

barco de 9.000 toneladas, *Wahine*, fue lanzado contra un arrecife y se hundió con pérdida de 51 vidas.

Comentarios finales

Es evidente que no ha sido posible, en un brevísimo recorrido de este tipo, dar una información, aún somera, de todos los fenómenos meteorológicos importantes acaecidos en el mundo durante un año. Se ha intentado incluir, al menos, una parte de cada informe nacional recibido, eligiendo aquellos fenómenos que parecen más relacionados con la situación mundial y su evolución a lo largo del año, considerada como un todo. Por ello, esta revisión no incluye todas las informaciones recibidas y esperamos que los Miembros comprenderán y estimarán las dificultades encontradas y los problemas en ellas implicados.

C. C. W.

BIBLIOGRAFIA:

- MARSHALL, N. (1968): *The icefields round Iceland in Spring 1968*. Weather, Londres, septiembre 1968. 23, 9, págs. 368-376.
- SCHERHAG, R. (1968): *Bemerkungen zur Welt-Wetterlage im Meteorologischen Jahr 1967-1968*. Beriiner Wetterkarte, Berlín, diciembre 1968. Beilage 174/68, KWJ 67/68.

USO DE LOS ISOTOPOS ATMOSFERICOS EN HIDROLOGIA RESULTADOS DE LAS MEDIDAS EN LA RED OMM/OIEA

Por G. L. MEYER

Durante estos siete últimos años se han recogido muestras de agua de lluvia por períodos mensuales sucesivos, en más de 100 estaciones meteorológicas pertenecientes a 67 países y territorios, componentes de la red de observación de isótopos atmosféricos en las precipitaciones, organizada mancomunadamente por la OMM y el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA). El análisis del contenido en isótopos del hidrógeno y del oxígeno en estas muestras ha permitido responder satisfactoriamente a diversas preguntas y resolver problemas en los campos de la meteorología, la oceanografía y la hidrología. Este artículo expone algunos de estos éxitos y de los planes para el futuro.

Antecedentes

En 1957 Begemann y Libby (1) * publicaron un trabajo sobre el empleo del tritio contenido en las aguas naturales, incluyendo la lluvia y la nieve, como

NOTA: El Sr. Meyer es miembro de la Sección de Hidrología del Organismo Internacional de Energía Atómica.

* La bibliografía va al final del artículo.

medio para determinar el balance de las aguas continentales y para resolver otros problemas afines. Este trabajo despertó gran interés entre los especialistas de meteorología y de hidrología. Los hechos fundamentales acerca del T, su abundancia, los métodos de medida y sus posibles aplicaciones a la meteorología y la hidrología fueron estudiados en detalle por Eriksson (2) en este *Boletín*, en 1961. Ya desde 1934, pero principalmente en los años cincuenta, Gilfillen, Epstein, Mayeda, Friedman, Dansgaard, Craig y otros publicaron estudios sobre el fraccionamiento de los isótopos pesados del agua, deuterio D y oxígeno 18, a lo largo del ciclo hidrológico. Debido al entusiasmo demostrado por estas líneas de investigación de los isótopos del agua, el OIEA, en colaboración con la OMM, organizó en 1960 un plan de recogida de agua precipitada mensualmente, en una red mundial de estaciones pluviométricas, para permitir el estudio de los contenidos en T y en agua pesada, como base para investigaciones meteorológicas y en hidrología.

La red inicial de unas 110 estaciones estaba formada, como hemos dicho, por puntos pluviométricos de 67 países y territorios miembros de la OMM. Para complementar esta red, se pidió la cooperación de estaciones instaladas en la Antártida, en Groenlandia, en la cuenca alta del Amazonas y en el Sahara. La respuesta de todos los Servicios Meteorológicos fue muy favorable y, a pesar del aislamiento de algunas estaciones, se consiguió un rendimiento del 90 por 100 en el número de muestras mensuales enviadas.

Los encargados de las estaciones que participan en el plan mundial de medidas recogen y mezclan el agua de lluvia caída durante cada mes y envían una muestra de un litro, otra de medio litro y otra de veinte centímetros cúbicos, para los análisis de tritio, de deuterio y de oxígeno 18, respectivamente. Los análisis de D y de O^{18} se efectúan en el Instituto Oersted, de la Universidad de Copenhague, de acuerdo con un contrato aceptado por ambas partes. En cuanto a la muestra de un litro, la mitad, aproximadamente, es enviada, juntamente con informes seleccionados sobre la evolución del estado atmosférico, al laboratorio del OIEA en Viena. La otra mitad es enviada a laboratorios cooperadores en el análisis del tritio, en Canadá, EE. UU., India, Israel, Nueva Zelanda y Suecia. Además, se reciben datos suplementarios sobre el contenido en tritio de otros laboratorios en Alemania, EE. UU., Francia e Islandia. El OIEA actúa como organismo recopilador y coordinador de los datos, y publica los cuadros de resultados a intervalos regulares.

La red de observatorios acaba de experimentar la primera revisión importante en siete años. Algunas estaciones han sido eliminadas, ya que los resultados mostraban una variación en el contenido de isótopos excesivamente pequeña para justificar los trabajos de recogida y análisis de las muestras. Simultáneamente se ha pedido a los Servicios Meteorológicos de 19 países que añadan 29 estaciones más a la red. Se ha tenido muy en cuenta el aumentar el número de observaciones en las regiones en donde el agua es un problema, ya sea por su excesiva abundancia, ya sea por su escasez habitual de lluvias o por su ciclo pluviométrico anormal. Las nuevas estaciones se encuentran en América Central y Meridional, en Africa y en Asia, con especial atención a las zonas monzónicas y de climas áridos y semi-áridos. En la figura 1 puede verse la red mundial con las estaciones agregadas recientemente.

En 1965, para cooperar en las investigaciones del Decenio Hidrológico Internacional (DHI) organizado por la Unesco, el OIEA inició una red de



Figura 1.—Estaciones que cooperan con la red OIEA/IAEA de isótopos en medio acuoso, indicando las nuevas y las que se recomienda que sean añadidas

observaciones de aguas fluviales, para lo que se instaló, bajo los auspicios del DHI, una serie de estaciones que recogían y enviaban a Viena, todos los meses, agua de río para su análisis. Los datos de concentración isotópica de estas muestras serán también empleados en los estudios hidrológicos, meteorológicos y oceanográficos. También se analizan muestras de agua de lluvia y de agua filtrada de los lisímetros en estaciones lisimétricas de siete países, para estudiar las modificaciones producidas en la composición relativa isotópica del agua por los fenómenos que se producen en la zona no saturada.

Empleo de los isótopos atmosféricos

Los isótopos radiactivos T y C^{14} (carbono 14) y los isótopos pesados estables D y O^{18} se encuentran en cantidades muy pequeñas, pero medibles, en las aguas naturales. La desintegración del T y del C^{14} a velocidades conocidas y el peso algo mayor del D y del O^{18} en relación con los componentes isotópicos más abundantes del agua, son propiedades que hacen muy útiles a los isótopos para su empleo en estudios hidrológicos. Además, el T, el D y el O^{18} son componentes habituales del agua y no experimentan absorción selectiva por parte de las rocas ni terrenos atravesados por las aguas.

El T y el C^{14} son producidos por el bombardeo de los átomos de nitrógeno de la atmósfera por los rayos cósmicos y se desintegran con semi-períodos (lapsos de tiempo necesarios para reducirse al 0,693) de 12,26 años y de 5568 años, respectivamente. Las explosiones termonucleares también producen estos isótopos, con el resultado de que la concentración del T y del C^{14} aumentaron grandemente en la atmósfera desde 1954 a 1959. La repetición de los ensayos superficiales de armas nucleares a fines de 1961, dio lugar a un nuevo aumento en el tritio atmosférico. Como la medida sistemática del tritio había empezado a principios de 1961, ha sido posible establecer un valor aproximado de la concentración del T atmosférico antes de las pruebas de armas nucleares efectuadas a fines de 1961, pudiendo seguirse su aumento a lo largo de 1962 y 1963 y su declinación subsiguiente, desde 1964 hasta el día de hoy.

La principal utilidad del C^{14} y en cierta extensión también del T, para los estudios hidrológicos, se basa en su ley de desintegración bien conocida. Además, el gran aumento de T producido en la atmósfera durante 1961, lo vuelve un excelente indicador de fechas que puede ser identificado en aguas subterráneas recientes. Si se conoce o puede calcularse con cierta precisión el contenido en T o en C^{14} de las precipitaciones, puede ser posible determinar la fecha en la cual un cierto volumen de agua cayó de la atmósfera; y tratándose de aguas subterráneas, puede determinarse la época en la cual el agua entró a alimentar los depósitos subterráneos, con lo que se hace posible estimar la velocidad del movimiento de las aguas subterráneas y determinar otras relaciones importantes entre las aguas subterráneas, los lagos, las corrientes, los manantiales y la nieve o el hielo, de su contenido en T o en C^{14} .

Respecto a los isótopos D y O^{18} , sus concentraciones en las aguas naturales son muy pequeñas (320 partes por millón y 2.000 partes por millón, respectivamente), pero varían en intervalos estadísticamente significativos. A causa de su masa algo mayor, su concentración en el agua está afectada preferentemente por la evaporación y la condensación; en consecuencia, factores tales

como la temperatura del aire, la cantidad de la precipitación y la situación geográfica, tienen efectos definidos sobre las relaciones D/H y O^{18}/O^{16} . Por lo tanto, las variaciones en la concentración del D y del O^{18} en el agua, suministran informaciones sobre el origen de las aguas subterráneas, mezcla de aguas de orígenes diferentes y si ha habido o no fenómenos de evaporación.

Los isótopos atmosféricos utilizados para resolver ciertos problemas hidrológicos, se estudian en sucesión, si es necesario. Por ejemplo, si en un estudio sobre aguas subterráneas se encuentra que, por ser demasiado antiguo el origen de una muestra particular de agua no se puede determinar la época de su caída mediante el tritio, ya que éste tiene un semi-período demasiado corto, se emplea el C^{14} , que dispone de un lapso de tiempo útil de 40.000 años, para determinar el valor medio del tiempo de tránsito del agua. Análogamente, la medida de las concentraciones de D y de O^{18} en este agua subterránea puede servir para estudiar la altura media de la región de alimentación, valorar los ciclos climáticos ocurridos durante la carga de aquélla, mediante la identificación de aguas procedentes de épocas glaciares recientes, y quizá, indicar algo sobre la mezcla de aguas de diferentes orígenes.

Actividades del OIEA en la hidrología isotópica

El OIEA favorece la investigación y el estudio de las aplicaciones prácticas de los métodos nucleares a la solución de los problemas hidrológicos. Hace esto de diversas maneras: Proporcionando asesoramientos técnicos, servicios de análisis de muestras y cursos de adiestramiento de personal, organizando reuniones internacionales de especialistas y concentrando, coordinando y difundiendo las informaciones sobre la aplicación de los métodos radiactivos e isotópicos a la meteorología y a la hidrología. El OIEA sostiene un pequeño equipo de hidrólogos y geoquímicos y un laboratorio para análisis del tritio en Viena, que suministran servicios de análisis, de asesoramiento y de instrucción a los estados Miembros y a las organizaciones de las Naciones Unidas.

El OIEA ha introducido recientemente un sistema basado en un ordenador electrónico para el análisis y la publicación de los datos experimentales. Todas las colecciones normales de valores mensuales resultantes de los análisis de T, D y O^{18} , de las muestras proporcionadas en su mayor parte por la red de estaciones OMM/OIEA, son almacenadas actualmente en bandas magnéticas. Estos datos, así como los ya publicados anteriormente, se editan actualmente en el formato de la impresora del calculador. Las informaciones correspondientes a cada muestra son: concentraciones de tritio, deuterio y oxígeno-18, cantidad de precipitación mensual, temperatura media y presión media del vapor en la atmósfera. Se están haciendo programas para estudiar la correlación, la interpolación y la interpretación de los datos. Finalmente, además de la publicación en hojas impresas, los datos anteriores están disponibles en bandas magnéticas y en tarjetas IBM perforadas, a un precio mínimo, que tiene por objeto cubrir los costos de material, elaboración y mano de obra.

Empleo de los datos de la red

Las informaciones sobre los valores mensuales medios de T, D y O^{18} en las precipitaciones, así como de sus variaciones, obtenidas a partir de la red

de estaciones OMM/OIEA, son los datos de base sobre los cuales inician sus estudios los hidrólogos especializados en isótopos, sobre una nueva región. Los datos isotópicos de una o varias estaciones de la red son correlacionados e interpolados para un nuevo campo de un modo muy semejante al que emplean los meteorólogos para sus estimaciones de temperatura media o cantidad de precipitación en puntos situados entre dos estaciones meteorológicas. El proyecto Cheju (3) es un ejemplo magnífico del empleo de los datos obtenidos sobre concentraciones de isótopos, procedentes de la red OIEA/OMM.

Cheju es una isleta de origen volcánico, frente a la costa sur de Corea. Compuesta principalmente de rocas basálticas muy fracturadas, Cheju recibe una cantidad de lluvias excesiva en relación con sus necesidades agrícolas y humanas; pero, gran parte de estas lluvias no son utilizables porque el agua se filtra rápidamente a través de la capa de lava superficial, muy fracturada y permeable. Parte de este agua aparece luego en fuentes costeras, pero éstas no están en puntos adecuados para su buena utilización en relación con las necesidades de los habitantes de la isla.

Por esta razón el Gobierno puso en marcha un programa de sondeos de investigación, para determinar el tamaño y el mejor modo de explotación de los recursos hidráulicos subterráneos de la isla; los primeros resultados fueron decepcionantes; los sondeos indicaban una cuenca de poca extensión, con un nivel freático muy profundo y los pozos perforados fueron de poco caudal. En 1965 se acudió al OIEA en consulta sobre la posibilidad de emplear los isótopos naturales y aún los indicadores radiactivos, para tratar de localizar el depósito de aguas subterráneas y determinar sus dimensiones; en septiembre del mismo año se firmó un contrato de investigaciones en el cual el OIEA se comprometió a efectuar los análisis de riqueza isotópica de las muestras de agua y a colaborar en la interpretación de los resultados de los análisis.

Para empezar se emplearon los datos isotópicos procedentes de las estaciones de Pohang y de Tokio para determinar el contenido aproximado de tritio durante los años anteriores y para establecer un valor aproximado de la relación D/O^{18} en el almacenamiento subterráneo de la precipitación en Cheju. Se hizo una estimación preliminar de la situación hidrológica comparando los valores de concentración del D, O^{18} y del T en el agua tomada de los manantiales, pozos y corrientes con los valores calculados para Cheju a partir de las observaciones en Pohang y Tokio. La comparación de los valores Pohang-Tokio y los reales medidos en las aguas de Cheju, continuada desde entonces conforme se iba desarrollando el programa, ha ido perfeccionando las hipótesis hidrológicas iniciales.

Del análisis e interpretación de los datos ha sido posible construir un esquema hidrológico para Cheju y establecer el origen, movimientos y abundancia de las aguas subterráneas de la isla. Esquemáticamente, Cheju tiene en su masa una permeabilidad de fractura, con infiltración rápida y corrientes en el subsuelo; parte del agua subterránea se descarga enseguida por manantiales situados a gran altura, pero la mayor parte del agua entrada alimenta una gran reserva de agua dulce con gran mezcla. Este depósito del subsuelo se descarga a través de fuentes situadas cerca de la línea costera y, probablemente, a través de otros manantiales submarinos. El gran caudal y la composición isotópica del agua de algunas fuentes situadas a gran altura sugieren una compartimentación de las aguas subterráneas, como en las islas Hawaii; sin embargo,

la concentración uniforme del tritio es una prueba evidente de la mezcla total que se produce en el depósito principal.

Algunas de las deducciones anteriores son únicas y han podido obtenerse solamente mediante el análisis de los resultados de las medidas isotópicas; otras sólo habrían podido lograrse por medio de una campaña de sondeos larga y costosa.

Situación actual y planes para el futuro

La hidrología isotópica no es bien conocida en el plano de los trabajos prácticos ni por muchos hidrólogos ni meteorólogos; esto es debido, en parte, a la novedad de los métodos técnicos y en parte, a la falta de publicidad y de información. Los informes de trabajo y los artículos técnicos ven la luz casi siempre en revistas de ciencia nuclear y en publicaciones especializadas de las Naciones Unidas, siendo leídos principalmente por científicos nucleares más bien que por los hidrólogos. Las peticiones de asesoramiento y de ayuda en una investigación sobre problemas hidrológicos proceden con más frecuencia de los organismos nacionales de energía atómica que de los servicios meteorológicos o hidrológicos.

El OIEA ha intentado modificar esta situación publicando en 1968 una *Bibliography on Isotope Techniques in Hydrology, Vol. I (1957-65)* y una *Guidebook on Nuclear Techniques in Hydrology*. Esta guía de métodos radiactivos e isotópicos en la investigación hidrológica suministra las informaciones necesarias sobre los principios y aplicaciones de los métodos nucleares que se emplean en la actualidad en los estudios hidrológicos. Se dispone también de un esquema que presenta el problema hidrológico, los métodos adecuados (radiactivos o isotópicos) y el estado actual de desarrollo de cada uno de éstos, y diversas referencias; este diagrama puede enviarse a petición de la entidad interesada. El autor de la guía de procedimientos, así como del diagrama, ha sido el grupo de trabajo de Unesco/DHI «en procedimientos nucleares aplicados a la Hidrología», del cual grupo el OIEA desempeña la Secretaría. Aparte lo anterior, siempre puede obtenerse un asesoramiento del OIEA sobre aplicaciones nucleares hidrológicas.

Los métodos isotópicos no ofrecen atajos mágicos a los trabajos hidrológicos; su mayor valor se obtiene cuando se emplean mediante la colaboración estrecha del meteorólogo o hidrólogo y el especialista de isótopos. Así se está seguro de que las investigaciones darán los resultados que se buscan.

BIBLIOGRAFIA

(1) BEGEMANN, F. y LIBBY, W. F. (1957): *Continental water balance, groundwater inventory and storage times. Surface ocean mixing rates and world-wide circulation patterns from cosmic ray and bomb tritium*. Geochim. Cosmochim. Acta 12, págs. 277-96.

(2) ERIKSSON, E. (1961): *Tritium and the circulation of water in nature*. Bol. OMM. Vol. X, N.º 4, págs. 212-216.

(3) LEE, Chong Kun (1968): *The application of environmental isotopes and artificially introduced tracers in the hydrology of a volcanic island*. Progress Report for IAEA Research Contract N.º 367.