

Hidrología a base de isótopos ambientales

La hidrología a base de isótopos ambientales constituye un campo de investigación relativamente nuevo, fundado en las variaciones observadas del contenido isotópico de las aguas naturales. Estas características isotópicas se han determinado gracias a estudios muy amplios en el espacio y en el tiempo. El hombre no puede modificarlas, pero sí observarlas e interpretarlas para obtener valiosa información de alcance regional acerca del origen, la renovación y el tiempo de tránsito del agua en el sistema considerado, información que, con frecuencia, no es posible obtener por otros métodos. En general, el costo de estas investigaciones es relativamente pequeño en comparación con el de los estudios hidrológicos clásicos.

Los isótopos ambientales de mayor interés hidrológico son los isótopos estables deuterio (hidrógeno-2), carbono-13, oxígeno-18 y los isótopos radiactivos tritio (hidrógeno-3) y carbono-14. Los isótopos del hidrógeno y del oxígeno constituyen trazadores geoquímicos ideales de las aguas, pues sus concentraciones no suelen alterarse por interacción con las materias de los acuíferos. En cambio, los compuestos del carbono en las aguas subterráneas pueden tener interacciones con dichas materias, lo que complica la interpretación de los datos obtenidos con el carbono-14.

Recientemente se ha lanzado la idea de utilizar con fines hidrológicos algunos otros isótopos ambientales como el ^{32}Si y el $^{238}\text{U}/^{234}\text{U}$, pero sus aplicaciones han sido hasta ahora muy limitadas, por lo que no se tratan en este trabajo.

Los isótopos estables del hidrógeno y del oxígeno en el ciclo hidrológico

Las variaciones de las razones isotópicas D/H y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ de muestras de agua se expresan en forma de desviación por mil ($\delta\text{‰}$) con respecto a las razones isotópicas del agua oceánica media, que constituye el patrón de referencia SMOW (Standard Mean Ocean Water):

$$\delta\text{‰} = \left(\frac{R_{\text{muestra}}}{R_{\text{SMOW}}} - 1 \right) \cdot 1000$$

La razón isotópica R se determina con un espectrómetro de masas especial.

El principal valor de los datos relativos a los isótopos estables de un sistema hidrológico estriba en que permiten determinar el área de recarga del sistema, siempre que se conozcan en general las variaciones isotópicas de las precipitaciones y de las aguas superficiales. Los procesos naturales más importantes que hacen variar la composición isotópica estable de las aguas naturales son la evaporación y la condensación. Las moléculas ligeras de agua, $\text{H}_2\ ^{16}\text{O}$, son más volátiles que las más pesadas, por lo que, al enfriarse la humedad atmosférica, las moléculas pesadas se condensan más fácilmente y el vapor residual contiene cada vez menos isótopos pesados. Esta condensación progresiva se

Marcaación de aguas en la isla volcánica de Cheju (República de Corea) ... Catarata de Chungji, Punto de Muestreo N° 5.



produce al desplazarse tierra adentro o ganar altitud las masas de aire procedentes del mar. Como el vapor residual requiere temperaturas cada vez más bajas para condensarse, se observa una relación entre la temperatura de condensación y la composición isotópica de las precipitaciones: conforme disminuye la temperatura de condensación se reduce el contenido en isótopos pesados de las precipitaciones.

Esta dependencia con respecto a la temperatura da lugar a: i) variaciones estacionales del contenido isotópico de las precipitaciones (las precipitaciones invernales contienen menos isótopos pesados que las estivales); ii) variaciones con la latitud (las precipitaciones en latitudes altas son más pobres en isótopos pesados que las precipitaciones en latitudes bajas); iii) variaciones con la altitud (el contenido en isótopos pesados de las precipitaciones disminuye al aumentar la altitud). Este último efecto tiene especial importancia en los estudios hidrológicos regionales, ya que, por ejemplo, permite diferenciar las aguas subterráneas procedentes de áreas de recarga situadas a alturas distintas.

Al infiltrarse las precipitaciones para ir a engrosar las aguas subterráneas, la mezcla que se produce en la zona no saturada compensa las variaciones estacionales isotópicas, de forma que el agua de la zona saturada tiene una composición que corresponde a la composición isotópica media del agua infiltrada en la región. Es decir, la composición isotópica de las aguas subterráneas está relacionada con la de las precipitaciones caídas en la región de recarga del acuífero durante el tiempo de recarga, y puede servir para determinar el área de recarga en función de la altura o de la distancia al mar. Se ha de tener en cuenta toda variación climática, durante el tiempo de recarga, que pudiera haber originado una composición isotópica de la infiltración original distinta de la observada en la época de que se trate.

Es posible verificar la recarga de acuíferos subterráneos por infiltración lateral a partir de ríos o de lagos, o por infiltración vertical de aguas estancadas, pues la composición isotópica de estas aguas difiere frecuentemente de la de las precipitaciones locales. Los ríos pueden aportar aguas de precipitaciones caídas a gran altitud y, por lo tanto, pobres en isótopos pesados. El agua de estanques o de lagos puede estar considerablemente enriquecida en isótopos pesados debido a la evaporación, y la relación $D-^{18}O$ que se observe en ellas será distinta de la habitual en las precipitaciones.

El tritio en el ciclo hidrológico

El tritio de la atmósfera se forma por acción de los rayos cósmicos y proviene también de los ensayos termonucleares. La mayor parte se oxida rápidamente, transformándose en HTO e incorporándose al ciclo hidrológico, en el que constituye un marcador muy útil del agua que haya estado en la atmósfera en los últimos 20 años. La gran dilución que experimenta en el agua hace que su concentración sea sumamente baja y sólo pueda medirse gracias a la radiactividad del tritio, en general, tras un tratamiento de enriquecimiento isotópico (Boletín del OIEA, Vol.15, N° 1, 1973). El contenido en tritio de las aguas naturales se expresa en unidades de tritio (UT). La unidad de tritio corresponde a una concentración de 1 átomo de tritio por 10^{18} átomos de hidrógeno.

Los rayos cósmicos producen una concentración de unas 10 UT en las precipitaciones de las zonas templadas continentales. Desde 1953 se han dispersado en la atmósfera grandes cantidades de tritio producido por el hombre en los ensayos termonucleares. En las precipitaciones del hemisferio boreal se alcanzaron en 1963 concentraciones de hasta 10 000 UT. Desde aquella fecha han disminuido debido a la limitación de las explosiones de artefactos termonucleares en la atmósfera. El contenido en tritio de las precipitaciones presenta considerables variaciones estacionales y geográficas, resultantes del lugar donde se dispersan las mayores cantidades (la estratosfera boreal) y de los mecanismos de transporte desde la estratosfera o la troposfera y a las aguas superficiales. El OIEA publica

datos sobre la concentración del tritio en muestras de precipitaciones tomadas en estaciones diseminadas por todo el mundo, datos que permiten calcular el tritio depositado en la mayoría de los lugares.

En los estudios hidrológicos, las mediciones del tritio proporcionan información sobre el tiempo de tránsito o de renovación del agua de un sistema. En un sistema cerrado de aguas subterráneas pueden establecerse relaciones entre la concentración del tritio y la cantidad de este isótopo que se sabe se ha depositado, con las modificaciones pertinentes debidas a los efectos de la recarga y de la mezcla dispersiva, distintos según las estaciones. En el plano cualitativo, las concentraciones inferiores a 2 o 3 UT en un lugar continental del hemisferio boreal indican que la recarga de agua tuvo lugar antes de las dispersiones de tritio termonuclear, es decir, antes de 1953, mientras que las concentraciones superiores a 20 UT indican un flujo mucho más rápido del agua del sistema. En un sistema abierto, sea superficial o subterráneo, la mezcla de aguas de diversas edades predomina, y las concentraciones de tritio se interpretan en función del tiempo medio de permanencia en un modelo matemático, consistente en una celda de mezcla o en una serie de dichas celdas consideradas aceptables desde el punto de vista geohidrológico.

Los isótopos del carbono en el ciclo hidrológico

Igual que el tritio, el carbono-14 presente en el medio ambiente es resultado de la acción de los rayos cósmicos sobre la atmósfera, y de los ensayos nucleares. Se oxida y transforma en anhídrido carbónico, se mezcla con el anhídrido carbónico de la atmósfera y entra en el ciclo global del carbono. Por su largo período de semidesintegración (5 730 años) es útil para estudiar sistemas de aguas subterráneas en los que los tiempos de tránsito puedan ser muy prolongados. En general, el carbono-14 procedente de los ensayos de armas nucleares no tiene interés en los estudios hidrológicos, pues el tritio es un marcador de aguas recientes mucho más eficaz.

El empleo del ^{14}C para fechar aguas subterráneas se basa en el hecho de que el anhídrido carbónico que se encuentra en la zona del suelo es de origen biológico; procede de la respiración de las raíces de las plantas y de la descomposición de estas últimas y, por lo tanto, contiene el ^{14}C que las plantas toman de la atmósfera. Este anhídrido carbónico biogénico se disuelve en las aguas que se infiltran y es arrastrado hacia los mantos freáticos. Su contenido en ^{14}C disminuye por decrecimiento radiactivo, y la fracción que queda del contenido original indica el tiempo transcurrido desde que salió de la zona del suelo, es decir, el tiempo transcurrido desde que se infiltró con el agua.

El ^{14}C se mide en relación con el contenido total en carbono de la muestra, por cuyo motivo se ha de tener en cuenta el origen del ^{14}C y del carbono estable de la muestra. No todo el carbono estable de los carbonatos de las aguas subterráneas tiene el mismo origen que el ^{14}C . Al infiltrarse, el agua que contiene anhídrido carbónico procedente de la zona del suelo disuelve los carbonatos minerales presentes en el suelo. Pero el carbono originario de las calizas no suele contener ^{14}C , de forma que el agua que llega al manto freático lleva carbono en solución (en las formas químicas de H_2CO_3 , HCO_3^- y CO_3^{2-}) con un contenido en carbono-14 menor que el del CO_2 biogénico del suelo. El problema más difícil, en la determinación de la edad del agua por medio del ^{14}C , es evaluar la dilución del CO_2 del suelo — que en su origen contenía 100% de ^{14}C moderno — con carbonatos exentos de ^{14}C , para estimar la concentración inicial del ^{14}C en las aguas de recarga que llegan al manto freático.

La experiencia demuestra que, en lo que respecta al agua reciente infiltrada antes de los ensayos termonucleares en la Europa Central, el contenido de ^{14}C moderno es, por término medio, del orden de 85%. Para tratar de conseguir una estimación más correcta de

este valor, en lugares específicos, puede estudiarse el contenido en ^{13}C (estable) de los carbonatos de la muestra de agua subterránea. Como el anhídrido carbónico biogénico tiene un contenido en ^{13}C sensiblemente menor que las calizas, cabría la esperanza de poder calcular las proporciones respectivas del carbono biogénico y del procedente de calizas a partir del contenido en ^{13}C de los carbonatos del agua subterránea. Por desgracia, tenemos en general muy pocos conocimientos acerca del contenido en ^{13}C de las plantas en el lugar y en el momento (hace miles de años) de la recarga. Además, se sabe que las razones isotópicas del carbono pueden ser alteradas en las aguas subterráneas por procesos químicos mucho más complejos que el elemental sistema de carbonatos considerado.

El método del ^{14}C puede utilizarse para aguas de menos de 30 000 años de edad. Se aplica, en general, para estudiar el movimiento de las aguas en acuíferos cerrados. Cuando la recarga sólo se produce en la zona de afloramiento y las propiedades químicas del agua y la composición isotópica de las especies químicas del carbono en solución son relativamente uniformes, las diferencias de edad en el espacio no son afectadas por los imponderables inherentes a la determinación de la edad en valor absoluto del agua. Esto significa que es posible hallar la velocidad de circulación del agua determinando las diferencias de edad entre dos puntos de muestreo cuya distancia entre sí sea conocida. Esto permite al hidrólogo una estimación de la permeabilidad media de la región. Las mediciones del ^{14}C , especialmente en combinación con las del tritio, pueden también proporcionar información sobre los procesos de mezcla de aguas de diversas edades dentro de un acuífero dado.

Ejemplos de aplicaciones

En los últimos años, estos principios generales se han aplicado en la práctica en muchas partes del mundo, en proyectos realizados con ayuda del OIEA a petición de Estados Miembros deseosos de resolver los problemas hidrológicos que tienen planteados.

Por ejemplo, un proyecto en la región de Hodna (Argelia) se refiere al estudio del agua de dos acuíferos subterráneos en la región de un lago salado seco, Chott-el-Hodna, donde las aguas que corren por la superficie desde las montañas próximas se evaporan completamente. El contenido en isótopos pesados del agua del acuífero profundo es inferior al del acuífero somero, a pesar de que se supone que ambos tienen la misma zona general de recarga. De todas formas, las mediciones del carbono-14 (que dan edades del orden de 30 000 años para el acuífero profundo) indican que la diferencia en la composición isotópica estable se debe muy probablemente a un efecto de la edad (variación climática desde la época de recarga). El acuífero profundo está conectado con el somero por un cono aluvial enterrado (lo que se ha comprobado por métodos geofísicos). En esta zona, el contenido en ^{14}C del agua del acuífero profundo aumenta con el contenido en ^{18}O y C. Ello indica claramente una recarga lenta a partir del acuífero somero. Las mediciones del tritio efectuadas en este estudio también han demostrado que el acuífero somero recibe agua de recarga procedente de los torrentes (uadis).

En la isla volcánica de Cheju (República de Corea) se han realizado análisis de isótopos estables y tritio para caracterizar las aguas subterráneas según el tiempo y el lugar de recarga, determinar la naturaleza de la mezcla de aguas subterráneas de distintos orígenes y evaluar sus tiempos de permanencia. Tras un muestreo preliminar de 14 manantiales, ocho pozos y dos arroyos, en diversas partes de la isla, se escogieron nueve puntos de muestreo periódico. Todas las aguas estudiadas contenían cantidades apreciables de tritio de origen termonuclear, prueba de que la circulación en los diversos sistemas subterráneos es

El Punto de Muestreo Nº 7 para el estudio de hidrología isotópica realizado en Cheju fue este pequeño pozo en Whasoon-ri. El agua para beber se toma de la parte inferior, protegida por el muro; la parte exterior se utiliza como lavadero y abrevadero del ganado. ►



rápida. Según su contenido de tritio y su composición isotópica estable, las aguas se han clasificado en varios regímenes de flujo.

Los manantiales situados a altitud intermedia y elevada presentan una concentración relativamente alta del tritio y una amplia gama de composiciones isotópicas estables. La interpretación de esto es que el tiempo de tránsito del agua es corto y la mezcla escasa, lo que concuerda bien con la hidrogeología de la región. En cambio, en los grandes manantiales costeros la concentración del tritio es mucho menor, si bien la gama de composiciones isotópicas estables es similar. Esto indica que su origen es el mismo que el de los manantiales situados a gran altura, pero que el tiempo de tránsito es algo más largo. En los manantiales y pozos pequeños próximos a la costa oriental de la isla la concentración del tritio es parecida pero, al mismo tiempo, el contenido en isótopos pesados es algo mayor. Esto parece deberse a que las tierras de la parte oriental de la isla son algo más bajas.

Aunque el período abarcado por los análisis del tritio fue relativamente corto, se ha calculado el tiempo medio de tránsito de las aguas. Para ello se ha utilizado un modelo de yacimiento de agua bien mezclado, suponiendo que la recarga sólo era efectiva para las precipitaciones mensuales superiores a 100 mm. Se han obtenido valores que oscilan entre 2 y 8 1/2 años, correspondiendo los tiempos más largos a las aguas procedentes de una gran bolsa de agua dulce bien mezclada.

En la llanura costera de Nicaragua se ha realizado un proyecto para estudiar el mecanismo de recarga de un acuífero freático. El área del proyecto es de forma cuasi rectangular, de unos 30 x 55 km, orientada de NO a SE. El límite SO es el Océano Pacífico, y el límite NE está constituido por una cadena volcánica divisoria de aguas, la Cordillera de Marrabios. En esta corta distancia, la altitud aumenta uniformemente hasta unos 200 m sobre el nivel del mar, a unos 20-25 km del océano (llano de Chinandega) y, después, abruptamente, hasta las cimas de la cordillera, cuya altura media es de unos 1 000 m, con un máximo de 1 745 m. El llano está cubierto de tobas cuaternarias, depósitos de cenizas y viene después la secuencia estratigráfica del Terciario. Se han utilizado los isótopos estables y el tritio para estudiar los problemas relacionados con el mecanismo de recarga del sistema de aguas subterráneas de la región, atendiendo en particular a la importancia de la recarga local del llano frente a la procedente de las altas laderas de la cordillera. Mediante un muestreo periódico en cinco estaciones pluviométricas y dos manantiales, situados todos ellos a diferente altitud, los expertos han determinado la relación entre la altitud y la composición isotópica estable del agua de recarga. Periódicamente se toman muestras en pozos someros y profundos del llano para determinar la composición isotópica de la recarga local, así como la de las aguas subterráneas profundas. Los pozos someros del llano, con una composición isotópica estable muy rica y el contenido de tritio más elevado, han sido excelentes indicadores de la composición isotópica de la recarga local. Una vez conocida la composición isotópica estable de los pozos perforados, que es bastante uniforme, así como la composición isotópica de la recarga local, por una parte, y, por otra, la composición isotópica estable de la recarga procedente de las laderas elevadas, se ha podido estudiar la importancia relativa de la recarga local del llano frente a la procedente de las laderas elevadas. Se ha comprobado que una gran proporción de la recarga del sistema de aguas subterráneas proviene de las laderas con una altitud media de unos 500 m. El contenido en tritio de los pozos del llano ha permitido estudiar el tiempo de tránsito correspondiente a la recarga del sistema, llegándose a la conclusión de que el agua de los pozos someros era de recarga local y no databa de más de tres años, y de que el agua captada por los pozos perforados tenía un tiempo medio de tránsito del orden de 20 años.

Actualmente se realizan estudios hidrológicos similares en Austria, Bolivia, Brasil, Colombia, España (Islas Canarias), Grecia (Creta), Jamaica, Katar, Líbano, México, Senegal, Turquía y Yugoslavia.