

Hidrología y ciencias de la Tierra: isótopos en el terreno

Algunos países aplican elementos estables y radiactivos con miras a descubrir y resolver los problemas hidrológicos

por Roberto Gonfiantini y Gert Hut



Las técnicas nucleares en que se emplean isótopos constituyen instrumentos precisos y modernos para estudiar los recursos hídricos, y pueden aportar una solución idónea al problema del origen, la distribución y las propiedades del agua en una región dada, especialmente cuando se combinan con otros instrumentos al alcance de hidrólogos, hidrogeólogos y geoquímicos.

La investigación isotópica moderna en hidrología se basa, por una parte, en el descubrimiento de la abundancia natural de carbono 14 y tritio realizado por W.F. Libby en 1946 y, por otra, en la obra experimental y teórica de H.C. Urey y J. Bigeleisen, publicada en 1947, relativa a los efectos de fraccionamiento para los isótopos estables. Si bien las primeras publicaciones sobre la abundancia natural de isótopos en el agua aparecieron pocos años más tarde, la hidrología isotópica no se convirtió en una esfera de investigación aparte hasta el decenio de los 60.

El OIEA comenzó a trabajar en esta esfera poco después de su creación (en julio hace 30 años), a instancias de muchos renombrados científicos. Afortunadamente esta decisión coincidió con un rápido desarrollo de las aplicaciones de las técnicas isotópicas.

Este desarrollo ha quedado de manifiesto actualmente en las actas de siete simposios sobre el empleo de técnicas isotópicas para el aprovechamiento de los recursos hídricos, organizados por el OIEA, varios de ellos en

colaboración con la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). El primer simposio se celebró en Tokio en 1963, y el último en Viena, del 30 de marzo al 3 de abril de 1987. Al mismo asistieron más de 160 científicos procedentes de 45 países y tres organizaciones internacionales.

Isótopos artificiales y ambientales

El trazador ideal para el agua debe tener un comportamiento lo más parecido posible al del agua, y al propio tiempo, ser fácil de detectar, de ser posible in situ, y de inyectar en regiones extensas de un sistema hidrogeológico.

Los isótopos artificiales que emiten radiaciones gamma poseen algunas de estas características, son fáciles de detectar, mientras que los isótopos ambientales, cuya medición es más difícil, se inyectan a todo el sistema mediante procesos naturales.

Los isótopos como el tritio, el deuterio y el oxígeno 18 forman parte de la molécula de agua y, por consiguiente, su comportamiento es idéntico al de la masa de agua del sistema.

Una esfera concreta de la hidrología isotópica se basa en la interacción de la radiación con la materia. Un ejemplo característico es el de la radiación emitida por una fuente que es absorbida por el sedimento transportado en suspensión por el agua de un río. La radiación absorbida es proporcional a la concentración del sedimento en suspensión. Con el empleo de esta técnica se ha obtenido importante información acerca del transporte de sedimentos.

En 30 años de investigaciones y aplicaciones de isótopos a estudios de casos particulares, se ha acumulado una apreciable cantidad de información y conocimientos, por lo que un hidrólogo especialista en hidrología isotópica debe ser capaz de seleccionar los isótopos y

Los señores Hut y Gonfiantini son funcionarios de la Sección de Hidrología isotópica de la División de Ciencias Físicas y Químicas del OIEA.

Véase la foto en esta página:

Se presta suma atención a la evaluación de los recursos hídricos en países de África y otras regiones. (Cortesía: BRGM, Francia)



El sistema de preparación del gas de tritio figura entre los instrumentos analíticos del laboratorio de hidrología isotópica del OIEA en Viena. (Cortesía: Katholitzky para el OIEA)

técnicas más idóneas para resolver el problema hidrológico. Por ejemplo, se inyectan isótopos artificiales en un punto dado de un sistema hidrológico y se vigilan en otros puntos de éste, por lo general no demasiado lejos, donde se espera que aparezcan. El tiempo transcurrido entre la inyección y la detección, así como la forma de la curva de concentración de los isótopos en los puntos de detección, suministran información detallada y precisa sobre el comportamiento del sistema (en las condiciones prevalecientes durante los experimentos). Para planificar correctamente el experimento se requiere una gran experiencia.

La situación varía en el caso de los isótopos ambientales, que son naturales o artificiales (o ambos simultáneamente), pero cuya distribución en el ciclo hidrológico se rige por procesos naturales. Por eso se inyectan en todo el sistema hidrológico, continuamente o al menos durante largos períodos de tiempo. Los estudios con isótopos ambientales se realizan por lo general en grandes masas de agua —ríos, lagos, aguas subterráneas— y se deducen conclusiones sobre sus principales características, que son válidas durante un tiempo prolongado. Los antecedentes teóricos y la interpretación de los datos de los isótopos ambientales suelen ser más bien complejos y requieren una experiencia notable y un enfoque multidisciplinario.

En cuanto a las aguas subterráneas de los acuíferos, es habitual que se pueda utilizar la concentración de deuterio y oxígeno 18 (isótopos estables) para distinguir diferentes masas de agua y para determinar su origen. Esta determinación se hace en relación con la concentración correspondiente de isótopos estables en la infiltración de precipitaciones en la zona de recarga del acuífero. En ocasiones la concentración de isótopos estables en el acuífero se puede relacionar con la infiltra-

ción ocurrida en un período en que las condiciones climáticas varíen.

Las diferentes composiciones de isótopos estables del agua que proviene de ríos que nacen en las montañas y del agua de precipitaciones locales pueden emplearse para determinar la mezcla de precipitaciones y ríos en las aguas subterráneas. El cambio de la composición de isótopos estables de las aguas en remanso de los lagos suele emplearse para determinar la tasa de evaporación del lago.

Determinación de la edad del agua

Un dato importante es el tiempo de permanencia del agua en un acuífero, llamado también "edad" del agua. Algunos isótopos radiactivos pueden desempeñar un papel, según sus períodos de semidesintegración, para determinar el tiempo que el agua de que se trate estuvo en contacto con la atmósfera. Si el agua subterránea es muy joven, la carga puede depender de la precipitación en determinado año y tras una estación seca puede faltar el agua subterránea. El otro extremo, o sea, agua subterránea muy vieja, puede significar que o hubo recarga y por lo tanto agotamiento de las reservas de agua subterránea.

En concentraciones naturales muy bajas está presente el tritio, isótopo radiactivo de hidrógeno con un período de semidesintegración de 12,43 años. Estas son del orden de unos cuantos picocurios por litro. Debido a los ensayos de bombas termonucleares en la atmósfera en los decenios de los años 50 y 60, la concentración de tritio en las precipitaciones aumentó notablemente; en algunos casos alcanzó casi 1000 veces los niveles naturales. Tras la concertación del Tratado de Prohibición de los Ensayos, las concentraciones de tritio descendieron a valores que actualmente son casi iguales a los de antes de ensayar las bombas. Cuando entra en las aguas subterráneas, esta "señal" de tritio se emplea para determinar si la edad del agua es "posterior o anterior a los ensayos.

El carbono 14, cuyo período de semidesintegración es de 5730 años, es un isótopo ambiental que suele emplearse para determinar la edad. Un serio problema es que el átomo de carbono no forma parte de la molécula de agua, sino del ion de bicarbonato disuelto en ésta, por lo que es preciso tener en cuenta la química del agua.

Se estima que el bicarbonato de las aguas subterráneas está compuesto de carbono procedente de dos fuentes diferentes, a saber, del humus del suelo, infiltrado con la precipitación, y del carbonato marino del acuífero, disuelto por el agua subterránea. El primer carbono contiene carbono 14 puesto que está en equilibrio con el dióxido de carbono producido en el suelo por la respiración de las plantas y la composición de la materia orgánica; el carbonato marino ya no contiene carbono 14. Para determinar la edad es preciso conocer la concentración inicial de carbono 14, la del agua recientemente infiltrada. Así, se han creado varios modelos para determinar la fracción de carbono "moderno" y "viejo". En esos modelos, por ejemplo, se emplean las diferentes concentraciones de humus y de bicarbonato marino.

El período de semidesintegración del carbono 14 limita la datación aproximadamente 50 000 años. La concentración de carbono 14 en el carbono moderno es

ya tan baja (10^{-12}), que la medición se realiza convencionalmente mediante conteo de desintegración. Después de aproximadamente 10 períodos de semidesintegración, y una concentración de carbono 14 de 0,001 de la del carbono moderno, la técnica analítica ya no posee la exactitud requerida. El surgimiento de la espectrometría de masas en un acelerador, técnica mediante la cual el conteo de los iones de carbono 14 se hace empleando directamente un acelerador tándem Van de Graaff, permite en principio efectuar la datación más allá de ese límite con una muestra de menor tamaño. No obstante, en la práctica, la contaminación de la máquina ha restringido la determinación de la edad a aproximadamente el mismo margen que con el conteo de desintegración.

Para ampliar el margen de datación es preciso hallar otro isótopo con un período de semidesintegración mayor. Por ejemplo, el cloro 36 tiene un período de semidesintegración de 305 000 años. Se consideraba que la hidroquímica y la geoquímica eran sencillas, sin embargo, la concentración de cloro 36 es tan baja que habría que procesar enormes cantidades de agua para poder medir la desintegración. El desarrollo de la espectrometría de masas en un acelerador ha mejorado la situación puesto que se requieren cantidades mucho menores de cloro. Los resultados obtenidos durante los últimos cinco años aproximadamente indican que en muchos casos, la geoquímica es mucho más complicada de lo previsto.

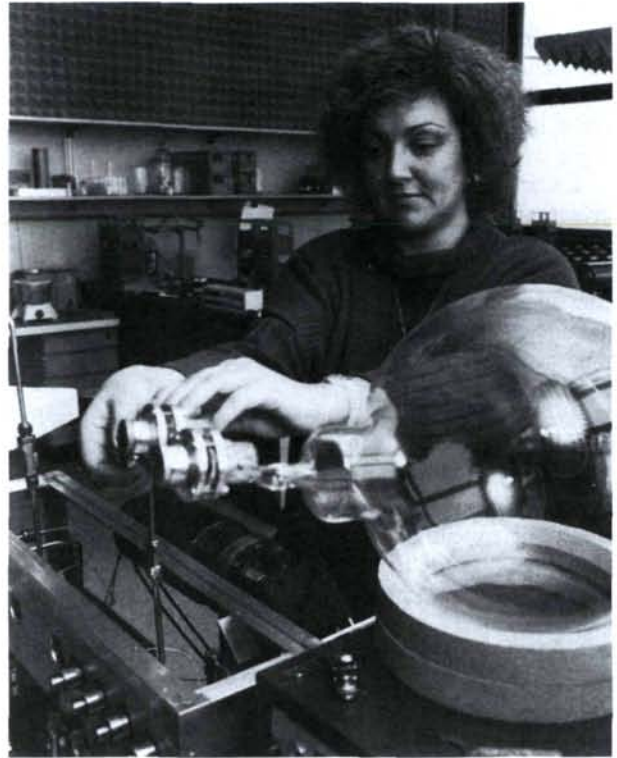
Ahora bien, en algunos casos, los resultados han sido alentadores. Un ejemplo de ello es la aplicación de las mediciones de cloro 36 en el Gran Acuífero Artesiano de Australia. Los adelantos en esta esfera permitirán el estudio de grandes acuíferos como el Intercalar Continental en el Sahara (aproximadamente 600 000 kilómetros cuadrados) o el Botacatu en el Brasil (aproximadamente 1 000 000 de kilómetros cuadrados).

Apoyo y actividades del OIEA

El Organismo ha apoyado todo tipo de aplicaciones de técnicas isotópicas a la hidrología desde que comenzó el programa. Ese apoyo consiste en servicios de expertos, equipos y formación, para llevar a cabo el trabajo de campo y todo el apoyo analítico necesario directamente en el país interesado. No obstante, en el caso de las aplicaciones de los isótopos ambientales, dado que sólo un limitado número de países cuenta con capacidad de laboratorio para realizar los análisis, éstos se realizan en el laboratorio de hidrología isotópica del Organismo, situado en Viena. El OIEA también fomenta el desarrollo de nuevas técnicas y el perfeccionamiento de las existentes con miras a mejorar los análisis y hallar métodos teóricos más complejos de interpretación de los datos.

Son incontables los ejemplos de aplicaciones realizadas con el apoyo del Organismo, y algunas de las más importantes se han hecho en los últimos años o se están realizando en estos momentos.

● **Africa septentrional.** A comienzos del decenio de los años 80 el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) comenzó un proyecto en los tres países del Maghreb, Argelia, Marruecos y Túnez, en Africa septentrional con el objetivo de evaluar los recursos hídricos, especialmente las aguas subterráneas, ya



María de Conceicao Ribeiro Vieira, de Portugal, recibe adiestramiento científico como becaria en el laboratorio de hidrología isotópica en Viena. (Cortesía: Katholitzky para el OIEA)

que estos países son muy áridos o semiáridos. Además, una parte del programa de trabajo se dedicó a las técnicas para aumentar los recursos hídricos: por ejemplo, la recarga artificial de agua subterránea; la depuración y reaprovechamiento del agua usada; la evaluación de la erosión de la tierra y el subsiguiente transporte de sedimentos en suspensión en formas que pueden acortar apreciablemente la vida útil de los embalses. El Organismo decidió por ello crear un proyecto regional paralelo en los tres países para aplicar técnicas isotópicas al estudio de algunos de estos problemas, aprovechando la probada infraestructura establecida para el proyecto del PNUD. Ello redundó en beneficio de las dos partes. Se realizaron estudios en el Sahara tunecino y argelino para determinar la edad y la dinámica del agua subterránea en los dos principales acuíferos, a saber, el Intercalar Continental y el Complexe Terminal, que en principio pueden ayudar en la elaboración de los modelos matemáticos y en la planificación de la explotación. Dada la avanzada edad del agua subterránea, que fue reabastecida hace más de 30 000 años durante el pleistoceno, se prevé la utilización del cloro 36 para determinar su edad.

En el lecho del Wadi N'Fis, cerca de Marrakesh, se emplearon isótopos artificiales para investigar el movimiento del agua en un emplazamiento de infiltración experimental de recarga de las aguas subterráneas. Estos estudios demostraron que la decantación y la precipitación de sedimentos en suspensión en la primera cuenca

no se produjeron con la eficacia requerida debido a desviaciones en la circulación del agua, por lo que se cambió en consecuencia la configuración de la primera cuenca para que los sedimentos quedaran depositados en ella y no en las cuencas siguientes, gracias a lo cual se logró disminuir la tasa de infiltración.

En un emplazamiento cerca de Túnez, se volvió a inyectar agua tritiada junto al agua usada para verificar la eficiencia de depuración del suelo y la propagación del agua reinyectada en el acuífero. Este estudio está aún inconcluso, pero los resultados obtenidos hasta el momento bastan para demostrar la validez del método, y en especial, la validez del tiritio como trazador ideal en el agua.

● **Asia y el Pacífico.** En varios países y regiones los Estados Miembros financian programas coordinados de investigación en hidrología isotópica que el Organismo ejecuta. En un programa de Asia y el Pacífico, financiado por Australia, figuran proyectos de investigación en la República de Corea, Indonesia, Tailandia, Malasia y Sri Lanka. Este programa concluirá este año con un taller en China.

● **América Latina.** Otro programa coordinado de investigación, esta vez financiado por la República Federal de Alemania, tiene por objeto desarrollar el empleo de las técnicas isotópicas en hidrología en América Latina. En este programa participan diez países, a saber, Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Cuba, Chile, Ecuador, Guatemala, México y la República Dominicana, y concluirá en 1987 con un seminario en Ciudad México, D.F. Un tercer programa, financiado por Italia, tiene por objeto demostrar las posibilidades de las técnicas isotópicas y geoquímicas en la exploración geotérmica. También se orienta hacia la América Latina e incluye Argentina, Bolivia, Colombia, Costa Rica, Ecuador, Guatemala, Perú y Venezuela. La mayoría de los países de América Latina poseen importantes recursos geotérmicos que hasta el presente se han explotado exclusivamente en México y El Salvador. México, que pronto se

incorporará al programa, es actualmente el tercer productor de electricidad geotérmica del mundo, precedido por los Estados Unidos y Filipinas y seguido por Italia*.

Recursos hídricos en países áridos

Se ha dedicado especial atención a la evaluación de los recursos de las aguas subterráneas en los países áridos. Los isótopos son, de hecho, uno de los instrumentos más eficaces para investigar si se han recargado las aguas subterráneas y determinar si hay aguas subterráneas fósiles, es decir, el agua que se ha recargado en condiciones climáticas más húmedas en el pasado**. Se han realizado estudios apoyados por el Organismo en numerosos países áridos de África y Asia. En fecha reciente se emprendieron dos proyectos regionales, uno de ellos en tres países de África occidental, Malí, Níger y Senegal, y el otro en África oriental, incluidos Egipto y Sudán. Este segundo programa cuenta con financiación de la República Federal de Alemania.

Apoyo en materia de capacitación

El Organismo apoya también firmemente la capacitación. Este año, por primera vez, la Sección de Hidrología Isotópica organizó la capacitación de grupos integrada por conferencias, adiestramiento en laboratorios y trabajos científicos en un proyecto de campo. En este experimento de capacitación participan becarios de Albania, Egipto, Colombia, Portugal, Filipinas, Jordania, Sudán, Chipre e Indonesia. Si se obtienen resultados satisfactorios se repetirá para que puedan participar otros científicos.

* Véase "Los isótopos en la exploración de energías geotérmicas", *Boletín del OIEA*, Vol. 25, No. 2 (1983).

** Véase "La investigación de los recursos hídricos del desierto: la contribución de los isótopos", *Boletín del OIEA*, Vol. 23, No. 1, (1981)

Un simposio sobre recursos hídricos despierta gran interés

Con miras a solucionar los problemas prácticos, los hidrólogos, los geoquímicos y otros científicos utilizan cada vez más los isótopos estables y los radisótopos como instrumentos útiles y a veces únicos de investigación en acuíferos, lagos, embalses, ríos y estuarios. Los isótopos, elementos que existen en el medio ambiente o se producen artificialmente, se utilizan como trazadores para explicar las propiedades y características del agua y para evaluar las perspectivas de suministro en condiciones climáticas y geográficas diferentes. Se aplican además, por ejemplo, al estudio de los movimientos del agua y de los sedimentos, la salinización y la contaminación. En las investigaciones hidrológicas son isótopos importantes el deuterio (hidrógeno 2) y el oxígeno 18, ambos estables, así como el tritio (hidrógeno 3) y el carbono 14, que son radiactivos.

En un simposio internacional celebrado en Viena del 30 de marzo al 3 de abril de 1987, más de 160 científicos e investigadores de 45 países y de tres organizaciones internacionales analizaron el uso de estas técnicas nucleares y afines en las investigaciones hidrológicas.

Patrocinado conjuntamente por el OIEA y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), el simposio examinó principalmente informes y documentos sobre investigaciones y estudios sobre el terreno que se realizan en más de 30 países de África, Europa, América Latina y otras regiones. Fue el séptimo de una serie que comenzó en 1963, organizada por el OIEA para fomentar el intercambio de información científica y de resultados de las investigaciones en esta importante esfera. Mediante su programa de cooperación técnica, los contratos de investigación y otros mecanismos, el Organismo presta además apoyo financiero directo y asistencia de expertos para proyectos hidrológicos en todo el mundo. La cooperación con la UNESCO tiene lugar en el marco de un programa hidrológico internacional cuyo objetivo es contribuir a que los países en desarrollo apliquen eficazmente las técnicas y los medios para solucionar los problemas del agua tanto locales como regionales.

Las actas del simposio se publicarán más avanzado el año en curso.