

# Los radisótopos artificiales en la investigación hidrológica

Reseña  
de algunas aplicaciones concretas

por Antonio Plata Bedmar



Por más de 30 años los radionucleidos artificiales han venido contribuyendo a la investigación de los problemas hidrológicos. En ese lapso se ha ido acumulando un volumen apreciable de información y conocimientos, y ya contamos con una sólida base para evaluar la contribución real que han aportado esas técnicas y sus posibilidades en el futuro. Los problemas hidrológicos suelen ser muy complejos, y hay que aplicar muchas técnicas diferentes para investigarlos. Ninguna de las técnicas desarrolladas se puede descartar *a priori*; esto es válido también para la técnicas isotópicas, que ocupan un lugar complementario, pero importante, en este contexto.

En hidrología, los isótopos radiactivos se utilizan de dos maneras diferentes: como fuentes selladas de irradiación y como trazadores.

## Fuentes radiactivas selladas

Se han fabricado diferentes tipos de sondas que contienen fuentes radiactivas selladas con fines hidrológicos concretos. El funcionamiento de estas sondas se basa en la interacción de la radiación y la materia, lo que puede suministrar información sobre el medio sólido relacionado con la corriente de agua. Los métodos más importantes son los siguientes:

- **Medición de la concentración de los sedimentos en suspensión transportados por el agua de un río.** Este transporte representa más del 75% del transporte total de sólidos de los ríos y a menudo plantea problemas de gran importancia económica, por ejemplo, para la vida de los embalses. Los métodos convencionales no aportan ninguna solución apropiada. Para estos fines se han diseñado sondas nucleares diversas que utilizan americio 241 y cesio 137. La concentración de sedimentos se registra automáticamente durante períodos largos (sondas fijas) o se mide manualmente (sondas protátiles). Hay que

continuar desarrollando las sondas fijas a fin de mejorar sus resultados y fiabilidad, y reducir su costo.

- **Medición del grosor y la densidad de la capa de sedimentos depositados.** Este método es interesante porque tiene que ver con el mantenimiento de los canales de navegación en los puertos y los estuarios (operaciones de dragado), y también con la colmatación de los embalses, especialmente en las zonas áridas y tropicales, donde se registran las tasas más altas de sedimento transportado. Ninguna técnica convencional conocida puede suministrar la información que se obtiene con estas sondas.

En el comercio se ofrecen algunas sondas nucleares que permiten obtener perfiles de densidad de la capa de sedimentos depositados. La variación en el tiempo de estos perfiles ofrece información acerca de la dinámica de la sedimentación. También es menester continuar trabajando para perfeccionar la técnica de medición en las condiciones reinantes sobre el terreno, que suelen ser adversas.

- **Análisis de los sedimentos por fluorescencia X.** Se utilizan fuentes radiactivas gamma para excitar la radiación X característica de los elementos pesados ( $Z > 20$ ) contenidos en las muestras de sedimentos, con lo cual se logra la determinación y el análisis semicuantitativo de esos elementos. El uso combinado de esas técnicas con otros métodos analíticos, por ejemplo, el análisis por activación, permite determinar el origen de los sedimentos transportados por los ríos.

- **Métodos de diagrfia de pozos.** El método de diagrfia basado en la radiación gamma natural está muy difundido y se ha generalizado su empleo en las investigaciones hidrológicas y geológicas. Este método permite identificar las capas de arcilla, factor muy importante para obtener perfiles de permeabilidad en acuíferos aluviales y coluviales, así como las fracturas rellenas de arcilla en el caso de los acuíferos de rocas fracturadas. Por otra parte, los métodos de diagrfia neutrón-neutrón y gamma-gamma se utilizan principalmente para los estudios sobre regadíos y para investigar los procesos de infiltración en la zona no saturada, que son especialmente interesantes en el caso de las zonas áridas. El método neutrón-neutrón permite obtener los perfiles del contenido de agua del suelo, que corresponde a los perfiles de

El Sr. Plata Bedmar es funcionario de la División de Ciencias Físicas y Químicas del OIEA.

Foto de arriba: Medición de la velocidad de una corriente de agua subterránea en Nicaragua por el método de dilución.

porosidad de la zona saturada. Con el método gamma-gamma se obtienen los perfiles de densidad húmeda de la formación, a partir de los cuales se puede evaluar también la porosidad de la zona saturada. El uso de estos métodos con fines hidrológicos se ve seriamente limitado por la necesidad de pozos de sondeo de construcción especial.

#### Trazadores radiactivos

En todos los países del mundo se observan problemas hidrológicos que requieren el uso de técnicas de trazadores artificiales. Muchos de estos problemas sólo se pueden investigar utilizando trazadores radiactivos. La necesidad de estos trazadores obedece principalmente a la gran variabilidad que presentan los parámetros interesantes de los sistemas hídricos en función del tiempo y el espacio. Esta variabilidad a menudo dificulta la obtención de valores fiables de los parámetros que determinan

el comportamiento del agua en el sistema que se investiga, especialmente cuando es absolutamente imprescindible obtener datos precisos. En estos casos, el uso de trazadores puede ser la única solución viable.

● **Estudio de los sedimentos con trazadores.** Se puede considerar que la investigación del transporte de sedimentos por una corriente de agua utilizando sedimentos marcados es una técnica sumamente desarrollada. Los sedimentos en suspensión se pueden marcar fácilmente, por ejemplo, utilizando oro 198, hierro 59 o hafnio 181 como trazador, y después se puede investigar su sedimentación en el fondo de las aguas. La técnica es interesante para estudios relacionados con la sedimentación en zonas portuarias, estuarios, embalses y estanques de infiltración destinados a la recarga artificial de agua.

Se ha acumulado considerable experiencia en el uso de trazadores radiactivos artificiales para la determinación de la carga de fondo que transportan los ríos y los

### Aplicaciones típicas de los trazadores

A continuación se indican algunas de las aplicaciones más típicas e importantes de los trazadores radiactivos artificiales. Cabe señalar que a menudo se les debe combinar con otras técnicas (isótopos ambientales, hidroquímica y otras técnicas hidrológicas convencionales) para obtener la información requerida.

#### Aguas superficiales

- Medición del caudal en ríos y canales. Muchos de los requisitos de las mediciones del caudal se pueden satisfacer únicamente con las técnicas que utilizan trazadores. Los trazadores radiactivos son especialmente apropiados para medir grandes caudales, de entre 50 y 1000 metros cúbicos por segundo. Para caudales menores se pueden utilizar con ventaja otros trazadores no radiactivos. Como ejemplos típicos cabe mencionar la calibración de las turbinas en las centrales hidroeléctricas y la calibración de las estaciones de aforo en los ríos.
- Estudios de dispersividad en ríos, lagos, estuarios y mares, vinculados principalmente con los problemas de la contaminación del agua. Los coeficientes de dispersión obtenidos mediante estos experimentos se suelen utilizar para ajustar modelos matemáticos o hidráulicos.
- Mediciones del tiempo de permanencia y características de mezcla en los lagos.
- Dinámica de las cuencas fluviales, incluida la determinación de los tiempos de paso del agua. Los trazadores ambientales (por ejemplo, los isótopos estables del agua) pueden ser útiles en estos estudios.
- Problemas relacionados con el uso del agua para fines de regadío, incluida la pérdida de agua en los canales; determinación y evaluación del reflujo; y contribución parcial de aguas de diversos orígenes.
- Estudio mediante trazadores del agua contaminada, a fin de investigar las capacidades de autodepuración de diferentes aguas superficiales.
- Vínculo con las aguas subterráneas (infiltración de aguas superficiales). También para estos casos los isótopos ambientales suelen ser el instrumento básico.

#### Aguas subterráneas

- Estudios de infiltración en la zona no saturada. El tritio artificial es la única opción para estos estudios. La información se obtiene por medio de perfiles verticales del tritio inyectado, medido a diferentes intervalos.
- Determinación de los parámetros de los acuíferos mediante ensayos con trazadores en uno o en varios pozos de sondeo, incluida la determinación de la velocidad de la corriente mediante métodos de dilución puntual y de tiempo de poso; determinación y medición de la corriente vertical dentro de los pozos; determinación de la dirección de la corriente de las aguas subterráneas; determinación de la porosidad y la permeabilidad efectivas en combinación con ensayos de bombeo; determinación de los coeficientes de dispersión de los acuíferos; distribución de las fracturas (perfiles verticales) en los acuíferos fracturados.
- Investigación de la dinámica de los sistemas kársticos.
- Sólo por medio de trazadores artificiales se pueden estudiar muchos problemas locales o regionales de la dinámica de los sistemas kársticos. Por regla general, el trazador se inyecta en determinada parte del sistema y se observa en lugares a donde se prevé que llegue. En los últimos 30 años se han realizado numerosos experimentos de este tipo en los que se han utilizado trazadores fluorescentes y radiactivos. Además de determinar las características de circulación del agua, se puede obtener información semicuantitativa acerca del volumen del depósito de aguas subterráneas.
- Estudio mediante trazadores de los fluidos geotérmicos reinyectados en un campo geotérmico después de haber sido explotados. Se investiga qué ocurre con el fluido reinyectado.
- Estudio mediante trazadores del agua inyectada en los acuíferos durante los procesos de recarga artificial. Se obtiene el comportamiento dinámico del agua inyectada, que incluye la mezcla con el agua ya existente. Por otra parte, estos métodos permiten obtener información sobre la evolución química del agua inyectada (importante cuando se trata de aguas residuales) y sobre algunos parámetros hidrológicos del acuífero (porosidad total, velocidad de la corriente de agua subterránea natural y dispersividad).



Investigación de la infiltración en la presa del embalse de Maguaca, República Dominicana.

mares. Se dispone de diversos radionucleidos para marcar los sedimentos, entre ellos, el escandio 46, el lantano-bario 14, la plata 110m, el oro 198, el iridio 192 y el zirconio-neodimio 95. En el caso de los sedimentos finos, por lo general se utilizan vidrios radiactivos (escandio 46).

Es posible obtener información cuantitativa y cualitativa. En el caso de los lechos de los ríos se puede determinar el transporte en masa de sedimentos, pese a que el tamaño sumamente variable de los granos dificulta un poco la investigación. Cuando se trata del mar, esta técnica es más apropiada para el estudio de problemas locales, por ejemplo, en relación con operaciones de dragado (evaluación de vertederos) o la protección de las playas.

● **Estudio de las aguas con trazadores.** El uso de trazadores artificiales para investigar la circulación del agua comenzó hace más de 2000 años. Se ha utilizado una gran cantidad de trazadores no radiactivos, y en la actualidad los productos fluorescentes, los colorantes y, con menos frecuencia, algunos productos químicos iónicos, las esporas de licopodio y algunas bacterias, desempeñan un importante papel en el estudio de las aguas con trazadores. En los últimos 30 años también se han venido utilizando con este fin algunos radionucleidos producidos artificialmente; entre ellos, los más importantes son: el yodo 131, el bromo 82 el cromo 51, el cobalto 58, el oro 198 y el tritio.

La comparación entre los trazadores radiactivos y los no radiactivos se puede resumir en los siguientes términos: entre la ventajas de los trazadores radiactivos está su vida limitada (no se produce ninguna contaminación permanente del agua), la detección *in situ* de los emisores gamma (indispensable para algunas aplicaciones), una alta sensibilidad de detección (se estudian grandes volúmenes de agua con una cantidad pequeña de traza-

dores); y una mayor estabilidad (posibilidad de utilizarlos en aguas muy contaminadas y en casos de grandes cargas de sedimentos).

Entre sus desventajas figuran la necesidad de pedir autorización para utilizarlos, las dificultades ocasionales para adquirirlos (los trazadores con un período de semidesintegración breve no se pueden almacenar), y los riesgos de manipulación.

Se debe prestar atención especial al tritio por ser el único trazador isotópico artificial conocido para el agua (el trazador se incorpora a la molécula de agua). El tritio es la única opción para muchos experimentos con trazadores, pese a su prolongado período de semidesintegración (12, 43 años) y a que es un emisor beta puro (imposible de detectar *in situ*). Cuando se trata de aplicar un trazador a una corriente de aguas subterráneas, el tritio es el único que presenta un comportamiento igual al del agua y suministra información cuantitativa fiable. Por otra parte, el tritio artificial es barato, fácil de manipular (prácticamente sin riesgos) y se puede detectar, sin enriquecimiento, a una concentración de 0,2 microcurios por metro cúbico (0,003 microcurios por metro cúbico con enriquecimiento electrolítico).

#### Aplicaciones típicas

Los tipos de problemas en los que es conveniente utilizar estos trazadores vienen determinados por dos de las características principales de los experimentos con trazadores artificiales: 1) El volumen de agua que se puede marcar es limitado y generalmente representa sólo una pequeña fracción del volumen total existente en el sistema hídrico; 2) El tiempo de que se dispone para los experimentos suele ser limitado y muy a menudo depende de la dinámica del sistema hídrico que se investiga. Pocas veces se realizan experimentos que duren más de 1 año.

Por esas razones, los tipos de problemas que se suelen abordar con ayuda de trazadores artificiales son los siguientes:

- Problemas relacionados con sistemas hídricos cuya circulación es muy rápida, como es el caso de la mayoría de los sistemas de aguas superficiales y de muchos sistemas de aguas subterráneas en rocas fracturadas.
- Problemas locales que afectan zonas pequeñas (no más de algunos kilómetros cuadrados), para los cuales se requieren datos hidrológicos precisos y exhaustivos. Este es el caso de muchos de los problemas hidrológicos relacionados con la ingeniería civil.
- Experimentos locales en grandes masas de agua destinados a obtener información general válida para todo el sistema sobre la base de la integración de datos puntuales.

### **Ingeniería civil**

Los trazadores radiactivos artificiales son instrumentos importantes en la investigación de numerosos problemas de ingeniería civil relacionados con el agua. Por lo general, hay que realizar estudios integrados que incluyan el uso de diferentes técnicas. Un ejemplo importante de esos problemas es la investigación de las infiltraciones en los embalses y lagos. Se han elaborado numerosas técnicas con trazadores especialmente para estos tipos de estudios, entre ellas los experimentos de interconexión entre los embalses y las aguas que manan corriente abajo; el uso de trazadores que son absorbidos en el fondo de los embalses para detectar las zonas de infiltración del agua; sondas para localizar las zonas de infiltración en el fondo, basándose en la determinación de la dirección de la corriente; sondas para medir la tasa de infiltración en puntos del fondo de los embalses; y técnica de pozos únicos para detectar el flujo de las aguas subterráneas a través de las formaciones adyacentes.

Por otra parte, se pueden emplear algunas de las técnicas de trazadores artificiales para investigar la idoneidad de los lugares donde se construyen presas a fin de predecir los problemas de infiltración. En otros casos se pueden realizar investigaciones análogas en relación, por ejemplo, con la construcción de túneles o de cimientos de edificios o puentes importantes.

### **Inundación de minas**

Se han realizado ya numerosas investigaciones con todo tipo de trazadores artificiales para obtener información sobre el origen y las vías de circulación de las aguas que manan en las minas. En general, para este fin hacen falta estudios integrados en que se utilicen técnicas diferentes. Los trazadores artificiales, junto con los isótopos ambientales, desempeñan el papel fundamental en estos estudios, especialmente cuando el agua puede tener orí-

genes diferentes. Con frecuencia hay que investigar el vínculo existente entre las aguas superficiales y el agua de la mina. En otros casos, la investigación tiende a determinar la corriente de agua que va hacia la mina a fin de bombearla antes de que llegue a ella.

### **Actividades del OIEA**

El OIEA tiene una tradición de muchos años dedicados a promover y apoyar el uso de técnicas nucleares en este campo. En los últimos 30 años el Organismo ha adjudicado un gran número de proyectos de cooperación técnica y contratos de investigación que abarcan casi todos los temas mencionados en este artículo.

Actualmente el OIEA apoya varios estudios en los que se emplean radisótopos artificiales. Esos proyectos tienen por tema la contaminación de un lago de Guatemala; el agua para regadío en Rumanía; el transporte y depósito de sedimentos en Asia sudoriental y el Brasil; la infiltración en lagos y presas de Chile y la República Dominicana; la inundación de minas y la contaminación de las aguas subterráneas en Nicaragua; y la dispersividad de las aguas de estuarios en relación con la contaminación del agua en la Argentina (servicios de asesoramiento exclusivamente).

### **El futuro de estas técnicas**

La experiencia acumulada en los últimos 30 años ha demostrado que se pueden obtener importantes beneficios de la utilización de radionucleidos artificiales para la investigación de los problemas hidrológicos. Sin embargo, es lamentable que existan dificultades para utilizar esta tecnología a causa de las restricciones impuestas en muchos países al uso de materiales radiactivos. Por regla general, la utilización de estas técnicas se encuentra en manos de las organizaciones encargadas de la energía nuclear, y no hay posibilidad de traspasar su tecnología a las organizaciones que se encargan directamente de los estudios hidrológicos. La colaboración entre estos dos tipos de organizaciones no siempre es satisfactoria. Incluso hay países donde el uso de radionucleidos artificiales en las investigaciones hidrológicas está totalmente prohibido.

Por otra parte, la experiencia demuestra que, en general, el uso de esta tecnología no entraña riesgos para la población o que en todo caso éstos son muy limitados. Ahora bien, muchos países tienen en vigor reglamentos nucleares que imponen restricciones excesivamente rigurosas, porque se han promulgado teniendo en cuenta, básicamente, otras actividades nucleares de índole y nivel de riesgos totalmente diferentes. La elaboración de reglamentos específicos para el uso de material radiactivo en estudios sobre el medio ambiente basados en la evaluación de los riesgos reales contribuiría en grado sumo al desarrollo de esta tecnología en el futuro.