

Técnicas nucleares para investigar la migración de contaminantes en las aguas subterráneas

Informe sobre algunas aplicaciones prácticas para prevenir la contaminación de los recursos hídricos

por V.T. Dubinchuk, A. Plata-Bedmar y K. Froehlich

La protección contra la contaminación de los recursos hídricos ha sido un tema prioritario en los últimos años.

Las aguas subterráneas, por lo general más puras y limpias que las superficiales, están protegidas naturalmente por un excelente sistema de filtración formado por el suelo, arcillas y otras formaciones rocosas que eliminan algunos componentes solubles, partículas en suspensión, bacterias y la mayor parte de los virus.

No obstante, si este sistema de filtración se sobrecarga o se elude, el acuífero puede contaminarse. El mismo tipo de contaminantes que afecta a las aguas superficiales —incluidos desechos domésticos e industriales, filtraciones procedentes de fosas sépticas, vertidos de minas, vertederos de basuras y productos químicos de uso agrícola— puede tener mayores repercusiones y un efecto más prolongado sobre las aguas subterráneas. En los acuíferos, la contaminación se mantiene por períodos que van de cientos a decenas de miles de años, poniendo en peligro el abastecimiento de agua de las generaciones futuras.

En algunas zonas, los acuíferos están menos expuestos a la contaminación que en otras, ya que las condiciones geológicas e hidroquímicas reducen el riesgo. La sensibilidad de la calidad de las aguas subterráneas a las actividades del hombre que producen su contaminación se designa como "vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación". La vulnerabilidad de los acuíferos se ve afectada por diversos procesos, como asimismo por sus propias propiedades y las del suelo. Es esencial definir qué parámetros caracterizan estos procesos para elaborar modelos y predecir la migración de contaminantes en los sistemas de aguas subterráneas. Los principales objetivos son impedir la contaminación y la degradación de los recursos hídricos subterráneos o, si ya están contaminados, identificar su origen para poder proponer las medidas correctivas.

El OIEA ha prestado especial atención a las aplicaciones prácticas de las técnicas nucleares e isotópicas vinculadas directa o indirectamente a la solución de los problemas de la contaminación de las aguas subterráneas. En este artículo se expone cómo se han aplicado algunas de estas técnicas.

Migración de contaminantes

La zona no saturada o de aireación es una formación geológica de escaso espesor a través de la cual los contaminantes se desplazan desde la superficie terrestre hasta los acuíferos más superficiales. Para estudiar la velocidad con que se mueven las aguas subterráneas y los contaminantes a través del suelo se necesitan instrumentos especiales. En el marco de algunos programas nacionales e internacionales, incluidos los auspiciados por el Organismo, se han realizado, o se están realizando, investigaciones en las que se utilizan esos instrumentos y trazadores isotópicos.

Por ejemplo, en 1985 y 1986, en la región de Crimea se efectuaron investigaciones sobre la salinización de las aguas subterráneas. En la zona de Chernobyl se está estudiando la migración de los radionucleidos liberados por el accidente de la central nuclear en 1986.*

En ambos casos se definió una serie de zonas para llevar a cabo complejas investigaciones con trazadores isotópicos. En dichas zonas se inyectó agua tritiada en el suelo para estudiar su redistribución en tiempo y espacio. El propósito era medir la velocidad del flujo de las aguas subterráneas en la zona no saturada y evaluar el tiempo de permanencia (o edad) de las aguas subterráneas y su tasa de recarga en los acuíferos poco profundos. Simultáneamente, en los mismos emplazamientos se inyectaron contaminantes marcados con isótopos y se observaron sus movimientos.

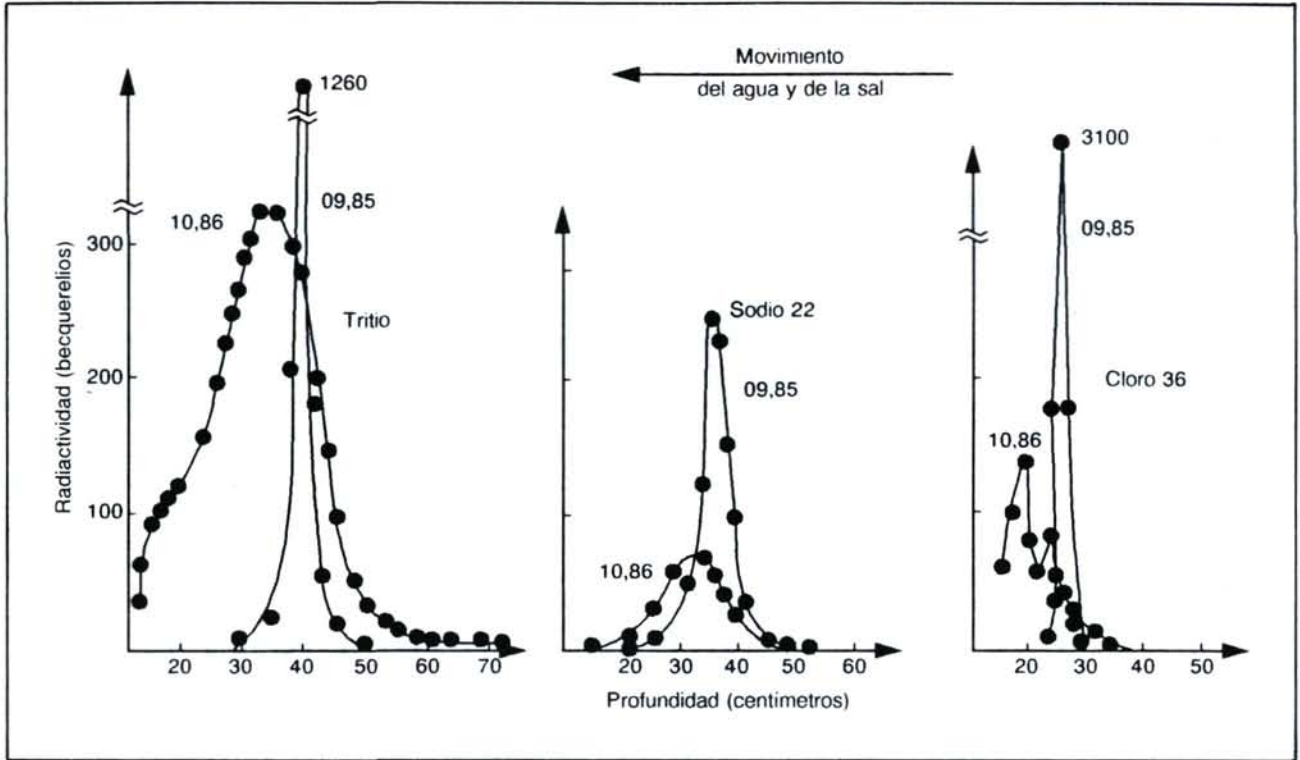
En Crimea, los resultados obtenidos cerca de Djankov demuestran que la sal es acarreada en sentido ascendente debido al alto grado de evapotranspiración y a la poca profundidad del nivel hidrostático. (Véase la figura 1.) El experimento se realizó utilizando el método de trazadores triples (solución de cloruro de sodio en agua tritiada marcada además con sodio 22 y cloro 36).

No obstante, en otros emplazamientos próximos a una zona de intensa aireación, experimentos similares revelaron un movimiento descendente de la sal. La investigación proporcionó información muy útil sobre el transporte *in situ* del agua

* Ambos estudios fueron realizados por los investigadores V.T. Dubinchuk, Yu. A. Tsapenko, A.V. Borodin y A.V. Gladkov, del Instituto de Investigaciones Científicas de Hidrogeología e Ingeniería Geológica de todas las Repúblicas de la Unión situado en Moscú.

Los Sres. Dubinchuk, Plata Bedmar y Froehlich son funcionarios de la División de Ciencias Físicas y Químicas del OIEA.

Figura 1. Experimento de triple trazado realizado en Crimea

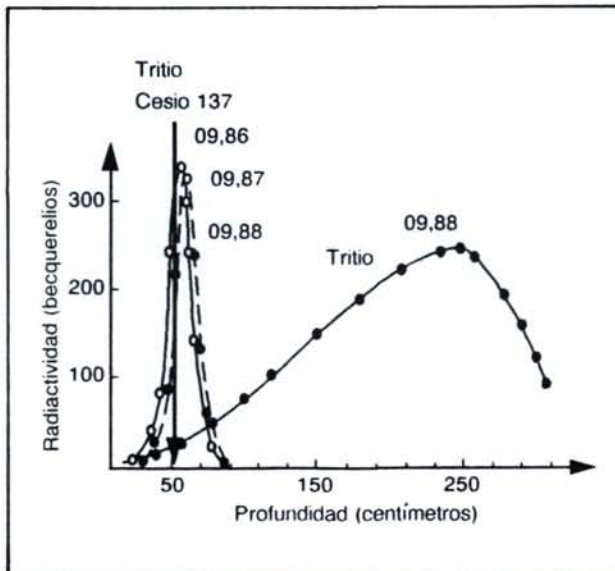


así como de los iones de sodio y cloro. Tales resultados ayudan a comprender mejor los mecanismos y la dinámica de la salinización de los suelos, cuestión particularmente importante para la agricultura de esta región.

En la zona de Chernobil, se llevó a cabo un experimento de doble trazado (agua tritiada y una solución de cesio y cloro marcada con cesio 137). Las inyecciones se realizaron simultáneamente a distintas profundidades para obtener información

válida con fines de pronóstico. (Véase la figura 2.) Los resultados mostraron, de forma explícita, el retardo y la dispersión del cesio con relación al agua, permitiendo una mejor evaluación del riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por este radionucleido.

Figura 2. Experimento de doble trazado en zonas aledañas a Chernobil



Intrusión de aguas contaminadas

Un problema característico de manejo del agua es la intrusión en las aguas subterráneas de aguas contaminadas procedentes de lagos, ríos, o embalses naturales o artificiales.

En Managua (Nicaragua), se realizaron estudios de intrusión en el contexto de un proyecto de cooperación técnica del OIEA.

Las investigaciones se basaron en la aplicación combinada de isótopos ambientales (radiactivos y estables) y trazadores artificiales.

La laguna de Asososca es una de las cuatro principales estaciones de bombeo de Managua, que suministra aproximadamente el 60% del agua que consume la población local. Las aguas de un gran lago cercano, el lago Managua, están altamente contaminadas. (Véase la figura 3.)

La laguna de Asososca, enclavada en el cráter de un antiguo volcán, tiene una profundidad máxima de 90 metros y un diámetro de un kilómetro aproximadamente. Sus aguas provienen del flujo subterráneo que descarga en el lago Managua. Los niveles hidrostáticos de la laguna, así como de las otras tres estaciones de bombeo están por debajo del nivel del agua del lago Managua debido al intenso bombeo de los últimos decenios. Esto hace posible la intrusión de agua contaminada procedente del lago Managua en las aguas subterráneas y en la laguna de Asososca.

Técnicas nucleares e isotópicas

Hay toda una gama de técnicas nucleares e isotópicas que puede ayudar a responder determinadas cuestiones asociadas con el flujo de las aguas subterráneas y la migración de los contaminantes.

Entre las técnicas nucleares, el perfilado nuclear de pozos desempeña una importante función y se basa en la utilización de la radiación nuclear (rayos gamma, neutrones, etc.) para determinar *in situ* las propiedades físico-químicas de los suelos y las rocas. El perfilado gamma natural se basa en la medida de la emisión natural de rayos gamma del suelo, a través de la cual se puede determinar su contenido de arcilla y, de forma indirecta, la permeabilidad. El perfilado gamma-gamma se basa en la dispersión de la radiación gamma emitida por una fuente artificial. La medición de la radiación dispersada en los materiales que rodean el pozo proporciona información sobre la densidad aparente de los suelos. El perfilado con neutrones informa sobre el contenido de agua del suelo. La combinación del perfilado gamma-gamma y neutrón-neutrón permite evaluar varias características, entre ellas, la porosidad (en suelos saturados), la densidad de la matriz del suelo y al grado de saturación (en suelos no saturados). A veces permite la identificación de fracturas en rocas compactas.

Las técnicas isotópicas consisten en la inyección de trazadores artificiales o en el uso de isótopos naturales para estudiar el movimiento del agua y de sus componentes.

El uso de los trazadores tiene una larga historia. Los más sencillos, tales como hojas de árboles y fragmentos de madera y paja, han sido utilizados para observar la dirección y velocidad del agua, así como la interconexión entre las corrientes y los embalses. Más tarde se emplearon diferentes pigmentos y colorantes naturales y artificiales, que todavía se utilizan con este fin.

A fines del siglo XIX y principios del XX, se alcanzó un impresionante desarrollo de las técnicas de trazadores tras el descubrimiento de la conductometría y la colorimetría, las cuales hicieron posible la medición con instrumentos de sales y colorantes utilizados como trazadores del agua en el terreno. Los experimentos hidrológicos con trazadores realizados en la zona en que confluyen el Danubio y el Rin, en Crimea y en el sistema cársico de Dinar, y en otras regiones, son ejemplos del uso que hace esta generación de hidrólogos de esas sales y colorantes.

Pero el verdadero punto culminante del desarrollo de las técnicas de trazadores se alcanzó con el descubrimiento de los isótopos y el desarrollo de los equipos para su medida.

Los isótopos sirven para estudiar la mayoría de los tipos de contaminación, en parte porque pueden prepararse en diferentes formas. A veces son un instrumento singular que ofrece marcadas ventajas en comparación con otros trazadores.

El marcado isotópico es posible tanto para las moléculas de agua como para los productos contaminantes, o para ambos. Los ensayos de migración pueden realizarse a un nivel microscópico y macroscópico, en el plano local, regional e incluso a nivel mundial. El agua y los contaminantes se pueden marcar sin alterar las condiciones y procesos que se investigan. Los experimentos basados en el uso de trazadores isotópicos se pueden

llevar a efecto en condiciones extremas —gran disolución, alto grado de mineralización, turbidez, turbulencia, temperaturas altas y bajas— en que no se puedan aplicar otros trazadores. Además, existe una gran variedad de isótopos naturales en la geosfera y la hidrosfera que pueden utilizarse con éxito para estudiar los procesos de transporte ambiental.

Una ventaja importante de las técnicas isotópicas es que permiten calcular, cualitativa y cuantitativamente, los llamados "parámetros de retardo" del medio geológico en relación con el movimiento de los contaminantes. Por retardo se entiende básicamente las demoras en el transporte de contaminantes en relación con el movimiento del agua; se trata de un fenómeno muy complejo que incluye la absorción/desorción, la difusión/dispersión, la solución/precipitación y muchos otros procesos.

Para ayudar a evaluar el retardo se pueden combinar isótopos diferentes. En las técnicas de "doble trazado" se puede utilizar el tritio (isótopo radiactivo de hidrógeno) como trazador del movimiento del agua y otro isótopo como trazador de un contaminante específico. Las técnicas suministran información valiosa para evaluar los efectos del retardo.

Los mejores resultados se obtienen combinando métodos de laboratorio (muestras sueltas, columna y radiografía) con experimentos de trazadores de campo, incluidos los trazadores isotópicos artificiales y ambientales. Los experimentos de muestras sueltas (en inglés, batch experiments) comprenden el estudio de la redistribución de los componentes marcados entre una solución modelo y una muestra de suelo o roca en condiciones hidráulicas estáticas. De esta forma se pueden estudiar las isotermas de la absorción-desorción, así como los coeficientes de distribución y su dependencia de la hidrogeoquímica del tipo de contaminante y de las propiedades del suelo. Cabe señalar que la mayor cantidad de datos sobre la absorción de radionucleidos y la absorción iónica de los metales se han obtenido en los últimos tiempos mediante los experimentos de muestras sueltas con trazadores.

Las técnicas de columna se basan en la medición de las distribuciones espacio-tiempo de los componentes marcados que fluyen a través de una columna de suelo o roca, lo que posibilita la evaluación simultánea de los parámetros de transporte hidráulico, tales como absorción/desorción y difusión/dispersión, en condiciones hidráulicas dinámicas. En comparación con las técnicas de muestras sueltas, los datos obtenidos con los experimentos de columna se asemejan mucho más a los sistemas naturales.

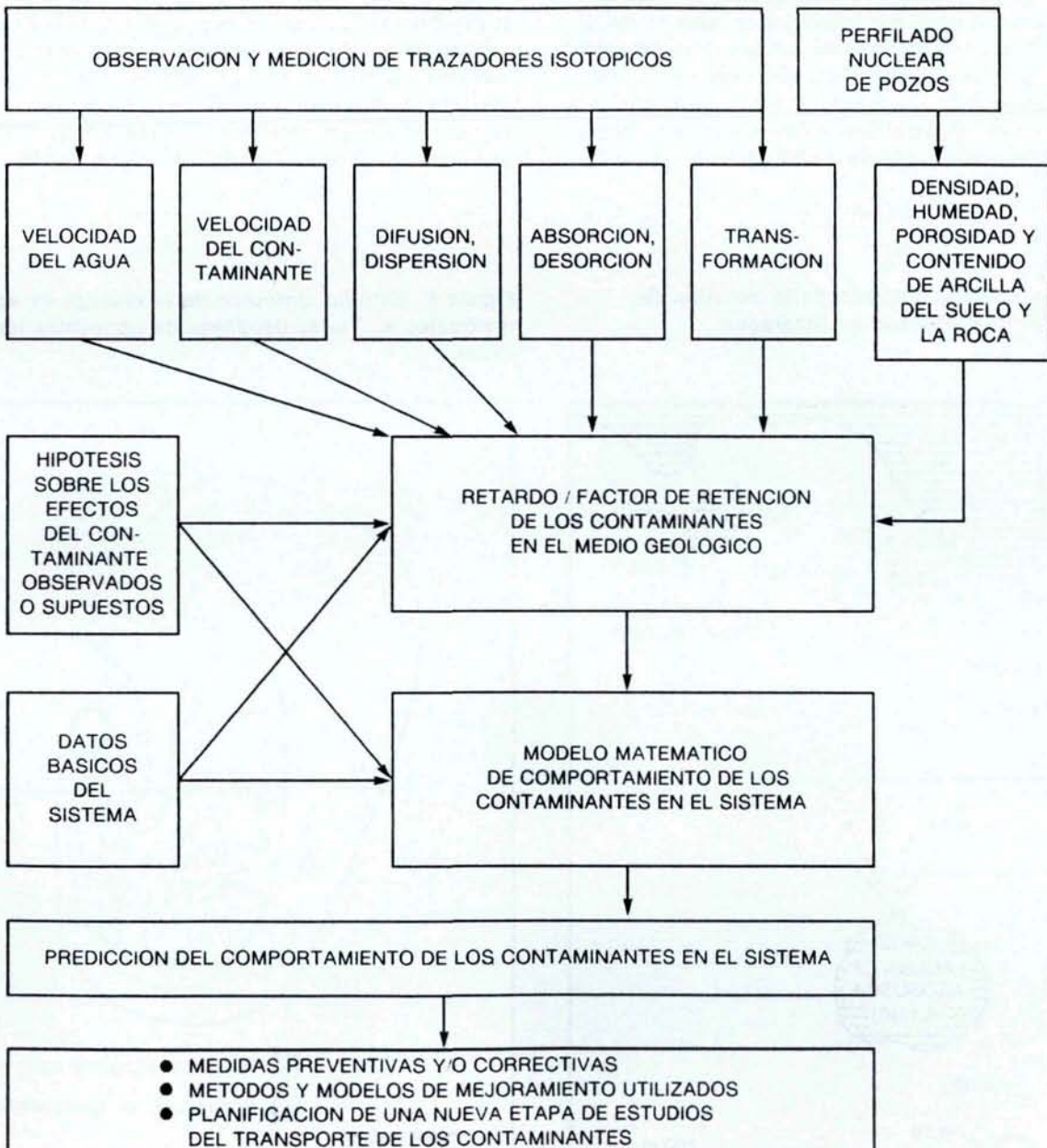
Los experimentos de campo son las técnicas más convenientes. Para evaluar los parámetros de retardo en condiciones de campo se suelen realizar experimentos de trazado múltiple, en los que se utiliza tritio artificial como trazador del agua junto con sustancias reactivas disueltas (contaminantes) marcadas con otro isótopo. Por lo regular las concentraciones de tritio que se necesitan para esos experimentos son del orden de varias centenas de becquerelios por litro (Bq/L).

En general, los experimentos de campo basados en el uso de isótopos artificiales como trazadores pueden ayudar a abordar problemas locales como son:

- La protección de determinadas zonas en las que se extrae agua para el consumo humano. El principal objetivo que se persigue es predecir el tiempo de tránsito del contaminante desde la fuente donde se origina;
- La investigación y el pronóstico de la contaminación de las aguas subterráneas en zonas aledañas a los

- emplazamientos de evacuación de desechos y grandes complejos industriales;
- La evaluación de la dinámica del agua en los sistemas de recarga artificial;
- El estudio y el pronóstico del movimiento y el comportamiento de la sal y los productos químicos agrícolas en el suelo y en las aguas subterráneas.

Figura 5. Estrategia para la aplicación de técnicas de trazadores en estudios de contaminación



Para comprobar esta posibilidad, se emprendió una investigación a fin de medir la velocidad del flujo subterráneo y las características químicas del agua. Los estudios incluyeron el análisis de los isótopos ambientales tritio, deuterio y oxígeno 18 y de la composición química del agua, así como experimentos con trazadores artificiales.

Los resultados indicaron que no había intrusión de agua contaminada en cantidades que pudieran detectarse. Se encontró una gran diferencia entre el agua del lago Managua y las aguas subterráneas en cuanto a su composición isotópica. Además, se observó que el agua que se extrae de la laguna de Asososca es relativamente antigua, basándose en la ausencia de tritio en cantidad mensurable (durante el período 1952-1962 se liberó tritio a la atmósfera a través de los ensayos de armamentos nucleares, el cual es utilizado para determinar la edad de los recursos hídricos y la recarga que ha tenido lugar en los últimos tiempos por infiltración de agua de lluvia). Además, el agua de la laguna de Asososca tiene la misma composición isotópica que las aguas subterráneas profundas y es muy diferente de la del lago Managua. La información obtenida con los isótopos permite afirmar que se podrá detectar con mucha antelación cualquier posible intrusión de agua con-

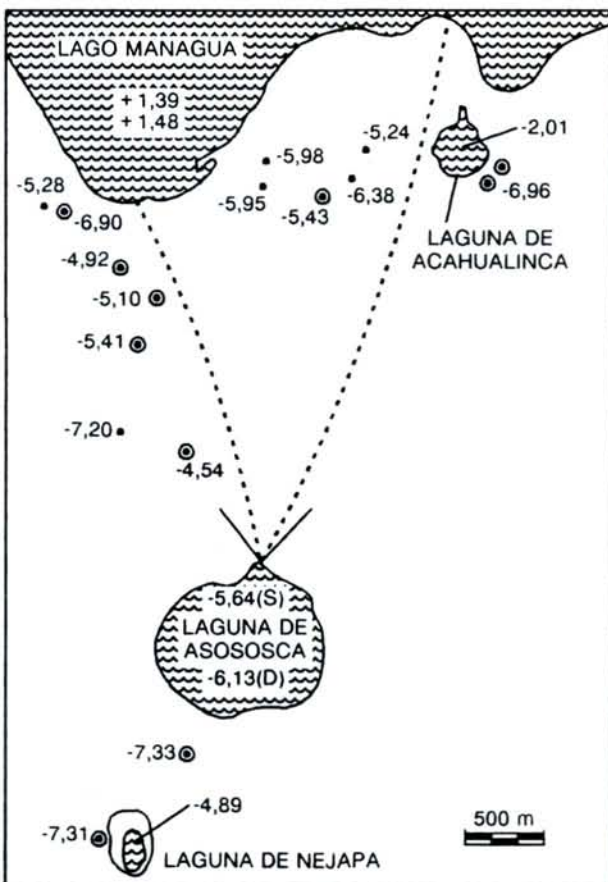
taminada procedente del lago Managua que pueda ocurrir en el futuro a consecuencia del cambio de las condiciones hidrodinámicas.

Recarga artificial de aguas residuales

En Túnez se puso en práctica un proyecto para estudiar la recarga artificial de las aguas residuales en el acuífero costero aluvial de Nabeul-Hammamed. Este acuífero está prácticamente agotado e inservible por el intenso bombeo y la salinización. El agua recargada fue marcada con tritio para investigar la capacidad de autodepuración del acuífero durante un período prolongado (14 meses) y estudiar los procesos de mezcla de los recursos hídricos más antiguos con dicha agua.

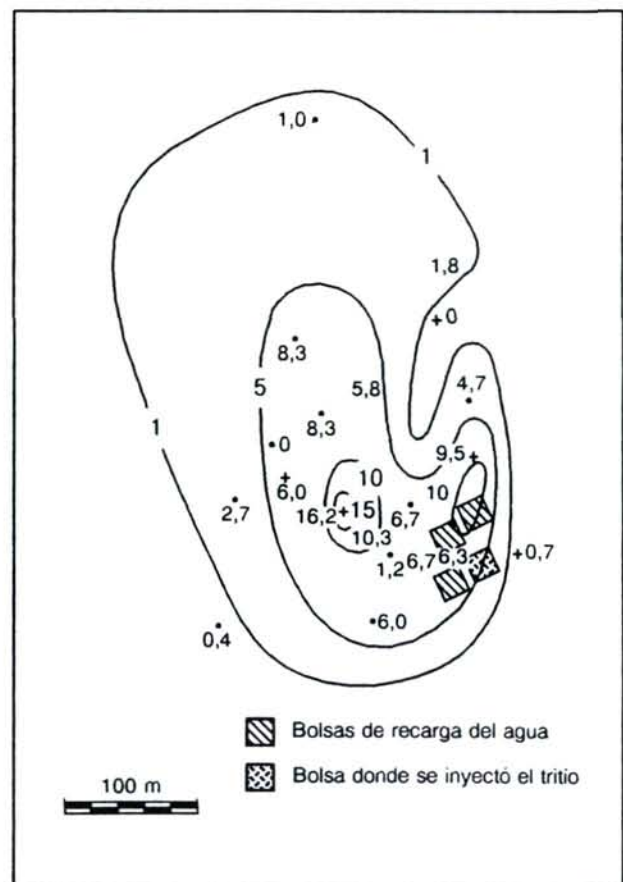
En el curso de los estudios se marcaron unos 32 000 metros cúbicos de aguas residuales con una concentración media de 1,2 kilobecquerelios por litro (kBq/L) mediante la inyección continua del trazador durante 42 días. La distribución espacial del agua marcada proporcionó una información sobre la dinámica del flujo subterráneo. (Véase la Figura 4.) La información permitirá planificar mejor cualquier proyecto futuro a gran escala de recarga artificial de las aguas residuales con el

Figura 3. Estudio isotópico de la intrusión de contaminantes realizado en Nicaragua



Nota: Los datos representan valores de la desviación isotópica del oxígeno 18 con respecto al patrón Viena-SMOW expresados en tantos por mil.

Figura 4. Estudio isotópico de la recarga de aguas residuales en Túnez (isolíneas de concentración de tritio)



Nota: Los isogramas del tritio se dan en $\mu\text{Ci}/\text{m}^3$.

fin de utilizarlas para el riego. Los principales cultivos de esta zona son los cítricos, el arroz y las legumbres. Se llegó a la conclusión de que las aguas residuales deben mezclarse con otras aguas menos mineralizadas para poder utilizar el agua recargada en el riego.

Ventajas e inconvenientes

Los trazadores isotópicos permiten conocer lo que ocurre con los contaminantes marcados (y con cualquier otro componente hídrico marcado) cuando entran en contacto con la matriz sólida del suelo y roca o con sedimentos depositados en el fondo o transportados en suspensión. El estudio se puede realizar en cualquier fase del movimiento, del proceso transformador o de interacción del contaminante con el medio geológico.

Además, desde el punto de vista químico los trazadores isotópicos se pueden utilizar en concentraciones muy bajas sin alterar, por lo tanto, las condiciones físicoquímicas y termodinámicas del sistema que se estudia. Son mensurables en cantidades tan pequeñas que los instrumentos convencionales no pueden detectarlos.

Por último, los experimentos con trazadores pueden realizarse de forma no destructiva. Por ejemplo, la difusión y la absorción pueden estudiarse mediante experimentos de columna en un laboratorio sin destruir las muestras de suelo y roca. Sobre el terreno, es fácil efectuar ensayos similares utilizando emisores gamma como trazadores gamma y el perfilado gamma natural.

Sin embargo, las técnicas de trazadores isotópicos tienen algunos problemas y limitaciones. De ahí que en los estudios sobre la migración de la contaminación, el interés de los científicos se está desplazando del desarrollo y mejoramiento de las técnicas de trazadores isotópicos a su compleja utilización en combinación con los métodos tradicionales a fin de obtener la información necesaria para realizar los pronósticos pertinentes y proponer medidas preventivas.

El desarrollo futuro de las técnicas nucleares en esta esfera deberá orientarse hacia la elaboración de un sistema de algoritmos que sirva para transferir los datos de laboratorio y de campo a los sistemas ambientales. Es preciso elaborar modelos de interpretación y de pronóstico más adecuados y crear bases de datos sobre los rasgos característicos de la migración de contaminantes en condiciones geológicas y termodinámicas típicas.

A menudo se afirma que una de las desventajas de que suele adolecer la aplicación de los isótopos radiactivos es la exigencia de hacer una declaración sobre su impacto ambiental cuando los investigadores solicitan la licencia para utilizarlos. Esta exigencia puede dar lugar a malentendidos en el público y, incluso, entre las autoridades. En la mayoría de las investi-

gaciones hidrológicas e hidrogeológicas, los isótopos artificiales se usan en concentraciones bajas, las cuales no representan ningún riesgo para los operadores, para el público, ni para el medio ambiente cuando se adoptan medidas de seguridad bien conocidas y concebidas. La utilización de isótopos radiactivos naturales no plantea ningún problema especial de seguridad.

En estos momentos el OIEA está preparando una guía sobre la manipulación segura de los trazadores radiactivos artificiales en hidrología que servirá de apoyo a los investigadores y a las autoridades gubernamentales.

Otras actividades del OIEA

El OIEA desarrolla otras actividades en la esfera de la migración de contaminantes, entre ellas varios proyectos que incluyen estudios sobre hidrología y geoquímica isotópica de las aguas superficiales y subterráneas.

Además, se han convocado varios grupos consultivos de expertos para examinar la utilidad, fiabilidad y aplicabilidad de las técnicas nucleares en la evaluación de las aguas subterráneas. Entre los temas específicos abordados figuran las técnicas de trazadores isotópicos en hidrología, la vulnerabilidad de los acuíferos de aguas subterráneas, el uso de isótopos de gases raros y nobles en el estudio de los procesos atmosféricos y de la hidrosfera y la elaboración de modelos interpretativos en hidrología isotópica.

Se están llevando a cabo varios programas coordinados de investigaciones (PCI) sobre estos temas, que incluyen un PCI sobre la elaboración de modelos de transporte de los isótopos en los sistemas hidrogeológicos y un PCI sobre la elaboración y evaluación de las técnicas nucleares en los estudios de transporte de contaminantes. En este último PCI intervienen grupos científicos procedentes de Alemania, Australia, Brasil, Checoslovaquia, Dinamarca, Estados Unidos, Finlandia, Francia, México y la URSS.

También reciben apoyo varios proyectos de cooperación técnica regional en el campo de la hidrología y la hidrogeología de América Latina, Oriente Medio, África y Asia. El OIEA ofrece también cursos periódicos de capacitación para el perfeccionamiento de especialistas de distintos países sobre metodologías y aplicaciones de técnicas isotópicas, incluyendo las aplicaciones y los métodos de mayor interés en relación con la protección de los recursos hídricos.

El OIEA ha convocado un Simposio Internacional sobre hidrología isotópica en marzo de 1991 en el que se debatirá, entre otros temas, el uso de las técnicas isotópicas en los estudios sobre contaminación y protección de las aguas subterráneas. Este será el octavo simposio sobre hidrología isotópica celebrado desde 1963.