©IGME. MADRID 2002. ISBN. 84-7840-472-4

DESARROLLOS CIENTÍFICOS Y NUEVAS TENDENCIAS EN HIDROGEOLOGÍA

A. Sahuquillo

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

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 este artículo se presenta la visión del autor sobre los logros más importantes de los ultimos años en la Ciencia Hidrgeológica la situación actual y la evolución futura de algunos temas concretos.

Palabras clave: *hidrología subterránea, hidrogeología, aportaciones recientes, estado actual, tendencias.*

ABSTRACT

Groundwater hydrology is a branch of Hydrology dealing with the different states and location of water below land surface. Groundwater hydrology considers groundwater not only as a resource but also its essential role in Nature, in geomorphology and in Earth's geodynamics. It Science and Engineering. Its basic principles are reasonably established, but there are still numerous aspects to be developed, from the scientific as well as the applied point of view. The scientific and technical aspects should be jointly considered with the corresponding economical and social issues. This paper presents the author' point of view of the more relevant achievements in Groundwater Hydrology, the current situation and its probable future evolution

INTRODUCCIÓN

La Hidrología ha experimentado avances muy importantes en el último tercio de siglo. Sin duda estos avances están ligados con el aumento de potencia de los ordenadores que permite realizar modelos y simulaciones en los que se tienen en cuenta muchos más fenómenos. Pero sin duda es la posibilidad de realizar modelos distribuidos con los que se pueden abarcar cuencas más amplias a distintas escalas es lo que está permitiendo abrir cada vez más las posibilidades de estos modelos. Pero no es este aspecto el que más ha influido en la apertura de horizontes de la Ciencia Hidrológica. Desde hace algún tiempo se está reivindicando la importancia de la Hidrología como una componente de las Ciencias Geofísicas o Ciencias de la Tierra que según Eagleson (2000) habría pervertido su autenticidad, y comprometido su eficacia, por su relación demasiado estrecha con la Ingeniería y los Recursos Hidráulicos. Esto parece muy

claro con respecto a los problemas más nuevos que han surgido en relación con las ciencias hidrológicas, los problemas ambientales, el cambio climático y la contaminación. 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. Gran parte del devenir presente y de los retos futuros de la Hidrología subterránea no están en los aspectos más estrictamente científicos y tecnológicos - aun 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.

La Hidrología Subterránea es quizás la parte de la Hidrología que ha tenido avances más importantes durante los últimos años (Soorosian, 1993). Avances ocasionados sin duda por las investigaciones realizadas para entender mejor y poder solucionar los problemas de contaminación y limpieza de acuíferos y al almacenamiento de residuos tóxicos y peligrosos.

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.

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 flujo y transporte de contaminantes en la zona no saturada es otra de las facetas que ha experimentado avances muy importantes por las mismas razones que se indicaron anteriormente. Lo mismo sucede con el flujo y transporte multifásico debido al hecho de que la mayoría de los procesos de contaminación se inician en el suelo y tienen que atravesar la zona no saturada. Además algunos de los más peligrosos y difíciles de tratar están originados por líquidos no miscibles, los NAPLs.

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 la Ingeniería de Recursos Hidráulicos,

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. Los problemas ecológicos, ambientales, de calidad de las aguas, los cambios en la calidad de las aguas superficiales y subterráneas, y la contaminación del agua en cualquiera de sus estados preocupaba mucho menos hace una veintena de años que en la actualidad. El análisis, determinación y corrección de los efectos negativos ambientales y sobre la cantidad del agua son requerimientos éticos a los que debe darse una respuesta adecuada en las actuaciones profesionales.

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.

Este artículo es una visión personal del autor, pero es preciso resaltar que la mayor parte de las ideas y criterios se han tomado de dos trabajos de los que es coautor, (Custodio *et al.*, 1994, 2000) que tratan exactamente el mismo tema tratado en este. En él se ha querido poner más énfasis en los aspectos científicos y técnicos que en los aspectos de carácter económico y social, aunque son los que están adquiriendo mayor relevancia. En nuestro país están también de actualidad con ocasión del Plan Hidrológico Nacional. En la Figura 1 se incluye un diagrama de los ciclos y problemas del agua.

RECURSO ECONÓMICO - ELEMENTO AMBIENTAL

SUJETO TECNOLÓGICO

Usos del agua ⟶ *Alteración ciclo natural* ⟶ *Periodo transitorio hasta nuevo equilibrio*

⇓

⇓

Ciclo hidrológico (Relaciones entre aguas superficiales y subterráneas)

Modelos de flujo

⇓

⇓

Ciclos biogeoquímicos. (Alteraciones ecológicas y ambientales)

Modelos de transporte y otras técnicas

ASPECTOS CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS

SOCIOECONÓMICOS Y POLÍTICOLEGALES

PROBLEMAS ETICOS

Figura 1. Los ciclos y problemas del agua

ASPECTOS CIENTÍFICOS Y TECNOLÓGICOS

Para exponer los limites del dominio de la Hidrología Subterránea vamos a enumerar los campos de la ciencia y de la técnica con los que está relacionada o que la utilizan. En el Cuadro 1 se pueden ver los campos diferentes, las técnicas y aplicaciones que se utilizan y los desarrollos científicos y tecnológicos relacionados.

CAMPO	TECNOLOGÍA	DESARROLLOS Y TECNICAS
Agua como recurso	Ingeniería hidráulica	Hidrología Gestión del agua Uso conjunto
Agente geotécnico	Ingeniería Civil Minería	Hidrodinámica
Agente ambiental	Tecnologías ambientales	Hidrodinámica Hidroquímica Flujo y transporte
Agente geológico y geomorfológico	Metalogenia Tectónica Migración-acumulación de hidrocarburos	Hidrodinámica Hidroquímica Flujo y transporte
Geotermia	Energía	Flujo y transporte
Flujo zona no saturada y drenaje	Agronomía y contaminación aguas subterráneas	Flujo y transporte no saturado

Cuadro 1. Aspectos científicos y tecnológicos

El *agua como recurso* es el campo clásico dominado por la *Ingeniería Hidráulica* o la *Ingeniería de Recursos Hidráulicos.* Los aspectos científicos y tecnológicos de que se sirven son la Hidrología y la gestión del agua. Ha sido el motor fundamental de la Hidrología Subterránea. En los últimos años se ha producido un desarrollo importante de la utilización conjunta de las aguas superficiale y subterráneas en España con un planteamiento distinto del utilizado en California y en general en muchos de los estados del Oeste de los USA en los que se practica mayoritariamente la recarga artificial de acuíferos. En España y de forma más importante en la Comunidad Valenciana se viene aplicando la estrategia de utilización conjunta alternativa en la que una parte de la demanda se puede servir con las dos fuentes de recursos, superficial y subterráneo. En los años secos se utilizan más aguas subterráneas y cuando hay más disponibilidades en los ríos, o más agua almacenada en los embalses, se aprovechan más las superficiales. Esto permite utilizar más agua superficial sin recurrir a la recarga artificial. El almacenamiento de los acuíferos se consigue por las variaciones de almacenamiento de la utilización alternativa. Presenta ventajas evidentes sobre todo por el coste en general elevado de la recarga artificial que no es este el lugar para discutir. La utilización alternativa requiere por el contrario unas técnicas de análisis mucho más elaboradas que la gestión del uso conjunto cuando se aplica la recarga artificial. La simulación de la utilización

alternativa requiere analizar conjuntamente los sistemas superficial y subterráneo y las interacciones entre ambos. Esto se realiza con mucha más facilidad a través del método de los autovalores. Para analizar sistemas complejos de recursos hidráulicos se ha desarrollado por el Departamento de Ingeniería Hidráulica de la Universidad Politécnica de Valencia un Sistema Soporte de Decisión denominado AQUATOOL que presenta ventajas evidentes sobre los métodos utilizados hasta ahora (Andreu *et al.,* 1996; Andreu y Sahuquillo, 1987)

El agua subterránea tiene gran importancia en muchos problemas geotécnicos. La presión intersticial es esencial en la estabilidad de taludes, en la estabilidad de las cimentaciones de embalses, en la construcción de túneles y los flujos subterráneos son determinantes en agotamientos y en los problemas de filtración de embalses. También son importantes los relacionados con la subsidiencia del terreno producida por la disminución de niveles en acuíferos semiconfinados y en muchos otros procesos. Hasta hace relativamente poco tiempo no se utilizaban las tecnologías hidrogeológicas para valorar los procesos hidrodinámicos que intervienen en muchos de estos procesos o para identificar las propiedades de los medios permeables. Cada vez más se están utilizando las técnicas hidrogeológicas, pero no obstante parece necesario no solo que se utilicen estas tecnologías sino que se integre el análisis del medio estudiado en el modelo conceptual del flujo de la zona en la que esta localizada la obra o cimentación correspondiente. Por ejemplo no es raro encontrar interpretaciones erróneas sobre la existencia de piezometrías altas en zonas de flujo regional ascendente y confundirlas con subpresiones provocadas por la implantación de un embalse, o con la existencia de zonas de mayor permeabilidad conectadas a otras de mayor nivel piezométrico.

En España son cada vez más numerosos los efectos ambientales sobre algunas zonas húmedas producidas por la explotación de algunos acuíferos, o por las posibilidades de contaminación por la implantación o el aumento de los riegos. Tenemos ejemplos notables en las Tablas de Daimiel, Parque de Doñana, marjales de la cuenca del Júcar y otros humedales continentales. Las tecnologías a emplear en estos casos son las clásicas de la Hidrodinámica e Hidroquímica y los modelos de Flujo y Transporte.

Ya se ha hecho mención a los procesos de metalogénia en los que interviene el flujo subterráneo, pero son muy numerosos los procesos geológicos y geomorfológicos en los que también interviene que no son solo los de la geomorfología karstica. La presión intersticial interviene en los grandes deslizamientos y en los procesos tectonicos de producción de cabalgamientos o generación de terremotos como puso de manifiesto Hoover ya en la primera mitad del siglo XX. La generación de terremotos producida por la inyección de líquidos residuales en Rangely Colorado USA, o por la presurización secundaria de campos petroliferos se ha puesto de manifiesto con modelos de flujo adecuados en los que se simularon los aumentos de la presión intersticial sobre las fallas en las que se originaron los movimientos. También en este caso hay que recurrir a la hidrodinámica e hidrodinámica y resolver problemas de flujo y transporte.

La existencia de flujos locales intermedios y regionales a la que han contribuido, como en otros campos, de forma notable los hidrogeólogos canadienses Toth (1963), Freeze y Witherspoon (1967), puede explicar entre otras cosas la emigración y acumulación de hidrocarburos en grandes cuencas sedimentarias.

Para los problemas relacionados con la geotermia se recurre a la modelación de flujo y transporte de calor.

Como hemos comentado anteriormente los problemas de flujo y transporte de contaminantes en la zona no saturada han provocado un aumento del interés por el flujo y transporte en medios no saturados. Aumentando el interés clásico sobre el mismo en los problemas agronómicos y de drenaje.

LOS FUNDAMENTOS 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 substancias 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 isotermas 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 hidraúlica, 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 gausiana, 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 influida 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 hidraúlica 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 medi-

dos 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 Montecarlo. 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 hidraúlico 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 RECARGA A LOS ACUÍFEROS EN ZONAS ÁRIDAS

Se conocen bien los mecanismos de la recarga a los acuíferos pero es difícil su cuantificación (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 la precipitación, temperatura y las características del suelo, vegetación y pendiente. Es una magnitud con una incertidumbre asociada importante, no sólo a causa de su cuantificación en un punto concreto de la cuenca sino de la variabilidad espacial de las características del terreno sobre la que se produce. También hay que tener en cuenta las incertidumbres en la medida de la lluvia y su variabilidad espacial. 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 (despla-

zamientos en la media y/o mediana). 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, como ocurre con los métodos isotópicos y con los que utilizan la medida del Cl^-. 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.

La recarga por la escorrentía superficial en zonas áridas o en abanicos aluviales se produce por 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. La escorrentía superficial que se produce está muy pocas veces aforada, y probablemente en los casos en que existen aforos estos pueden ser ocasionales y con errores probablemente muy grandes. Su caracterización requiere estudios más detallados. Las observaciones sobre la incidencia de estas recargas sobre la piezometría del acuífero puede ayudar en algunos casos a cuantificarla algo mejor, pero no es corriente disponer del número de piezómetros o puntos de observación adecuados y de medidas hechas en los momentos oportunos (Sahuquillo, 1997). En estos tipos de recarga los aspectos isotópicos del agua tienen una relevancia especial, (Custodio *et al.,* 2000).

LOS MÉTODOS HIDROGEOQUÍMICOS.

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 ^{2}H) y de algunas substancias disueltas (^{13}C, ^{15}N, ^{32}S), y la datación derivada de algunos radioisótopos naturales cosmogénicos o introducidos en la atmósfera a gran escala (^{3}H, ^{14}C, ^{36}Cl). 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 (Custodio *et al.,* 2000).

La caracterización de substancias 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 substancias están presentes, y por otro para la medida de substancias 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 incor-

poran con el proceso de recarga, incluso de recarga en épocas pretéritas cuando se trata de substancias persistentes, pero sin duda su interés está relacionado con la contaminación de los acuíferos. 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, el programa NAWQA del Servicio Geológico de USA va a aportar metodologías y experiencia del máximo interés para conocer mejor los procesos de contaminación y degradación de contaminantes en las aguas superficiales y subterráneas y en las estrategias de toma de muestras y programación de redes de observación.

AVANCES EN LA MODELACIÓN NUMÉRICA DEL FLUJO Y TRANSPORTE

En los últimos años se han conseguido avances notables en la modelación del flujo y transporte de masa. Asimismo la modelación del transporte calor en el terreno ha tenido un importante desarrollo en las dos últimas décadas. Actualmente no son raros los modelos estocásticos del orden del centenar de miles de nudos en los que se realizan un número importante de simulaciones estocásticas, o simulaciones inversas para calibrar parámetros en los que es preciso realizar un número muy importante de iteraciones sucesivas para conseguir la convergencia de los algoritmos. También se realizan simulaciones estocásticas inversas con un número muy importante de nudos. 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.

	Flujos locales, intermedios y locales
	Flujo en formaciones poco permeables
	Flujo en medios fisurados
	Análisis y modelación geoquímica
Flujo	**→ Hidrología estocástica**
	Flujo en medios heterogéneos
	Geoestadística aplicada a la Hidrología Subterránea
	Análisis de incertidumbre
Transporte	
	Crítica del concepto de dispersión hidrodinámica
Modelación	
	Medios heterogéneos
	Medios fisurados
	Transporte reactivo
	Modelos 3D
	Calibración automática de flujo y transporte

Cuadro 2. Algunos avances importantes

En el Cuadro 2 se da una relación de alguno de los campos de la modelación de aguas subterráneas en los que se han realizado y se están realizando avances importantes de los que dadas las características de este trabajo solo hemos citado, o a lo más hecho un comentario muy breve.

Para comprobar el funcionamiento razonable de los modelos y comparar unos códigos de resolución 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 esfuerzos internacionales 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, laboratorios subterráneos de Aspo y Gorleben,...). En relación con el almacenamiento de residuos radiactivos también se está realizando un ejercicio internacional de validación en el campo de los modelos acoplados que pueden ser de flujo, térmicos, mecánico y químico, teniendo en cuenta las interacciones mutuas del flujo, calor, mecánicas y químicas.

CONCLUSIÓN

En este articulo se trata de dar una visión de los avances más recientes en el campo de las aguas subterráneas y de las tendencias e investigaciones más actuales. Dada la madurez y complejidad alcanzada por la Hidrología Subterránea y la especialización a la que los profesionales y científicos que trabajamos en este campo nos hemos tenido que limitar, es una visión necesariamente limitada. Sin duda hay muchos más aspectos que merecían haberse tratado. Otros autores el tiempo y los nuevos desarrollos completaran esta labor nos corregirán y nos enseñaran.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece a Don Juan Antonio Lopez Geta, Director de Hidrogeología y Aguas Subterráneas de Aguas del Instituto Geológico y Minero de España, a la Diputación Provincial de Jaén y a la Universidad de Jaén la invitación hecha para dar la conferencia inaugural de las Jornadas "Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén" celebradas en Linares los días 1, 2 y 3 de Octubre de 2001.

REFERENCIAS

Appello, C.A.J. y Postma, D. 1993. Geochemistry, groundwater and pollution. Balkema 536 pp.

Andreu, J., Capilla, J. y Sanchis, E. 1996. AQUATOOL, a generalised decision support system for water- resources planning and operational management. Journal of Hydrology, 177(96), 269-291.

Andreu, J. y Sahuquillo, A. 1987. Efficient Aquifer Simulation in Complex Systems. Journal of the Water Resources Planning and Management Division, ASCE, 113, (1) 110-129.

Chapelle, F.H. 1993. Groundwater microbiology and geochemistry. Wiley: 424 pp

Custodio, E., 2000. Groundwater-dependent wetlands. Acta Geologica Hungarica. Budapest (in press).

Custodio, E., Llamas, M.R. y Sahuquillo, A. 1994. Situación y necesidades en la gestión del agua. Fronteras de la Ciencia y la Tenología. CSIC. Madrid, 3, 22-25.

Custodio, E. y Llamas, M.R. 1976. Hidrología subterránea. Ediciones Omega. Barcelona. 2 Vol: 1-2350 (2ª. edic. 1985).

Custodio, E., Llamas, M.R. y Samper, J. (ed.) 1997. La evolución de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Asoc. Intern. Hidrogeólogos/Grupo Español e Instituto Técnológico Geominero de España. Madrid. 455 pp.

Dooge, S.C.I. 1999. Hydrologic science and social problems. Arbor. Madrid, CLXIV, 646, 191-202.

Eagleson,P.S.,ed., 1992. Opportunitities in the Hydrologic Sciences, National Academy Press, Washington, D.C.

Fetter, C.W. 1983. Contaminant hydrology. Prentice-Hall, 458 pp.

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 heterogenesus media. Water Resources Research, 11 (5), 7-25.

Freeze, R. A., and Witherspoon, P.A. 1967. Theoretical analysis of regional groundwaterflow: 2. Effect of water-table configuration and subsurface permeability variation. Water Resources Research., 3, 623-634

Gómez-Hernández, J.J., Sahuquillo, A. y Capilla, J. E. 1997. Stochastic simulation of transmissivity fields conditional to both transmissivity and piezometric data: I.- theory. J. Hydrology, 203, 162-174.

Llamas, M.R. 1999. El agua como elemento de cohesión social. Homenaje a Don Ángel Ramos Fernández. Real Academia de Ciencias. Madrid, 197-215.

Llamas, M.R., Back, W. y Margat, J. (1992). Groundwater use: equilibrium between social benefits and patential environmental costs. Applied Hydrogeology. Heise, 1 (2), 3-14.

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. 204 pp.

NRC. 1993b. In situ bioremediation. National Research Council. National Academy Press. Washington D.C., 207 pp.

NRC. 1996. Rock fractures and fluid flow. National Research Council. National Academy Press. Washington D.C., 551 pp.

Price, M. 1996. Introducing groundwater. S. Thornes Ltd., Cheltalham, UK, 278 pp.

Sahuquillo, A. 1997. La evaluación de la recarga de acuíferos en abanicos aluviales, torrentes, piedemontes y cauces efímeros en: La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Custodio, E., Llamas, M.R., Samper, J. (ed.) Asoc. Intern. Hidrogeólogos/Grupo Español e Instituto Técnológico Geominero de España, Madrid, 455 pp.

Samper, F.J., Sahuquillo, A., Capilla, J.E. y 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. (ed.) 1997. Recharge of phreatic aquifers in (semi-) arid areas. International Association of Hydrogeologists. Balkema. 19, 277 pp.

Sorooshian, S. 1993. Water Resources Research, 29 (1), 1-3.

Tóth, J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flowin small drainaje basins. J. Geophysical Res., 68, 4795-4812

Zang, Y. 1999. H_2O in rhyolitic glasses and melts: measurement, speciation, solubility, and diffusion. Reviews of Geophysics. 37 (4), 493-516.