

Isótopos en estudios climatológicos

Los isótopos ambientales nos están ayudando a comprender el clima mundial

por Kazimierz Rozanski y Roberto Gonfiantini

El inusitado interés que se ha despertado en los últimos tiempos por los estudios sobre el clima obedece fundamentalmente a la creciente preocupación de los científicos de que la rápida expansión de los efectos de la actividad humana en el ecosistema del globo pueda cambiar sobremanera el clima del mundo en un futuro cercano. El motivo principal de esta preocupación es el cambio observado en la atmósfera terrestre, tal vez el componente más vulnerable de toda la ecosfera.

Los datos de observación muestran claramente que, como resultado de las emisiones antropogénicas, está cambiando la concentración en el aire de algunos gases traza, como, por ejemplo, el dióxido de carbono, el metano, el monóxido de carbono, el ozono, los hidrocarburos cloro-fluorados (CFC), el óxido de nitrógeno y el óxido de azufre. Estos cambios pueden acarrear consecuencias dañinas y de largo alcance en el futuro cercano por sus efectos directos en la biosfera (incluidos los seres humanos) e, indirectamente, mediante la alteración de las condiciones que sustentan la vida. El calentamiento del globo provocado por el rápido aumento de la concentración de algunos componentes de la atmósfera, conocido como el "efecto de invernadero", es un ejemplo convincente de esas consecuencias.

De hecho, la temperatura media del aire en la superficie del globo está aumentando desde hace un siglo debido, tal vez, a que la Tierra atraviesa una de sus otrora frecuentes oscilaciones climáticas menores. Sin embargo, se prevé que, en un futuro cercano, la tasa de calentamiento de la atmósfera terrestre —cerca de medio grado Celsius en los últimos 100 años— aumente drásticamente y tenga las graves consecuencias que se han anunciado, tales como la reducción de los casquetes de hielo polar y la consiguiente elevación del nivel del mar e inundación de las zonas costeras bajas, cambios en la distribución de las precipitaciones y en los regímenes fluviales y aumento de zonas áridas.

Ese aumento previsto en la tasa media de calentamiento del globo en las capas inferiores de la atmósfera se debe a la energía adicional retenida por algunos gases traza que interceptan los rayos infrarrojos de la Tierra y evitan que éstos escapen al espacio exterior. La concentración en el aire del dióxido de carbono y metano, que son los gases con efecto de invernadero más importantes, ha aumentado desde mediados del siglo pasado, debido sobre todo, aunque no únicamente, al creciente consumo de combustibles fósiles. (Véase el Cuadro 1.)

No obstante, la complejidad de las interacciones ambientales y el conocimiento aún incompleto de los mecanismos meteorológicos y climatológicos del globo hacen que los pronósticos sobre el comienzo y la extensión del efecto de invernadero sean de hecho imprecisos. Por ejemplo, aún estamos lejos de comprender cabalmente los procesos que regulan la composición de la atmósfera y los mecanismos de realimentación que actúan entre los compartimentos principales (atmósfera, hidrosfera, biosfera, geosfera) del ecosistema global y que determinan la respuesta del clima a las fuerzas internas y externas. En los últimos años se ha hecho evidente que un mayor conocimiento de la dinámica de este sistema, no lineal y extremadamente complejo, solo es posible mediante un enfoque integrado que combine dos direcciones generales de investigación encaminadas a:

- **La comprensión del clima actual**, que incluye la evaluación de las tendencias de los datos de observación, el mejoramiento y perfeccionamiento de los modelos de circulación general de la atmósfera, una mayor comprensión del papel que desempeña la circulación oceánica en el clima, la identificación y evaluación de importantes mecanismos de realimentación y, por último, la evaluación de las fuentes y los sumideros de los gases con efecto de invernadero.

- **La comprensión del clima de tiempos pasados**, que comprende una mejor caracterización de las fluctuaciones climáticas pasadas, incluyendo una mejor definición de sus causas, momento de ocurrencia y amplitud, la reconstrucción pormenorizada del comportamiento del ecosistema global durante las grandes transiciones glaciales/interglaciales y la elaboración de modelos que permitan proyectar con eficacia las fluctuaciones climáticas en el futuro.

Los isótopos ambientales, cuya distribución en los compuestos naturales se rige por las condiciones ambientales, son uno de los instrumentos más poderosos para investigar las variaciones climáticas y la respuesta del medio ambiente a dichas variaciones. En el presente artículo se expone brevemente cómo estos isótopos han propiciado el surgimiento de nuevos puntos de vista sobre la climatología y la paleoclimatología. También se da a conocer el papel que desempeña el OIEA en la toma y elaboración de datos isotópicos adecuados para las investigaciones relacionadas con el clima y su evolución.

¿Cómo actúan los isótopos?

Quizás la aplicación más característica de los isótopos ambientales en la geoquímica es su empleo como instrumento

El Sr. Gonfiantini es Jefe de la Sección de Hidrología Isotópica de la División de Ciencias Físicas del OIEA, y el Sr. Rozanski es funcionario de la Sección.

Cuadro 1. Tendencias en las concentraciones de los principales gases traça contenidos en la atmósfera

Gas	Concentraciones		Tendencias observadas entre 1975 y 1985 (%)	Mediados del siglo XXI
	Antes de 1850	1985		
CO ₂	275 ppmv	345 ppmv	4,6	400-600 ppmv
CH ₄	0,7 ppmv	1,7 ppmv	11,0	2,1-4 ppmv
N ₂ O	0,285 ppmv	0,304 ppmv	3,5	0,35-0,45 ppmv
CFC-11	0	0,22 ppbv	103	0,7-3 ppbv
CFC-12	0	0,38 ppbv	101	2,0-4,8 ppbv

Fuente: Tomado de V. Ramanathan, *Science*, **240** (1989) págs. 293 a 299.

ppmv = partes por million (en volumen).

ppbv = partes por mil millones (en volumen).

de datación. Se ha desarrollado una gran diversidad de métodos, basados en la desintegración de los isótopos radiactivos o en la acumulación de isótopos hijos, que permiten determinar la edad de las aguas subterráneas, hielo, rocas, sedimentos y otros.

Ultimamente se ha producido un renacimiento de estos métodos con el desarrollo de la espectrometría de masas con acelerador, novedosa técnica analítica que permite detectar bajas concentraciones de isótopos radiactivos ambientales en muestras muy pequeñas.

En climatología se pueden aplicar, en principio, numerosos métodos de datación isotópica para fijar la escala de tiempo correcta de sucesos climáticos anteriores; la selección depende del intervalo de edad y de la naturaleza del sistema que se investiga. Se utilizan radisótopos tanto naturales (cosmogénicos o originados *in situ*) como antropogénicos. Con mucho, el método de datación más difundido era, y quizás

sigue siendo, el basado en el carbono 14, isótopo radiactivo del carbono con un período de semidesintegración de 5730 años, que permite determinar edades que oscilan entre algunos cientos de años y, aproximadamente, 40 000 años. Actualmente se utilizan en paleoclimatología otros radisótopos con períodos de semidesintegración mucho más cortos o mucho más largos que el del carbono 14. (Véase el Cuadro 2.)

La concentración de isótopos estables en compuestos naturales varía debido a su comportamiento ligeramente diferente en los procesos físico-químicos naturales, derivado de su diferente masa. Como la magnitud de estos efectos o fraccionamientos isotópicos es una función de los parámetros que caracterizan el proceso, entre los que la temperatura es el más importante, se obtiene información sobre las condiciones ambientales en el momento de ocurrir el proceso a partir de la composición isotópica del agua, hielo y minerales.

Cuadro 2. Isótopos utilizados en la investigación climatológica

Isótopo	Tipo de material investigado	Tipo de información climática derivada
Isótopos estables: Deuterio (hidrógeno 2) Oxígeno 18 Carbono 13	— sedimentos marinos — sedimentos lacustres — capas de hielo — depósitos de cuevas — aguas subterráneas — precipitación	Temperatura del océano, circulación oceánica, volumen de las capas de hielo, temperatura del aire, humedad relativa, dinámica del ciclo del agua a escala regional y mundial
Radisótopos antropogénicos: Tritio (hidrógeno 3) Cripton 85 Cesio 137 Carbono 14	— agua de los océanos — carbonatos oceánicos — sedimentos lacustres — aguas subterráneas — precipitación — atmósfera	dinámica de los océanos, dinámica de la atmósfera, tasas de sedimentación
Radisótopos naturales: Radón 222, plomo 210, argón 39 Carbono 14, torio 230, protactinio 231 Uranio 234, uranio 238, potasio 40	— sedimentos marinos — sedimentos lacustres — depósitos de cuevas — agua de los océanos — aguas subterráneas — atmósfera	Datación de sedimentos de fondos marinos, datación de sedimentos lacustres, datación de depósitos de cuevas, datación de aguas de los océanos, datación de aguas subterráneas, dinámica de la atmósfera

Las variaciones de isótopos estables que más suelen aplicarse en las investigaciones climatológicas son las de los isótopos pesados de hidrógeno y oxígeno, es decir, hidrógeno 2 (o deuterio) y oxígeno 18, que permiten seguir eficazmente los cambios inducidos por el clima en el ciclo hidrológico. También el carbono 13, isótopo estable pesado del carbono, es un excelente indicador del clima.

En resumen, podemos decir que en la climatología geoquímica, así como en otras esferas de la geoquímica, los radisótopos ambientales se emplean como indicadores de la edad y los isótopos estables como indicadores de la temperatura. En la breve reseña que figura a continuación se presentan los aportes principales que han hecho las técnicas de isótopos ambientales a la investigación sobre la transformación del clima del planeta.

El océano

Dada su relativa homogeneidad, el océano es un medio idóneo para registrar las principales variaciones climáticas a largo plazo. Es más, debido a su gran masa y a la consiguiente inercia térmica, química e isotópica, los efectos de las fluctuaciones climáticas a corto plazo son limitados y a menudo insignificantes.

Los sedimentos marinos constituyen la primera fuente importante de datos isotópicos utilizados en paleoclimatología. La relación oxígeno 18/oxígeno 16 en las conchas carbonatadas de los protozoos marinos denominados foraminíferos, que se encuentran presentes en los perfiles de sedimentos marinos, es una función del valor de dicha relación en el agua de mar y de su temperatura. Estos dos factores actúan en la misma dirección durante las fluctuaciones climáticas glaciales/interglaciales, aumentando las variaciones isotópicas en el carbonato de calcio formado. Se ha comprobado que las variaciones de la relación oxígeno 18/oxígeno 16 en las conchas de foraminíferos concuerdan razonablemente con las variaciones previstas de insolación inducidas por los cambios cíclicos de los parámetros orbitales de la Tierra y con las consiguientes fluctuaciones climáticas pronosticadas por la teoría de Milankovitch. Mediante la datación paralela de capas de sedimentos haciendo uso del radiocarbono, el desequilibrio de la serie del uranio y el método potasio-argón, se ha podido establecer una cronología detallada y evaluar las variaciones de la temperatura de los océanos durante la mayor parte del Cuaternario. (Véase la figura 1B.)

La aplicación de las técnicas de los isótopos ambientales en la oceanografía física contemporánea puede considerarse asimismo como un aporte indirecto a la climatología. En realidad, pese a la considerable homogeneidad de los océanos actuales, siempre se observan pequeñas diferencias en la composición isotópica y química. Estas diferencias, así como las variaciones de tritio y carbono 14, pueden utilizarse para seguir el destino final de diferentes masas de agua, para establecer sus modalidades de circulación a niveles profundos y para investigar el proceso de mezclado entre los niveles poco profundos y profundos del océano. El estudio de la circulación oceánica actual es esencial para comprender los efectos del océano en el clima y en la meteorología mundiales.

Medio ambiente continental en las altas latitudes: Casquetes de hielo

Los grandes casquetes de hielo que existen en las altas latitudes (Groenlandia, Antártida) resultaron excelentes archivos

del clima del Pleistoceno. En realidad, gran parte de lo que conocemos sobre las variaciones climáticas del Cuaternario se deriva de estudios sobre la composición isotópica de la cubierta de hielo polar.

Los casquetes de hielo, formados por la precipitación de nieve sobre extensas regiones casi llanas, con temperaturas medias anuales negativas, conservan la estratificación vertical, aunque el espesor de las capas anuales disminuye con la profundidad, sobre todo, a causa del proceso de compactación, que hace que la nieve se transforme primero en hielo granular y luego en hielo compacto.

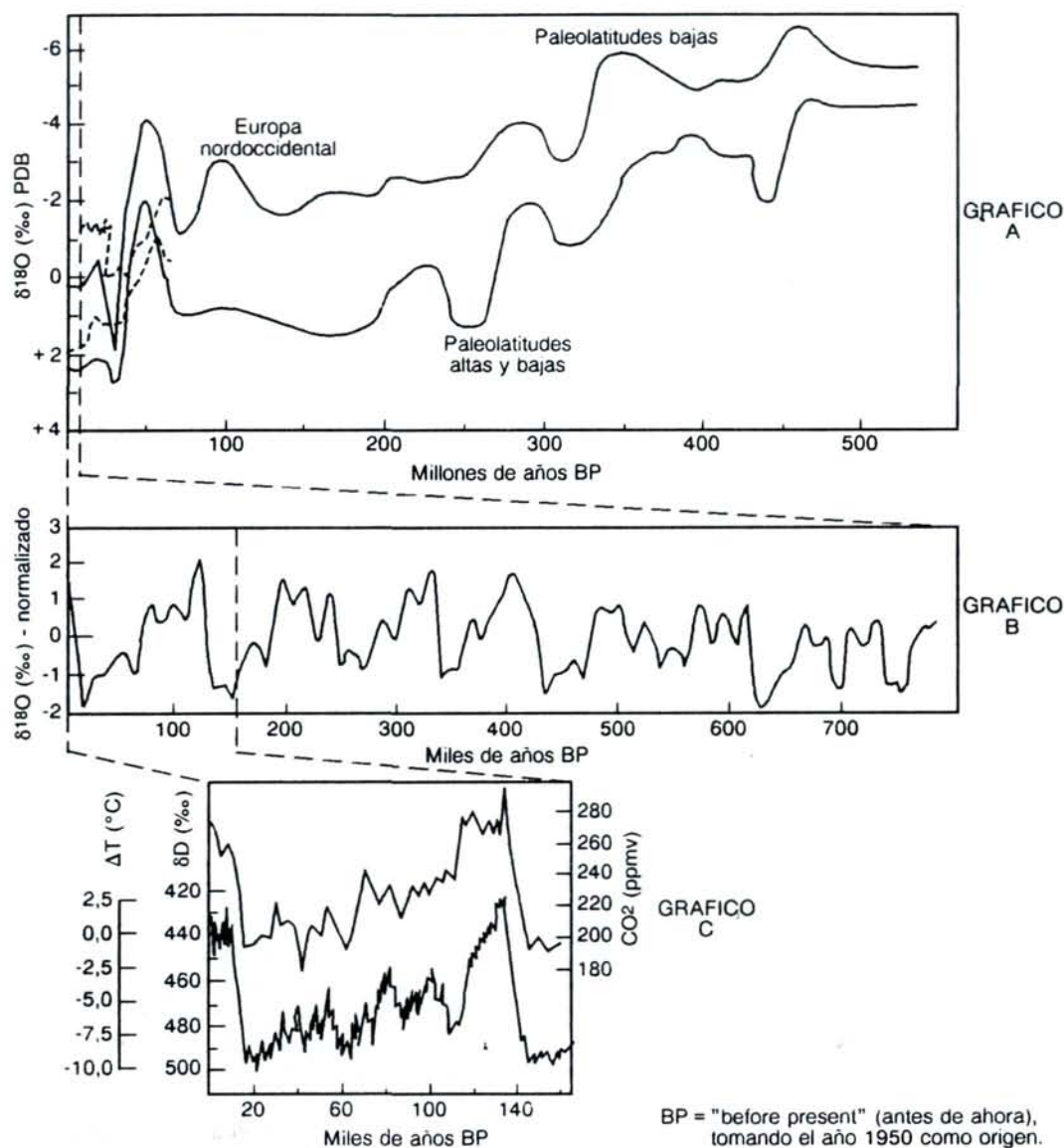
Las relaciones oxígeno 18/oxígeno 16 e hidrógeno 2/hidrógeno 1 en las precipitaciones dependen en gran medida de la temperatura de su formación: una menor temperatura de formación provoca precipitaciones isotópicamente empobrecidas. En latitudes medias y altas, donde las variaciones estacionales de las temperaturas son considerables, se producen variaciones estacionales paralelas en la composición isotópica de las precipitaciones, que se traducen en una concentración de isótopos pesados mayor en verano que en invierno. El casquete de hielo conserva estas variaciones isotópicas estacionales hasta una profundidad considerable (entre 1 y 1,5 km), a pesar de que la difusión tiende a atenuar las diferencias. El recuento de los ciclos isotópicos anuales a lo largo de un perfil vertical constituye un método de datación del hielo y de evaluación de la tasa de acumulación.

La correlación entre temperatura y composición isotópica también permite identificar el hielo depositado durante los períodos glaciales, debido a que tiene una concentración muy reducida de isótopos pesados en relación con la precipitación de épocas más recientes. De hecho, esto ha sido observado en todas las perforaciones profundas realizadas en los casquetes de hielo hasta la fecha. Las variaciones en el contenido de oxígeno 18 y de deuterio conservado en el hielo han hecho posible la reconstrucción detallada de las paleotemperaturas de altas latitudes durante el último ciclo glacial/interglacial. (Véase la figura 1C.) Además, gracias a los análisis químicos de las burbujas de aire atrapadas en el hielo y de la composición isotópica de éste, ha sido posible reconstruir la historia sobre los cambios de concentración en el aire del dióxido de carbono y del metano durante los últimos 160 000 años. El perfil de la concentración de dióxido de carbono obtenido en la perforación de la capa de hielo de la estación Vostok (Antártida) (figura 1C), simula la curva de temperatura derivada del perfil de deuterio, e indica una relación marcada entre el dióxido de carbono y el clima. Se estima que las variaciones de dióxido de carbono observadas están más vinculadas con los cambios en la circulación oceánica inducidos por el clima que, directamente, con el efecto de invernadero. Para hacer una interpretación más precisa habría que determinar, ante todo, la variación del contenido de carbono 13 en el dióxido de carbono extraído de las burbujas de aire. Los perfiles de dióxido de carbono y de isótopos obtenidos en las perforaciones de las capas de hielo de Groenlandia revelan una extraordinaria similitud con los perfiles de la Antártida, lo que denota un sincronismo general en las principales transiciones climáticas que han tenido lugar en los hemisferios septentrional y meridional.

El medio ambiente continental en las latitudes medias y bajas

Los estudios que se acaban de examinar de manera sucinta se refieren al medio ambiente marino y polar, los cuales resultan casi ideales para las investigaciones isotópicas; el primero,

Figura 1. Isótopos ambientales como indicadores paleoclimáticos



En estos gráficos se muestran ejemplos seleccionados de variaciones inducidas por el clima en las concentraciones de oxígeno 18 y de deuterio que se conservan en los archivos ambientales, a saber, sedimentos oceánicos y capas de hielo polar. Las líneas continuas del gráfico A muestran las variaciones en la composición isotópica de oxígeno de macrofósiles marinos bien conservados. Según algunas hipótesis, este registro isotópico puede convertirse en registro de la temperatura. Se estima que las variaciones isotópicas ocurridas hace más de unos 50 millones de años se debieron, principalmente, a bruscos cambios en la circulación oceánica que provocaron diferencias isotópicas sustanciales entre el océano poco profundo y el océano profundo.

En el gráfico B se muestra la curva compuesta de las variaciones de oxígeno 18 en las conchas de foraminíferos extraídas de cinco perforaciones de sedimentos de fondos marinos. Los efectos isotópicos asociados con la evaporación y condensación del agua oceánica propiciaron el almacenamiento preferencial del oxígeno 16 en las capas de hielo que avanzaban durante el comienzo del período glacial y el consiguiente enriquecimiento del resto del océano. El retroceso de las capas de hielo devuelve al océano esas aguas isotópicamente empobrecidas. Por otra parte, la cristalización fraccionada de los isótopos de oxígeno 18 entre el carbonato de las conchas de foraminíferos y el agua de mar depende de la temperatura: las conchas formadas a temperaturas oceánicas menos elevadas suelen estar enriquecidas en oxígeno 18. Según los cálculos, cerca del 70% de la amplitud total de las variaciones de oxígeno 18 que se observan en este gráfico es el resultado de los cambios en el volumen de las capas de hielo. El resto se debe a las variaciones de la temperatura.

En el gráfico C se muestran los cambios de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera, conservada en forma de burbujas de aire, (curva superior) y de la temperatura del aire superficial derivada del perfil isotópico del deuterio (curva inferior), ambos en función del perfil de edad correspondiente a la perforación de la capa de hielo de la estación Vostok. El perfil del dióxido de carbono simula la curva de temperatura e indica una estrecha vinculación entre las variaciones del contenido de dióxido de carbono en la atmósfera y el clima.

Notas: Las concentraciones de deuterio y de oxígeno 18 se expresan en valores δ de la desviación δ en tantos por mil con respecto al patrón: PDB para el oxígeno 18 en los carbonatos y V-SMOW para el oxígeno 18 y el deuterio en el agua.

Fuentes: Gráfico A — tomado de L.B. Railsback, *Geochimica et Cosmochim. Acta*, 54 (1990) págs. 1601-1609. Gráfico B — Imbrie et al., *Milankovitch and Climate*, 1ª parte, Eds. A.L. Berger et al., D. Riedel Publishers (1984) págs. 269-305. Gráfico C — Barnola et al., *Nature*, 329, (1987) págs. 408-414.

por su homogeneidad, que permite detectar efectos de, relativamente, poca amplitud y el segundo, por sus variaciones climáticas más drásticas.

No obstante, también existe gran interés en detectar los cambios climáticos en regiones continentales de latitud media y baja. Este interés se ve estimulado por el hecho de que en las distintas regiones geográficas puede esperarse una respuesta climática a las fuerzas internas y externas bastante diferente en magnitud y momento de ocurrencia. No hay duda de que el conocimiento de los eventos climáticos que han tenido lugar en el pasado en todas las regiones del mundo sería sumamente instructivo para pronosticar las consecuencias de los futuros cambios del clima.

Los sedimentos lacustres son uno de los materiales continentales más valiosos para efectuar reconstrucciones paleoclimáticas. Estos materiales suelen contener carbonatos, cuya composición isotópica de oxígeno está controlada por la del agua del lago. En lagos "abiertos" con una rápida renovación de agua, la composición isotópica de ésta coincide con la precipitación sobre la cuenca del lago, la cual, a su vez, depende de la temperatura. Así, los valores mínimo y máximo en el contenido de oxígeno 18 del carbonato depositado reflejan los períodos de clima frío y templado.

Más complejo es el caso de los lagos casi "cerrados", donde la evaporación y el intercambio con la humedad atmosférica determinan en gran parte la composición isotópica del agua. En este caso, los cambios en el balance hídrico son los que definen las variaciones isotópicas del oxígeno registradas por el carbonato depositado; los períodos secos se caracterizan por el alto contenido de oxígeno 18 debido al aumento de la evaporación, proceso este en el que el agua isotópicamente más ligera escapa, preferentemente, del lago.

Los estudios isotópicos realizados hasta la fecha han permitido reconstruir en detalle las condiciones climáticas e hidrológicas reinantes durante la última transición glacial/interglacial y el Holoceno temprano en Europa Central, África Septentrional y América del Norte, regiones entre las que se hallaron diferencias sustanciales en cuanto a la estructura de esta transición y el momento en que se produjo. Por ejemplo, en los depósitos lacustres del Sáhara y el Sahel se han registrado varias oscilaciones de períodos húmedos y secos. En el Sáhara, los últimos episodios húmedos importantes tuvieron lugar entre 14 500 y 11 000, y entre 9300 y 7500 años atrás. Los datos isotópicos muestran que, probablemente, la mayor parte de las aguas subterráneas almacenadas en los acuíferos del Sáhara se recargaron en esos períodos.

Las aguas subterráneas también constituyen una fuente de información paleoclimática. Por lo general, la composición isotópica de las aguas subterráneas está relacionada con la composición isotópica media de la precipitación en la región de recarga. Por consiguiente, la composición isotópica de las aguas subterráneas refleja las variaciones isotópicas de la precipitación vinculadas a los cambios climáticos. También los gases nobles de la atmósfera disueltos en las aguas subterráneas (neón, argón, cripton, xenón) pueden facilitar, en condiciones favorables, una valiosa información paleoclimática. En los acuíferos granulares, las concentraciones de gases nobles en las aguas subterráneas están directamente asociadas con la temperatura media anual de la zona de recarga y, por tanto, pueden utilizarse para la reconstrucción de los cambios de temperatura ocurridos en el pasado.

Sin embargo, la utilización de las aguas subterráneas como indicador del clima plantea algunas dificultades. Pocas veces las aguas subterráneas pueden considerarse un sistema

cerrado. La difusión y la dispersión en los acuíferos, la mezcla entre las aguas subterráneas almacenadas en distintos acuíferos mediante infiltraciones o discontinuidades en las formaciones de separación y las interacciones con la matriz de la roca tienden a enmascarar o atenuar las diferencias climáticas y dificultan la datación de las aguas subterráneas con carbono 14. No obstante, en algunos acuíferos confinados del hemisferio septentrional se ha identificado una clara indicación climática: un cambio en el contenido de deuterio y de oxígeno 18 característico de la transición del último período glacial al Holoceno.

También el carbonato de calcio depositado en cuevas cársticas en formas diferentes (estalactitas, estalagmitas, etc.) puede resultar de utilidad en la paleoclimatología isotópica. Estos depósitos carbonatados se forman lentamente a partir de las aguas subterráneas filtradas durante largos períodos y casi alcanzan el equilibrio termodinámico en un medio donde se atenúan las variaciones estacionales de temperatura, humedad atmosférica y composición isotópica del agua y del dióxido de carbono disuelto. Por lo tanto, sólo las variaciones climáticas a largo plazo deberían ser responsables de la composición isotópica del carbonato de calcio y del agua atrapada en tales depósitos, cuya datación, por otra parte, suele realizarse con el método basado en el desequilibrio de las series del uranio.

Otro material adecuado para las investigaciones paleoclimáticas es la materia orgánica de las plantas, cuya composición isotópica de oxígeno e hidrógeno se relaciona, mediante una compleja cadena de procesos y reacciones químicas, con la del agua de los suelos y de la precipitación. Sin embargo, este material deberá utilizarse con cautela porque también puede reflejar las variaciones en el medio restringido donde crece la planta.

Atmósfera y modelos de circulación global

La determinación sistemática de la composición isotópica de las aguas meteóricas (precipitación y vapor atmosférico) ayuda a comprender los vínculos entre la precipitación y los factores principales que rigen las condiciones meteorológicas y el clima. En esta esfera ha desempeñado un papel primordial la red mundial de estaciones operada conjuntamente por el OIEA y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en la que, desde principios de los años sesenta, se toman muestras mensuales de precipitaciones para determinar el contenido de tritio, deuterio, y oxígeno 18. La mayoría de las muestras se analiza en el Laboratorio de Hidrología Isotópica del OIEA en Viena, y las demás, en varios laboratorios colaboradores. A propósito, la creación de redes nacionales en varios Estados Miembros ha hecho que en los últimos años haya aumentado el número de estaciones para las que se realizan análisis de la composición isotópica de las precipitaciones.

Esta base de datos isotópicos, única en su género, acumulada durante 30 años de observaciones y que sigue creciendo, ayuda a comprender las variaciones isotópicas en la precipitación, tanto en lo que respecta a las características geográficas y meteorológicas locales, como a la circulación atmosférica global. Las variaciones de los isótopos estables son consecuencia de los efectos isotópicos que acompañan cada etapa del ciclo del agua. Como ya se ha dicho, la temperatura es el parámetro de mayor influencia. (Véase la figura 2.)

Las variaciones de los isótopos estables en la precipitación son especialmente útiles para elaborar los modelos de circulación global. Estos modelos simulan el comportamiento de todo el sistema atmosférico, incluida su interacción con el océano,

y pueden utilizarse para pronosticar la respuesta del sistema a distintos tipos de fuerzas internas y externas, tales como la creciente concentración de gases con efecto de invernadero en la atmósfera y las variaciones de la insolación.

La eficacia de los modelos para hacer pronósticos depende de la medición adecuada de los parámetros y los isótopos son útiles para este fin. Los trazadores transitorios antropogénicos, tales como el tritio de las precipitaciones producido en ensayos nucleares atmosféricos, radiocarbono del dióxido de carbono y metano atmosféricos presentes en la atmósfera, y el criptón 85 liberado en la atmósfera por las centrales de procesamiento de combustibles nucleares, se utilizan para comprender la dinámica del sistema océano-atmósfera, es decir, las características generales de la circulación atmosférica y oceánica y su interacción. El tritio y los isótopos estables se utilizan para investigar el movimiento del vapor de agua entre los dos hemisferios y en los continentes, para evaluar la fracción de agua reciclada por la evapotranspiración y para estudiar la interacción entre la troposfera y la estratosfera. El radiocarbono y el carbono 13 sirven para evaluar el aporte de diversas fuentes (biogénicas o fósiles) al aumento de dióxido de carbono y de metano en la atmósfera y para investigar sus

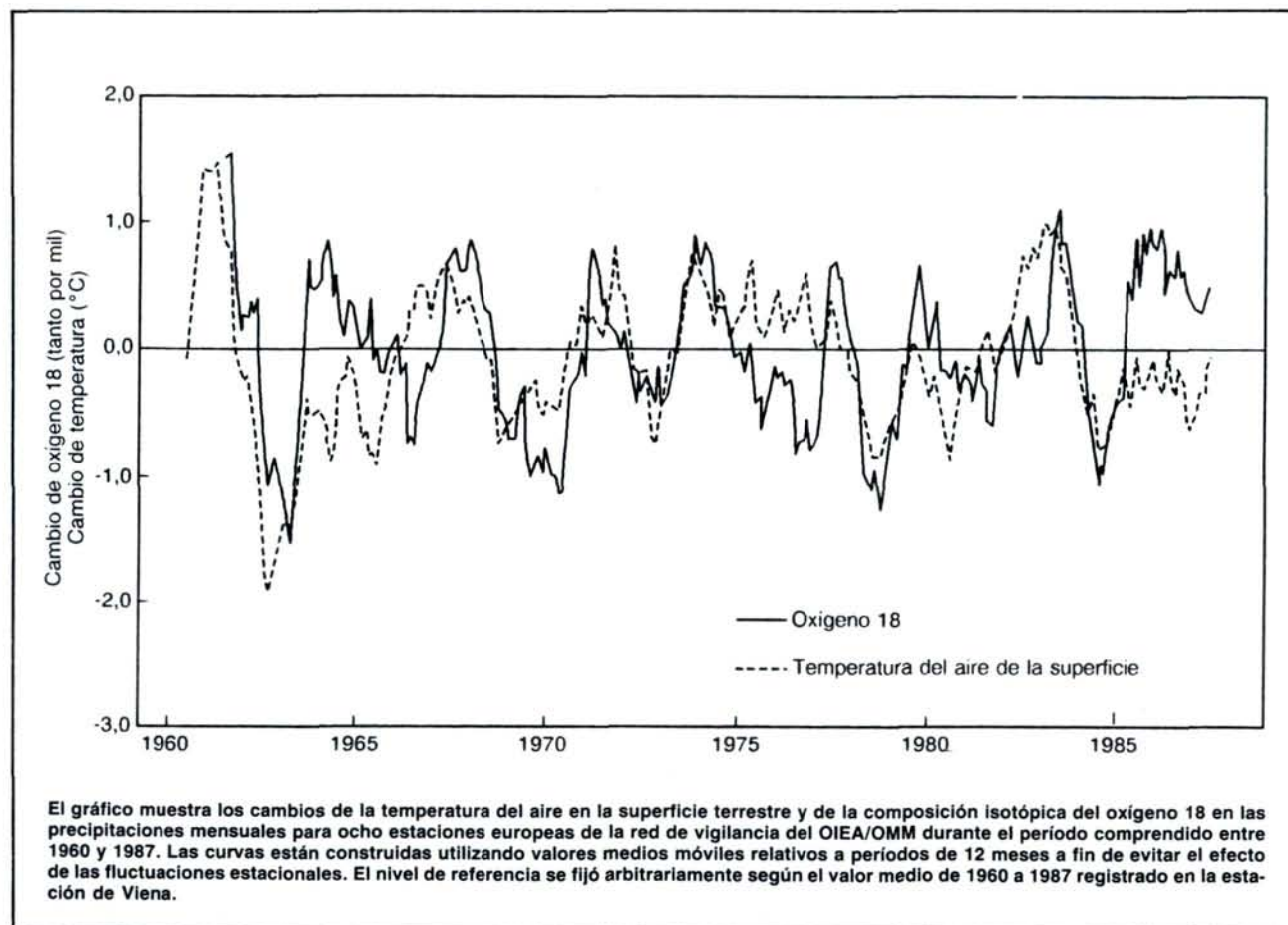
tiempos de permanencia, su eliminación a través de sumideros y su intercambio con el océano.

Investigaciones a escala internacional

La enorme cantidad de datos isotópicos de diversos tipos acumulada hasta la fecha ha demostrado que los isótopos ambientales son un instrumento inapreciable para investigar el clima. En especial si se estudia el clima del pasado, dichos datos pueden proporcionar información que de otro modo sería imposible obtener. Actualmente, en muchos laboratorios del mundo se realizan investigaciones climatológicas basadas en técnicas isotópicas, con el objetivo final, en muchos casos, de comprender cabalmente y pronosticar en detalle los cambios climáticos anunciados, que durante el siglo venidero ya comenzarán a hacerse sentir.

Hasta la fecha, la actividad principal del Organismo en lo referente a la meteorología y el clima ha sido la red OIEA/OMM para la investigación de los isótopos en las precipitaciones, que, en un principio, se utilizó para el estudio de la aplicación de isótopos ambientales en hidrología. Asimismo, a través de su Sección de Hidrología Isotópica, el Organismo ha

Figura 2. Fluctuaciones a largo plazo de la composición isotópica de las precipitaciones y de la temperatura del aire en la superficie



trabajado activamente en el campo de la paleohidrología, dada su relación directa con la evaluación de los recursos hídricos de los países áridos, a menudo constituidos por paleoaguas, es decir, aguas subterráneas recargadas en condiciones climáticas pasadas mucho más favorables*.

Por otra parte, hace 10 años se convocó una reunión de un grupo asesor sobre la aplicación de las técnicas isotópicas en las investigaciones paleoclimáticas relacionadas con los recursos hídricos, y el OIEA publicó las actas con el título *Palaeoclimates and Palaeowaters: A Collection of Environmental Isotope Studies*. (STI/PUB/621).

* Véase "La investigación de los recursos hídricos del desierto: La contribución de los isótopos". *Boletín del OIEA*, Vol. 23, N° 1 (1981).

Próximamente, la División de Ciencias Físicas y Químicas del OIEA se propone organizar dos programas coordinados de investigaciones (PCI) sobre estudios climatológicos. El primero, dedicado a las variaciones isotópicas del dióxido de carbono y de otros gases traza contenidos en la atmósfera, tiene por objeto profundizar en el conocimiento sobre el papel que desempeñan los gases con efecto de invernadero y otros gases traza en el ecosistema del globo, investigar su dinámica y ampliar el conocimiento que se tiene hoy sobre sus tasas de liberación, así como los procesos naturales y antropogénicos para su eliminación. Se espera que este PCI comience en 1991, después de la celebración de una reunión preparatoria de consultores en diciembre de 1990.

El segundo PCI, que se prevé comenzar en 1992, se dedicará, fundamentalmente, a la reconstrucción paleoclimática de zonas continentales mediante el empleo de indicadores isotópicos. En este caso, también se convocará una reunión preparatoria de consultores a fines de 1991.