empezado a ser reconocidas de forma general hasta épocas recientes. Parte del detalle de los mecanismos de descarga no es aún bien conocido y está pobremente caracterizado. Se esperan progresos futuros a medida que se potencie la investigación y la observación. Esto es aún más cierto cuando a los aspectos hidrodinámicos se unen los de salinidad, composición química y características isotópicas, que pueden venir acompañados de alteraciones del terreno, y la formación y diagénesis de sedimentos. No sólo se trata de las características del agua y del terreno sino de su influencia en los aspectos biológicos conexos.

La interacción de las aguas subterráneas con el terreno y el transporte de masas asociado tiene aspectos complejos y aún mal conocidos, tanto en cuanto a alternación y diagénesis de rocas como a formación de depósitos minerales, tanto a baja como a alta temperatura. Estos procesos incluyen el aporte de fluidos profundos, tanto salinos como gaseosos. También su conocimiento es necesario para el estudio y evaluación de los ciclos terrestres de los elementos, entre los que el del carbono tiene especial relevancia por su influencia climática. La interacción geosfera-biosfera es de gran importancia y objeto del programa IGBP (International Geosphere-Biosphere Programme), cuyo progreso abre notables retos de futuro. También plantea el estudio del volcanismo y de la interacción agua-magma en el continente y sobre todo en el fondo marino, donde la actividad es mayor. La interacción agua marina-magma-roca caliente supone procesos geoquímicos complejos de fijación y solubilización de sustancias, y de afección al pH marino, en los que la fase subterránea del agua (bajo el fondo marino) es una componente esencial.

Las aguas subterráneas y los cambios climáticos

Los cambios climáticos afectan a las aguas subterráneas a través de su efecto sobre la recarga (precipitaciones, evapotranspiración y escorrentía; cambios en la cobertura vegetal y edáfica, aparición de zonas heladas), y también sobre la descarga al modificarse el nivel de base, principalmente en la costa (variaciones eustáticas, sedi-

mentación-abrasión), pero también en el continente por relleno y excavación de valles, o acumulación de depósitos glaciares, periglaciares y eólicos. El largo tiempo de renovación del agua en los grandes acuíferos y el lento tránsito por los gruesos medios no saturados en ciertas zonas áridas hace que se pueda guardar memoria de cambios climáticos pasados. El más singular es el tránsito Pleistoceno-Holoceno, con sus fluctuaciones rápidas. Al mismo tiempo el ascenso del nivel del mar de unos 100 m a finales del Pleistoceno-inicio del Holoceno crea nuevas condiciones en las relaciones agua dulce-agua salada en las regiones costeras. La recarga producida en épocas pretéritas da origen a un agua subterránea -paleo-agua- que tiene el interés especial de carecer de contaminantes antropogénicos, y que en áreas costeras pueden llegar a constituir interesantes reservas fósiles de agua dulce. Su consideración especializada es relativamente reciente, por su valor como recurso, pero también por contener información sobre las condiciones ambientales bajo las que esas aguas se generaron (por ejemplo a partir de los gases nobles disueltos). El interés de estudio probablemente se va a mantener en las décadas venideras, aunque en ciertos casos será necesario establecer regulaciones para evitar la destrucción de las condiciones en que se conserva la información de las circunstancias del pasado (temperatura, deposición salina atmosférica, composición isotópica, altitud, cubierta vegetal).

El efecto de cambios en el territorio, en especial de la cubierta vegetal, en la recarga y sus características químicas –y su repercusión en los acuíferos- es aún pobremente conocido. Ahí se abre un amplio campo de investigación y estudio, que además aportará conocimientos para analizar los escenarios futuros de cambio climático. Estos escenarios futuros son objeto de numerosos estudios en relación al Cambio Global y del Programa Internacional de Cambio Climático (IPCC). Los principales efectos hacen referencia a la recarga y a la calidad de esa recarga (incluyendo el efecto de la vegetación), y a la modificación de la demanda de agua por las actividades humanas, y en especial para riego.

El agua subterránea como recurso económico y social

El agua subterránea ha sido y es un recurso tradicional de agua dulce para satisfacer las necesidades humanas. Goza de una notable regularidad en cantidad, calidad y temperatura, y de la ge-

neral ausencia de turbidez y de microorganismos nocivos. No obstante, en algunas ocasiones puede tener contenidos salinos o de ciertos componentes que pueden ser molestos y a veces nocivos.

Hasta el siglo pasado, la captación directa de agua subterránea suponía en general detracciones moderadas. Pero la posibilidad de extraer mediante bombas centrífugas grandes caudales en perforaciones de diámetro moderado y a veces muy profundas, la posibilidad de realizar rápida y eficazmente esas perforaciones y su acondicionamiento mediante métodos mecánicos, y la facilidad para disponer de energía eléctrica o mecánica en la mayoría de situaciones, ha cambiado drásticamente la situación desde principios del siglo XX y sobre todo en su segunda mitad. Esas técnicas están bien desarrolladas y no se esperan cambios esenciales en el futuro, salvo quizás en la ejecución de perforaciones profundas y en los materiales a emplear en el acabado de los pozos. No obstante, la normativa sobre captación de aguas subterráneas y las buenas prácticas a aplicar, aún existiendo en algunos países, es aún inadecuada y poco seguida. Esta situación deberá cambiar notablemente en la próximas décadas si se quieren evitar daños irreversibles a los acuíferos, a la calidad del agua, a la economía y al medio ambiente, tanto para el propio explotador y usuario del agua subterránea como para el conjunto de la Sociedad.

Una extracción proporcionalmente importante del agua que fluye por un acuífero da origen a un cambio en el régimen hidráulico del agua subterránea, con alteración de las descargas, incluso de las recargas, y modificación de las relaciones entre los acuíferos y acuitados de un sistema acuífero. No sólo varían los niveles piezométricos, sino que se pueden desplazar aguas salinas, se puede producir subsidencia del terreno –ocasionalmente colapsos- y desecar o reducir humedales, ríos y manantiales, y también dejar en seco determinadas áreas de ciertos acuíferos. Se trata de efectos derivados de la captación de agua en puntos diferentes de los de su descarga natural, por conveniencias humanas. Estos efectos son buenos, malos o indiferentes según como se consideren (Llamas et al., 1992). Por lo general son menores o similares a los derivados de la explotación de otros recursos naturales.

La observación de determinados efectos que se consideran negativos -aunque no necesariamente lo sean- con frecuencia puede crear cierta alarma que, trasladada al entorno social, se suele

calificar actualmente como sobreexplotación. Se trata de un término difícil de definir y que se usa a veces coloquialmente con carácter peyorativo. Mucha gente identifica la sobreexplotación con una extracción de agua subterránea mayor que la recarga, lo cual en muchos casos puede ser erróneo (Simmers et al., 1992)

También la preocupación por un continuo consumo de recursos naturales no renovables, la acumulación de residuos y el deterioro del medio ambiente, real o supuesta, ha llevado recientemente a proclamar que el uso sustentable es un objetivo social prioritario. No obstante, la definición también presenta dificultades y por lo general se hace en un contexto -el actual- que probablemente no será válido en el futuro.

Todos estos temas de protección de la naturaleza, explotación de aguas subterráneas y uso sustentable van a continuar tomando importancia en el futuro próximo. Por ello buena parte de la gestión de los recursos de agua subterránea y de la normativa asociada van a estar condicionadas por su evolución. Normalmente la gestión -en un determinado marco de planificación o de escenarios futuros- está condicionada por la consecución de un conjunto de objetivos, con frecuencia contrapuestos. Por lo tanto se requiere una cierta optimización -en sentido paretiano- con negociaciones para tratar de contrabalancear beneficios y daños, tanto los privados como los sociales. En la realidad el marco de esas negociaciones varía con el tiempo y está sometido a decisiones políticas -que son el resultado de presiones sociales- y que suelen estar matizadas y condicionadas por situaciones de libertad restringida. Tales son las que se derivan de sistemas económicos oligopolísticos, de mercado imperfecto, de grupos de presión dominantes, de deficiente información y formación ciudadana, o de situaciones no democráticas.

Todo esto es un marco complejo, hoy aún mal estructurado, que aplicado a la Hidrología subterránea requiere un desarrollo importante, una sensibilización ciudadana y la experimentación de métodos, guías y normas adecuadas, junto a una cada vez mayor participación de todos los que tiene un interés en el agua subterránea, no sólo los extractores y usuarios directos de un determinado acuífero.

Algunos de los grandes retos de futuro son la gestión integrada del conjunto de recursos hídricos -en cantidad y calidad- en un ámbito territorial

razonablemente amplio, exenta de predeterminaciones y no sometida a concepciones deformadas -hidromitos- y que además sea compatible con un grado razonable y serio de conservación y restauración del medio ambiente (Llamas, 1999). También se requiere que el receptor de los beneficios proporcionados por la disponibilidad de agua cubra los costes directos e indirectos, que la sustentabilidad se encuadre en un contexto integral, que se consiga la participación efectiva de los interesados -por ejemplo mediante comunidades de usuarios- en un marco normativo y de instituciones apropiado, que la información sea suficiente, no sesgada, cierta y asequible, que los esfuerzos de formación sean adecuados a la problemática a afrontar, y que se gestione con seriedad y eficacia la demanda, dejando de lado las políticas dirigidas preferentemente a la oferta de agua.

La gestión requiere un marco normativo y administrativo del que se derive una cierta planificación hídrica, que sea flexible y adaptativa, pero clara y comprensiva. La gestión debe aprovechar los mercados del agua, aunque estén muy condicionados por las circunstancias de cada país y grupo social. Es algo de lo que se tiene poca experiencia práctica. Se requiere una toma de compromisos que evite rigideces, sin caer en descontrol, y que ponga la planificación al servicio de la Sociedad, con la participación de la misma y no como un objetivo en sí misma.

Las aguas subterráneas siguen siendo un recurso mal entendido y poco atendido. Esto sucede a pesar de que se pueden conocer razonablemente, del reconocimiento de su papel clave en el conjunto de los recursos hídricos y de la demostración de sus aspectos favorables para el abastecimiento ordinario, la obtención de agua potable y el aumento de la garantía de disponibilidad de agua en sequías y emergencias. Esto se explica no solo por persistir cierto grado de desconocimiento y de infundada desconfianza en los gestores del agua y del territorio, sino también por razones oportunistas, corporativas o de grupos de presión, tales como menor espectacularidad, ausencia de grandes obras, menores inversiones iniciales, y desinformación del público y de los medios de comunicación. Es un aspecto que lentamente tiende a corregirse en los países industrializados -no sin notables situaciones de ineficiencia en la gestión- pero que persiste en los países en vías de desarrollo, donde es más necesaria una correcta actuación para obtener las necesarias mejoras sociales, hacer el mejor uso posible de los limitados recursos económicos y

proteger al ambiente y los acuíferos. En esta línea se abre un gran reto de futuro en el que la ciencia y la técnica son importantes, pero en el que los aspectos económicos, sociales y éticos han de pasar a dominar el comportamiento. No deja de ser significativo que en el texto de Fetter (1994) se dedique una sección entera a las cuestiones éticas relacionadas con la profesión de hidrogeólogo.

Sobre la calidad y contaminación del agua subterránea.

El consumo humano y la aplicación a la mayoría de actividades del hombre requiere no solo disponer de la cantidad de agua suficiente sino con una calidad apropiada. En el caso de la bebida, contacto con el cuerpo y preparación de alimentos –y también para la producción de los mismos– las sustancias y componentes tóxicos y nocivos deben estar ausentes o por debajo de límites establecidos, y muchos contenidos deben mantenerse entre ciertos límites para no producir alteraciones al organismo. Todo ello se refleja en guías recomendadas y en normativa de obligado cumplimiento. Si bien las aguas subterráneas por lo general están exentas de gérmenes patógenos cuando las captaciones están bien diseñadas, construidas y operadas, en ocasiones esas aguas pueden tener una excesiva salinidad, un exceso de ciertos solutos, algunas concentraciones inconvenientes e incluso tóxicas, y una temperatura inadecuada. Todo ello es actualmente bien conocido y en la mayoría de los casos corregible. Pero la explotación intensiva de ciertos acuíferos puede producir el desplazamiento de otras aguas subterráneas de mala calidad que esté en acuitardos, otros acuíferos o porciones del propio acuífero en explotación, o inducir la entrada de aguas fluviales, lacustres o marinas. El conocimiento de los acuíferos se puede ir desarrollando de forma progresiva y suficiente a medida que se produce la explotación. Al igual que sucede con las aguas superficiales existen incertidumbres, aunque de carácter distinto, que hay que tener en cuenta. En este campo las técnicas de toma de decisiones bajo incertidumbre y de análisis del riesgo son aún incipientes y requieren desarrollo científico-tecnológico, así como su traslado a los estamentos de gestión, sociales y políticos.

Posiblemente el peligro mayor para el uso sustentable de los recursos de agua subterránea esté en la contaminación (Fetter, 1982). Al tratar del flujo del agua subterránea y del transporte de masa ya se han comentado los aspectos científico-

técnicos involucrados, así como lo que ya se conoce y lo que hay que desarrollar desde el punto de vista conceptual. Está universalmente admitido que la prevención de la contaminación es el mejor y quizás único camino a seguir para salvaguardar el papel clave del agua en la Naturaleza y como recurso hídrico, y muy especial en lo que hace referencia a las aguas subterráneas. Esta prevención, basada en principios científicos, debe traducirse en conceptos manejables por el gestor del territorio y del agua, y adecuados para ser presentados a los agentes sociales. En este campo se ha desarrollado el concepto de vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, que se define como una propiedad del medio (NCR, 1993 a). La vulnerabilidad y la carga de contaminante conforman el riesgo. Estos conceptos aún requieren desarrollo, plasmación en documentos prácticos y técnicas de elaboración que sean apropiadas para ser utilizadas en la ordenación territorial, la cual debe abarcar y combinar un amplio aspecto de objetivos sociales y no solo el hídrico.

Una vez que un acuífero está contaminado, o que el contaminante está ya en el medio no saturado y es desplazado por el agua de recarga, la descontaminación es una tarea difícil, lenta y muy costosa. En algunos países se intenta obligar a la restauración de los acuíferos contaminados, lo que puede llegar a ser una tarea inabordable. Si no es viable, por lo menos debe obligarse a contener la contaminación existente para no destruir más recursos de agua y no afectar a las actividades humanas sobre el territorio. Así ha nacido en las últimas dos décadas un interesante campo tecnológico de remediación de acuíferos, cuyo desarrollo va adquiriendo cuerpo poco a poco. No obstante, a un gran número de sustancias con características muy variables, en situaciones diversas, se une el hecho de que la remediación es algo muy específico de cada lugar y de cada sustancia contaminante, tanto en método como en coste y duración. Los resultados varían con los objetivos perseguidos. Aquí existe un gran campo de investigación básica y aplicada, y de desarrollo, sólo iniciado. Con seguridad va a demandar gran cantidad de especialistas con una sólida formación y capaces de ingeniar dispositivos adaptados a cada situación.

Lo anteriormente expuesto hace referencia principalmente a la contaminación puntual o en áreas pequeñas. La contaminación difusa que crea la agricultura, la ganadería, la urbanización

extensiva y la deposición de contaminantes aerotransportados es mucho más insidiosa. Además de los nitratos –de comportamiento bien conocido- puede incluir sustancias de dudosa degradabilidad, como ciertos plaguicidas, determinados disolventes orgánicos e hidrocarburos, y algunos fármacos. Aquí se requieren más conocimientos sobre la cinética de las reacciones de biodegradación y de cómo influir en las mismas, así como mejoras en las técnicas analíticas de detección y medida.

Bajo otro aspecto, el terreno puede ofrecer características apropiadas para mejorar la calidad del agua subterránea, natural o afectada antrópicamente, o incluso de aguas superficiales y residuales, combinando el largo tiempo de permanencia con la sorción y con la actividad bioquímica. Las posibilidades son muy numerosas. Ya existen técnicas para eliminar Fe y Mn, y quizás NO_3^- y PO_4^{3-} , pero queda un amplio espectro de posibilidades por explorar. Este es otro campo en el que se esperan notables desarrollos y en el que la Bioquímica debe jugar un importante papel (NRC, 1993b).

La contaminación de las aguas subterráneas es también un tema actual y pendiente en España en lo que hace referencia tanto al aceptable conocimiento de su extensión como a la aplicación de normas de protección y de acciones de remedio (Samper et al., 1998).

Agradecimientos y nota final.

Los autores agradecen al Consejo de Redacción de la Revista la invitación para preparar este artículo y la confianza puesta en ellos, ya que se trata de una petición de opinión. Este artículo es una actualización, extensión y desarrollo de otro anterior, preparado por invitación del CSIC (Custodio et al., 1994). Los autores son conscientes de su posible visión parcial de algunos problemas, de los sesgos que introduce la dedicación profesional preferente a unos aspectos, y de que al considerar cuestiones que no están en sus líneas de trabajo se puede incurrir en imprecisiones o descuido de algunos aspectos. Las ideas expuestas expresan un consenso básico de los autores –y no todas han de ser compartidas en detalle por cada uno de ellos- y por supuesto no tienen por qué coincidir con la de los organismos en los que desarrollan su actividad profesional, docente e investigadora.

Referencias.

- Appello, C.A.J., Postma, D. (1993). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema: 1-536.
- Aechebach-Hertig, W., Peeters, F., Bayerle, U., Kipfer, R. (1999). Interpretation of dissolved atmospheric noble gases in natural waters. *Water Resources Research*, 35 (9): 2779-2792.
- Chapelle, F.H. (1993). *Groundwater microbiology and geochemistry*. Wiley: 1-424
- Custodio, E., (2000). *Groundwater-dependent wetlands*. Acta Geologica Hungarica. Budapest (in press).
- Custodio, E., Llamas, M.R., Sahuquillo, A. (1994). Situación y necesidades en la gestión del agua. *Fronteras de la Ciencia y la Tecnología*. CSIC. Madrid, 3:22-25.
- Custodio, E., Llamas M.R. (1976). *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega. Barcelona. 2 Vol: 1-2350 (2ª. edic. 1985).
- Custodio, E., Llamas, M.R., Samper, J. (ed.) (1997). *La evolución de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Asoc. Intern. Hidrogeólogos/Grupo Español e Instituto Tecnológico Geominero de España, Madrid: 1-455.
- Dooge, S.C.I. (1999). *Hydrologic science and social problems*. Arbor. Madrid, CLXIV, 646: 191-202.
- Fetter, C.W. (1983). *Contaminant hydrology*. Prentice-Hall: 1-458.
- Fetter, C.W. (1996). *Applied hydrogeology* (3rd. ed.). Prentice-Hall
- Freeze, R.A. (1975). A stochastic-conceptual analysis of one dimensional groundwater flow in non uniform heterogeneous media. *Water Resources Research*, 11 (5): 7-25.
- Gómez-Hernández, J.J., Sahuquillo, A., Capilla, J. E. (1997). Stochastic simulation of transmissivity fields conditional to both transmissivity and piezometric data: I- theory. *J. Hydrology*, 203: 162-174.
- Lichterer, P.C., Steefel, C.I., Oelkers, E.H. (ed.) (1996). *Reactive transport in porous media*. *Reviews in Mineralogy*, Min. Soc. Am., 34:1-438.
- Llamas, M.R. (1999). El agua como elemento de cohesión social. Homenaje a Don Angel Ramos Fernández. *Real Academia de Ciencias*. Madrid: 197-215.
- Llamas, M.R., Back, W., Margat, J. (1992). Groundwater use: equilibrium between social benefits and potential environmental costs. *Applied Hydrogeology*. Heirse, 1 (2): 3-14.
- Manning, C.E., Ingebuitsen, S.E. (1999). Permeability of the continental crust: implications of geothermal data and metamorphic systems. *Reviews of Geophysics*, 37: 127-150.
- Narasimhan, T.N. (1999). Fourier's heat conduction equation: history influence, and connections. *Reviews of Geophysics*, 37 (1): 151-172.
- NCR (1993a). *Groundwater vulnerability assessment*. National Research Council. National Academy Press. Washington D.C.; 1-204.
- NRC (1993b). *In situ bioremediation*. National Research Council. National Academy Press. Washington D.C.: 1-207.

- NRC (1996). Rock fractures and fluid flow. National Research Council. National Academy Press. Washington D.C. 1-551.
- Price, M. (1996). Introducing groundwater. S. Thornes Ltd., Cheltenham, UK: 1-278.
- Russell Boulding, J. (1995). Soil, vadose zone, and groundwater contamination. Lewis: 1-948.
- Samper, F.J., Sahuquillo, A., Capilla, J.E., Gómez, J.J. (1998). La contaminación de las aguas subterráneas en España: un problema pendiente. Asoc. Intern. Hidrogeólogos/Grupo Español e Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.
- Simmers, I., Villarroya, F., Rebollo, L. (ed.) (1992). Selected papers on aquifer overexploitation. Intern. Assoc. Hydrogeologists. Heise, 3.
- Simmers, I. (ed.) (1997). Recharge of phreatic aquifers in semi-arid areas. International Association of Hydrogeologists. Balkema. 19: 1-277.
- Zang, Y. (1999). H₂O in rhyolitic glasses and melts: measurement, speciation, solubility, and diffusion. Reviews of Geophysics. 37 (4): 493-516.