

# La composición química de la atmósfera polar: la contribución del API

por Øystein Hov<sup>1</sup>, Paul Shepson<sup>2</sup> y Eric Wolff<sup>3</sup>

## La atmósfera polar prístina

**La atmósfera polar se encuentra alejada de las fuentes de contaminación de las especies traza químicas.** Tradicionalmente se ha considerado su composición como una referencia limpia para el aire más contaminado que está situado por encima de los continentes y de sus zonas marinas adyacentes. Esta percepción de las regiones polares como algo limpio y simple a la vez ha variado de forma gradual durante las últimas décadas, a partir de las observaciones de calima y de visibilidad reducida por parte de pilotos de aviones que recorren rutas polares. Entre tanto, hace más de dos décadas que se ha descubierto que está disminuyendo el ozono estratosférico polar, de forma especialmente intensa en el Antártico.

Asimismo, a mediados de la década de 1980 se descubrieron episodios de disminución del ozono troposférico en la capa límite ártica de una magnitud sorprendente. Más adelante se descubrió que estos episodios coinciden con la desaparición del mercurio elemental gaseoso. Igual de inesperado ha sido el hallazgo de que la acumulación de nieve constituye una fuente de varias sustancias químicas con importancia fotoquímica, como es el caso del bromo, los óxidos de nitrógeno, el ácido

nitroso y el formaldehído, y de aquellas que, en algunos lugares, dominan los procesos químicos que ocurren en las partes inferiores de la atmósfera.

Tanto los episodios de disminución del ozono troposférico como las emisiones fotoquímicas de la nieve se observan en los alrededores de ambos polos y son indicativos de unos procesos químicos imprevistos que no están relacionados directamente con la contaminación, pero cuyos efectos podrían verse alterados en gran medida por el clima cambiante. En efecto, el clima está cambiando en el Ártico y en algunas zonas del Antártico con una variabilidad y tendencia significativamente mayores que la media del planeta. Durante más de veinte años ha disminuido la extensión de los hielos marinos en el Ártico. Los procesos químicos que tienen lugar en el interior de las acumulaciones de nieve iluminadas por el sol vienen determinados por la superficie y una superficie polar que cambia, probablemente, modificará este comportamiento químico.

El Año Polar Internacional ofrece la oportunidad de organizar, desde la perspectiva del sistema terrestre, un estudio internacional de la composición química de la atmósfera polar en los dos hemisferios. Son importantes los mecanismos de intercambio así como los agentes que gobiernan el intercambio de especies traza químicas entre la atmósfera, las superficies

terrestres, los océanos y las superficies de nieve y hielo, que dependen del estado físico, químico y biológico de los componentes del sistema de la Tierra. Es preciso prestar atención a las escalas espaciales acopladas a nivel local, regional y global, y a los mecanismos de acoplamiento entre el clima, la destrucción de ozono en la estratosfera y en la capa límite y los cambios medioambientales vinculados al transporte a gran escala de sustancias contaminantes (en particular, los aerosoles, incluidos los contaminantes orgánicos persistentes). Necesitamos comprender el sistema lo suficientemente bien como para cuantificar los efectos de los futuros cambios en el clima y en las proporciones relativas de las superficies de nieve, tierra y océano con respecto a la atmósfera, con las correspondientes realimentaciones.

## ¿Cuán remota se encuentra la troposfera polar?

El Ártico y el Antártico exhiben situaciones geográficas y dinámicas bastante diferentes. La región ártica consiste en un océano, a menudo recubierto por hielos marinos, que está rodeado por masas de tierra a una latitud relativamente alta. Durante el invierno, el Ártico puede presentar concentraciones bastante elevadas de contaminantes de origen antropogénico que se han desplazado a gran distancia, ya que muchos de los mecanismos de eliminación se hallan inactivos. Por otro lado, el Antártico es un continente polar rodeado de

1 Instituto Meteorológico Noruego, PO BOX 43 Blindern, NO-0313 Oslo (Noruega)

2 Centro de Investigación del Cambio Climático de Purdue, 503 Northwestern Ave., West Lafayette, IN 47907 (EEUU)

3 British Antarctic Survey, High Cross, Madingley Road, Cambridge CB3 0ET (Reino Unido)

océano (también recubierto por hielo marino), pero que no tiene masas de tierra habitadas hasta Sudamérica, a 55°S, y otros continentes mucho más al norte. La enorme distancia a las principales fuentes de contaminación, los vientos catabáticos que fluyen hacia el exterior a niveles bajos y la naturaleza aislante de la circulación atmosférica se combinan entre sí para mantener el Antártico relativamente alejado y limpio. Las medidas realizadas en núcleos de hielo muestran, por ejemplo, que en contraste con lo que ocurre en el Ártico, aún no se registra un aumento significativo de la concentración de sulfato o de nitrato en la nieve antártica (ni, por lo tanto, en el aire), aunque sí se han observado niveles más altos de metales como el plomo y, de hecho, los núcleos de hielo antárticos han constituido una rica fuente de información relativa al aumento global de gases traza como el dióxido de carbono, el metano o el óxido nítrico (MacFarling Meure y otros, 2006).

Las temperaturas árticas en la superficie pueden llegar a ser muy bajas, especialmente por encima de la superficie de la nieve y del hielo durante el invierno, lo que da lugar a una estratificación estable con frecuentes y persistentes inversiones en superficie que reducen el intercambio de aire entre la superficie y la troposfera situada por encima de ella. En estas condiciones, se inhibe la eliminación en el suelo de los contaminantes atmosféricos, ampliándose la vida de las especies que se eliminan a través de la deposición seca. Este es el caso de, entre otros, los aerosoles atmosféricos, el ozono, el dióxido de azufre, el dióxido de nitrógeno y el ácido nítrico.

El débil intercambio con el aire de encima explica también, al menos de forma parcial, por qué los procesos que afectan al suelo, como los episodios de destrucción de ozono y la producción fotoquímica en la nieve, ejercen un efecto tan intenso sobre los procesos químicos de la capa límite. Un proceso lento de mezcla vertical tiende a fortalecer el ritmo de disminución del ozono en las proximidades de la capa superficial, ya que es una función de  $[BrO]^2$ ; este último disminuye rápidamente conforme aumenta la turbulencia. Una mezcla lenta frena también el ritmo de mezcla, de arriba a abajo, del aire

rico en ozono con la capa superficial mermada.

Las precipitaciones que tienen lugar en el Ártico son muy bajas (la precipitación anual registrada en Svalbard está comprendida entre 150 y 300 mm). Esto significa que la depuración húmeda no es eficaz, de modo que la vida de especies solubles como los aerosoles es mayor que en los continentes del sur. Durante la noche polar, en la atmósfera ártica prácticamente se detiene la eliminación de componentes traza mediante agentes químicos en fase gaseosa. En ausencia de la luz solar, el ritmo de producción del radical hidroxilo (que es el principal agente depurador en fase gaseosa), es bajo. Asimismo, en la parte del año en la que se recibe la luz solar, la vida química de los componentes traza es relativamente larga en la atmósfera polar (salvo en la capa próxima a la superficie que se ve afectada por los procesos fotoquímicos que tienen lugar en las acumulaciones de nieve) debido a la fuerte atenuación de la luz solar visible de onda corta en la medida que la elevación del Sol es pequeña y hay una baja humedad específica. Todos estos factores ponen de manifiesto que la mayor parte de los aerosoles y de los gases tienen una vida más larga en la atmósfera polar que en latitudes inferiores. Sin embargo, existen excepciones para las especies que reaccionan específicamente con átomos y radicales halógenos, como por ejemplo el mercurio elemental gaseoso.

La eliminación a causa de los procesos químicos, la precipitación o la deposición seca compite con la eficacia del intercambio de aire entre la atmósfera polar y el aire de latitudes más meridionales. En ausencia de calentamiento diabático o de liberación de calor latente, los procesos de transporte son adiabáticos y siguen las superficies isentrópicas. Estas superficies forman cúpulas cerradas sobre el Ártico, alcanzando valores mínimos en la capa límite ártica, según explican Iversen (1984) y Stohl (2006). La mayor parte de las regiones que son fuente de contaminación se encuentran demasiado calientes como para permitir un transporte isentrópico de la contaminación a lo largo de la superficie dentro del Ártico.

Durante el invierno, Eurasia septentrional es la región fuente más probable de

la contaminación que afecta al Ártico (p. ej., dióxido de azufre y aerosol de sulfato) y, en este caso, también puede ocurrir un enfriamiento diabático durante el transporte sobre las superficies cubiertas de nieve. El transporte desde el norte de Eurasia hacia el Ártico tiene lugar en situaciones de bloqueo donde la dirección del flujo predominante, del oeste hacia el este, se sustituye por un transporte meridional con una fuerte componente norte-sur. Este transporte es altamente episódico.

La contaminación norteamericana a menudo se calienta de forma diabática por medio de la advección frontal ("cintas transportadoras calientes") y se lleva a la troposfera libre ártica muy por encima de la capa límite. Las fuentes del sureste asiático se localizan a temperaturas potenciales aún mayores y en situaciones de contaminación de carácter episódico, en las que están implicadas emisiones de origen antropogénico o polvo procedente del desierto; pueden identificarse como capas con una elevada presencia de calima en la atmósfera polar. Un estudio climatológico realizado por Stohl (2006) muestra que las masas de aire al norte de 80°N que estén próximas a la superficie, permanecen allí, por término medio, alrededor de una semana en invierno y unas dos semanas en verano, lo que corresponde a una probabilidad más alta de que exista un transporte meridional en invierno o en primavera que en el verano. El tiempo medio de permanencia disminuye rápidamente con la altura hasta unos tres días de media en la troposfera superior. En las zonas más aisladas del Ártico, el aire se halla expuesto a una oscuridad continua durante 10-14 días por término medio en diciembre.

## Transporte a gran distancia de la contaminación atmosférica en el Ártico

El descubrimiento de la contaminación atmosférica polar y el inicio de intensos estudios científicos sobre la misma coincidió con la década (la de 1980) de máximas emisiones de origen antropogénico de dióxido de azufre en Europa, América del Norte y la antigua URSS. Los estudios de campo de la composi-

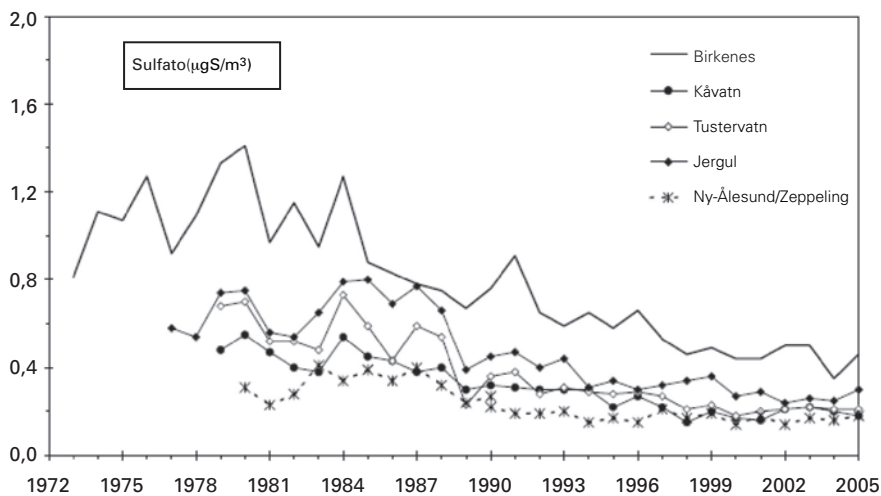


Figura 1 – Concentraciones anuales medias de aerosoles de sulfato no marino durante las últimas 2-3 décadas para emplazamientos rurales de medida a lo largo de una trayectoria norte-sur a través de Noruega y Spitsbergen, partiendo de Birkenes (58°N), Kårvatn (62°N), Tustervatn (65°N), Jergul (69°N) y Ny-Ålesund, Svalbard (78°N) (Aas y otros, 2006).

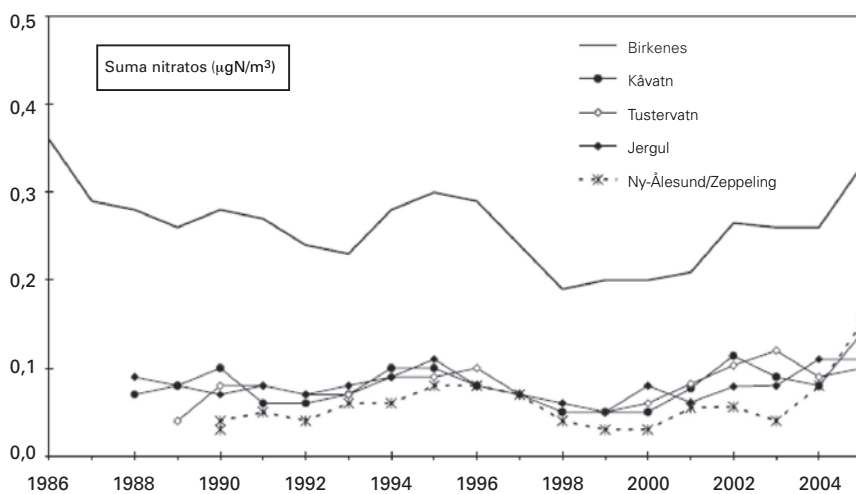


Figura 2 – Concentraciones anuales medias de aerosoles de la suma de nitrato y ácido nítrico durante las últimas 2-3 décadas para emplazamientos rurales de medida a lo largo de una trayectoria norte-sur a través de Noruega y Spitsbergen, partiendo de Birkenes (58°N), Kårvatn (62°N), Tustervatn (65°N), Jergul (69°N) y Ny-Ålesund, Svalbard (78°N) (Aas y otros, 2006).

ción atmosférica en el Ártico llevados a cabo hace un cuarto de siglo reflejaron esta circunstancia. Ottar y otros (1986) realizaron un importante trabajo de investigación de la carga contaminante en la atmósfera ártica noruega, en la primera mitad de la década de 1980, a partir de datos de superficie y de otros obtenidos desde aviones. Este trabajo siguió el espíritu del informe de la Organización de Cooperación y Desarrollo Económicos (1977), que documentaba la contribución de las emisiones europeas continentales a la deposición ácida en Escandinavia. En el estudio sobre el Ártico se concluyó que "La calima ártica invernal,

con niveles de concentración de contaminantes antropogénicos comparables a las concentraciones medias sobre los continentes industrializados, es debida a los contaminantes emitidos desde fuentes que se encuentran dentro de las masas de aire ártico".

La Figura 1 (Aas y otros, 2006) muestra las concentraciones anuales medias de aerosoles de sulfato no marino durante las últimas 2-3 décadas para emplazamientos rurales de medida a lo largo de una trayectoria norte-sur a través de Noruega y Spitsbergen, partiendo de Birkenes (58°N), Kårvatn (62°N), Tustervatn (65°N), Jergul (69°N) y Ny

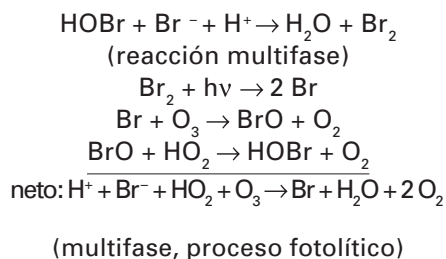
Ålesund, Svalbard (78°N). Existe un descenso significativo de las concentraciones con un factor de caída de cuatro en la concentración anual media de Ny-Ålesund desde principios de la década de 1980, reflejando la disminución de las emisiones de dióxido de azufre europeo y euroasiático (incluidas las emisiones volcánicas y las emisiones marinas naturales) en Europa y en la parte europea de la Federación Rusa, y el descenso del tráfico marítimo desde casi 50 Mt en 1990 hasta 21 Mt en 2004. La Figura 2 representa las curvas de tendencia de la concentración anual media de la suma del aerosol nitrato y el ácido nítrico. Las emisiones de los óxidos de nitrógeno variaron desde 28 Mt (para el dióxido de nitrógeno) en 1990 hasta 22 Mt en 2004. En Ny-Ålesund, no existe una tendencia clara de las concentraciones anuales medias de nitrato que es transportado por el aire y en 2005 se registró la concentración anual más elevada. Las tendencias de las concentraciones reflejan la disminución sustancial de las emisiones de dióxido de azufre (como consecuencia de la moderación de las emisiones de las centrales eléctricas) mientras que, en el caso de las emisiones de los óxidos de nitrógeno, el beneficio obtenido por una tecnología orientada a reducir emisiones a gran escala se ha compensado por un aumento del tráfico automovilístico en particular.

## Episodios de rápida disminución del ozono y del mercurio

A mediados de la década de 1980 se descubrieron episodios de rápida disminución del ozono en la fría y estable capa límite polar, en Barrow (Alaska), en Alert (norte de Canadá) y en Ny-Ålesund (Svalbard) (véase Simpson y otros, 2007, para encontrar las referencias). Durante los episodios primaverales, los niveles de ozono descienden desde niveles normales de más de 30 partes por mil millones (ppb) hasta niveles muy bajos e incluso inferiores a los límites de detección en cuestión de horas. Estas situaciones de disminución se han observado en localidades costeras del Antártico. Se ha averiguado que los halógenos están implicados en los procesos de destrucción del ozono con un

ciclo catalizado por radicales de bromo donde el bromo (Br) y el monóxido de bromo (BrO) son los más importantes en la destrucción del ozono. Niveles de concentración de Br+BrO del orden de 40 partes por billón (ppt) ( $1 \text{ ppt} = 1 \times 10^{-12}$ ) pueden ser suficientes para reducir el ozono desde 30 ppb ó más hasta prácticamente cero en un período de tiempo del orden de unas pocas horas ( $1 \text{ ppb} = 1 \times 10^{-9}$ ) en el proceso de destrucción catalítica, aunque la rapidez de muchos episodios puede atribuirse, asimismo, al transporte de masas de aire mermaidas de ozono desde zonas que se hallan por encima de los hielos marinos hasta el emplazamiento donde se realizan las mediciones. En la Figura 3 se muestra una serie temporal con la temperatura del aire y las concentraciones totales de mercurio gaseoso y ozono en Alert (Canadá), en 1995.

Se cree que la principal fuente del bromo reactivo (Br y BrO) es el bromuro procedente de la sal marina que se libera mediante reacciones fotoquímicas conocidas como la secuencia de la reacción explosiva del bromo:



Estos procesos químicos se relacionan estrechamente tanto con la química del cloro como con las emisiones de formaldehído y de ácido nitroso que tienen lugar en las acumulaciones de nieve, en la medida que todas ellas son importantes fuentes de  $\text{HO}_x$ , que es necesario para propagar la explosión del bromo, vía producción de ácido hipobromoso (HOBr). Se han desarrollado modelos para explicar el papel que juegan los procesos químicos del bromo y del yodo en los episodios de agotamiento del mercurio. El mercurio elemental gaseoso se convierte en una forma de mercurio soluble en agua con un tiempo de vida mucho más corto que el propio del mercurio, aumentando la deposición del mismo en los ecosistemas polares de modo muy significativo. El mercurio elemental se reemite desde la superficie tras la reducción de los productos depositados, y esta circunstancia puede atenuar la magnitud del impacto.

La nieve y el hielo que ilumina la luz solar desempeñan un papel importante en el proceso de las especies atmosféricas. La producción fotoquímica de sustancias químicas tiene lugar en la nieve y el hielo y, en consecuencia, las especies que se generan fotoquímicamente pueden liberarse a la atmósfera. Grannas y otros (2007) han llevado a cabo un estudio sobre el tema. Se han medido los flujos de compuestos carbonilos y de óxidos de nitrógeno en numerosos entornos cubiertos de nieve y, en algunos casos, las emisio-

nes impactan de manera significativa en la capa límite que los recubre. Por ejemplo, en el Polo Sur se ha observado una producción fotoquímica de ozono de 3-4 ppbv al día, debido a unos elevados niveles de hidroxilo y de óxido nítrico (incluso hasta 1 parte por mil millones en volumen (ppbv)) presentes en una capa límite relativamente poco profunda. Los experimentos de campo y de laboratorio han determinado que el origen del flujo observado de óxidos de nitrógeno se halla en los procesos fotoquímicos que sufre el nitrato dentro de las acumulaciones de nieve. Los compuestos orgánicos de bajo peso molecular se emiten también desde la nieve iluminada por la luz solar, y la fuente de los mismos puede ser la fotooxidación de las sustancias orgánicas naturales que están presentes en la nieve. Los procesos químicos fundamentales que ocurren en la nieve siguen sin conocerse bien, sobre todo los que afectan a los compuestos orgánicos. El papel de los procesos biológicos, que influyen en la química del yodo, por ejemplo, tampoco está bien definido en la actualidad.

## Cambio químico en la atmósfera polar a largo plazo

El API constituye un período de estudios intensivos que contribuirá a mejorar el conocimiento de los procesos del sistema terrestre que controlan los intercambios de especies químicas traza dentro de la atmósfera polar y su interacción con el sistema terrestre global y con el colectivo humano. La composición química de la atmósfera polar también refleja claramente la variabilidad y los cambios a largo plazo inducidos por el cambio climático y los cambios fundamentales que se producen en la biosfera, en la criosfera y en los océanos.

En algunos de los efectos invernadero que tienen lugar en el Ártico se utiliza el término "punto de inflexión" (pueden consultarse noticias al respecto en la revista *Nature*, 15 de junio de 2006, vol. 441, pp. 802-805) para referirse al momento en que la dinámica interna comienza a provocar un cambio que previamente fue impulsado por las fuerzas exteriores. Uno de estos puntos de

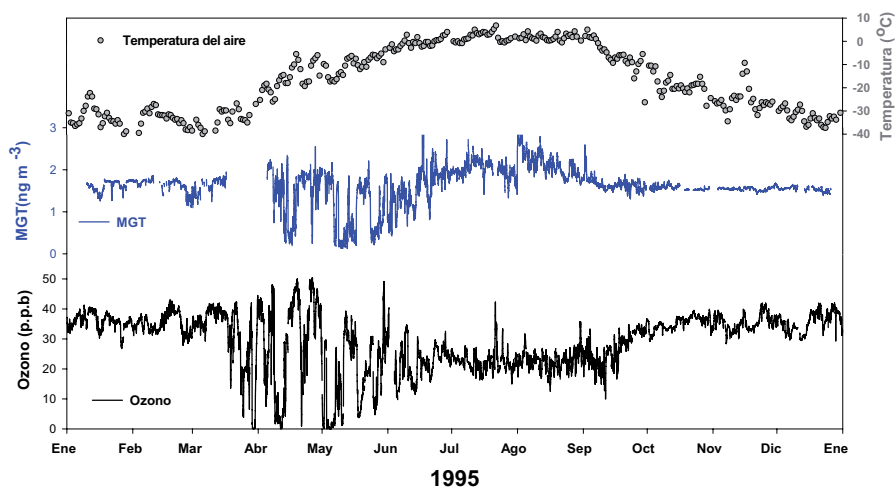


Figura 3 – Serie temporal con la temperatura del aire y las concentraciones de mercurio gaseoso total (MGT) y de ozono en Alert (Canadá), en 1995. Adaptado por A. Steffen de Schroeder y otros (1998) con autorización de Macmillan Publishers Ltd., *Nature*, 394, 331-332, © 1998.

inflexión está asociado al retroceso del hielo marino del Ártico en verano en una proporción media del 8% por década durante los últimos 30 años (Stroeve y otros, 2007) y a la reducción del espesor en aproximadamente un metro a lo largo del período 1987-1997.

Las aguas abiertas reflejan mucho menos la luz solar que el hielo y, en la medida que retrocede la cubierta de hielo, en el Océano Ártico se absorbe una mayor cantidad de la energía solar que se recibe durante el verano; existe un mayor flujo de calor del océano a la atmósfera, que da lugar a una realimentación climática positiva; y una menor probabilidad de que se produzcan inversiones estables en superficie en el futuro. Se inducen cambios en procesos que tienen una importancia capital para la estructura física de la atmósfera polar y para su composición química y biológica: la interacción entre el hielo y la atmósfera, incluido el plancton fotosintético del hielo; la estabilidad atmosférica en las proximidades del suelo; y la presencia de hielo marino como fuente de halógenos.

Parece ser que la disminución de la extensión del hielo también calienta la atmósfera, elevando las temperaturas árticas en la superficie, especialmente durante la primavera. En 2006, Svalbard sufrió una ola de calor que no tiene precedentes, con el mes de enero más cálido jamás registrado y un abril más de 12°C más cálido que la media a largo plazo. En los meses de abril y mayo de 2006 tuvo lugar un extraordinario episodio de contaminación atmosférica sobre Svalbard, registrándose unos niveles históricos de alta contaminación en la estación de montaña Zeppelin de Ny Ålesund, en la costa occidental del Archipiélago (latitud de 78°N) (Stohl y otros, 2007). La concentración horaria de ozono alcanzó las 83 ppb, cuando la anterior concentración máxima registrada en el período 1989-2006 era de 61 ppb.

La densidad numérica de aerosoles mostró un aumento de las partículas en modo de acumulación y una ausencia absoluta de partículas de Aitken, mientras que, en circunstancias normales, la distribución de la densidad numérica de aerosoles contendría la formación de nuevas partículas en el modo de Aitken. La masa de la materia particu-

lada alcanzó los 29  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en 24 h, más de un orden de magnitud por encima que justo antes y después de que se produjese el episodio y con una proporción dominante de materia orgánica (un 60% de la masa comparado con un 4-9% en las semanas anteriores), lo que ponía de relieve la contribución dominante del humo procedente de quemas agrícolas en el este de Europa al episodio de contaminación.

Otros dos puntos de inflexión están estrechamente vinculados al Ártico: la posible pérdida de la capa de hielo en Groenlandia y su cambio asociado en el nivel del mar, y los cambios en la circulación termohalina, que podrían estar relacionados en parte con los cambios en el agua dulce del Ártico. Estos dos puntos críticos tendrían efectos globales, entre los que se incluyen las realimentaciones de los procesos químicos de la atmósfera ártica.

Los incendios forestales más frecuentes de las altas latitudes que se dan en la región boscosa boreal, con grandes existencias de carbono, pueden afectar a la composición y el clima de la atmósfera polar a largo plazo. La frecuencia e intensidad de los incendios son enormemente sensibles al cambio y la variabilidad del clima y a las prácticas en el uso de la tierra. A lo largo del siglo pasado, las tendencias que han experimentado las superficies quemadas han estado muy condicionadas por las prácticas en el uso de la tierra, a través de la implantación de políticas de eliminación de incendios en las regiones templadas de las latitudes medias y de la utilización cada vez mayor del fuego para limpiar el bosque en las regiones tropicales (para obtener referencias, véase el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, 2007, página 527, Denman y otros, 2007). El Cuarto Informe de Evaluación también analiza la evidencia de que el cambio climático ha contribuido a que aumente la frecuencia de los incendios forestales en Canadá. La disminución de la frecuencia de los incendios en regiones como los Estados Unidos y Europa hace de estas zonas el sumidero de carbono terrestre, mientras que el aumento en la frecuencia de los incendios forestales en regiones como la Amazonia, el sureste asiático y Canadá ha contribuido a que estas zonas sean la fuente de carbono. En las latitudes altas, parece que

ha aumentado el papel que juegan los incendios forestales a lo largo de las últimas décadas: los trastornos ocasionados por los incendios forestales en los bosques boreales fueron más altos en la década de 1980 que en ninguna otra anterior de la que se tenga registro. En el futuro, puede aumentar la fuente de dióxido de carbono debido a los incendios forestales (Cuarto Informe de Evaluación del IPCC, 2007, capítulo 7). La quema de biomasa en las latitudes altas tiene una especial importancia para la atmósfera polar, en la medida que el humo posee un alto contenido de carbono negro. Una fina capa de aerosoles oscuros que absorben la luz es capaz de calentar el sistema Tierra-atmósfera, sobre todo por encima de superficies que cuentan con un albedo solar alto, como son el hielo y la nieve. En invierno, las capas de calima son importantes para el balance radiativo, debido a su control directo e indirecto de la parte infrarroja del espectro. La deposición del carbono negro en las superficies de hielo y nieve tiene el mismo efecto. Por tanto, las emisiones provenientes de los incendios forestales no solo cambian la composición de la atmósfera polar en cada episodio, sino que también pueden provocar cambios más duraderos en el balance radiativo y en la estratificación de la atmósfera polar inferior, así como afectar al albedo de la superficie. Además de estos "puntos de inflexión" fundamentales existen, asimismo, cambios crónicos en el medio ambiente que pueden originar realimentaciones en la atmósfera. El incremento de dióxido de carbono, con el aumento asociado de bicarbonato oceánico y el bajo pH, conlleva importantes consecuencias en la biota marina. A modo de ejemplo, se ha demostrado que los cambios en el dióxido de carbono impactan, en gran medida, en el desarrollo de los cocolitofóridos (Riebesell y otros, 2000). Aún no se conoce demasiado bien en qué medida estos impactos influyen, a su vez, en las emisiones biogénicas, como por ejemplo, el dimetil sulfuro. Pero, puesto que la extensión del hielo marino sigue descendiendo, es probable que las emisiones biogénicas en el Ártico cada vez tengan una mayor importancia para la composición y la química de la atmósfera.

En resumen, la química de la atmósfera polar responde, en gran medida, a los

procesos más importantes que controlan el cambio climático: la extensión del hielo marino en el Ártico; la estabilidad de la capa de hielo en Groenlandia; la escorrentía de agua dulce hacia el Océano Ártico y otros cambios en las propiedades oceánicas; y la frecuencia de la quema de biomasa, sobre todo en las latitudes altas.

## Estudios de la química de la atmósfera polar llevados a cabo durante el API

El API ofrece la oportunidad de organizar un estudio internacional de la composición química de la atmósfera polar en los dos hemisferios, bajo la perspectiva del sistema terrestre. El proyecto POLARCAT (Estudio polar del clima, la química, los aerosoles y el transporte utilizando aviones, teledetección, medidas de superficie y modelos), llevará a cabo varios experimentos con aviones en diferentes momentos del año para realizar un seguimiento de penachos de contaminación de diferentes orígenes cuando son transportados al Ártico y para observar la química, los procesos de los aerosoles y los efectos radiativos de estos penachos. También se observará la composición química en las regiones relativamente más limpias que se encuentran más allá de los grandes penachos. Los experimentos aprovecharán los grandes períodos de permanencia de los agentes contaminantes en la atmósfera ártica con estratificación estable para estudiar los procesos de envejecimiento de las masas de aire más interesantes que han pasado un tiempo considerable en el Ártico. Así pues, el Ártico servirá de laboratorio natural para investigar procesos que no pueden estudiarse en ningún otro lugar de forma aislada. Pueden encontrarse más detalles en <http://www.polarcat.no/polarcat>.

La misión OASIS (conjunto Océano-atmósfera-hielo marino-nieve; véase <http://www.oasishome.net/Docs/Science%20Plan%20version%202.2.pdf>) intenta determinar la importancia de los procesos de intercambio químicos, físicos y biológicos en el sistema formado por el océano, la atmósfera, el hielo marino y las acu-

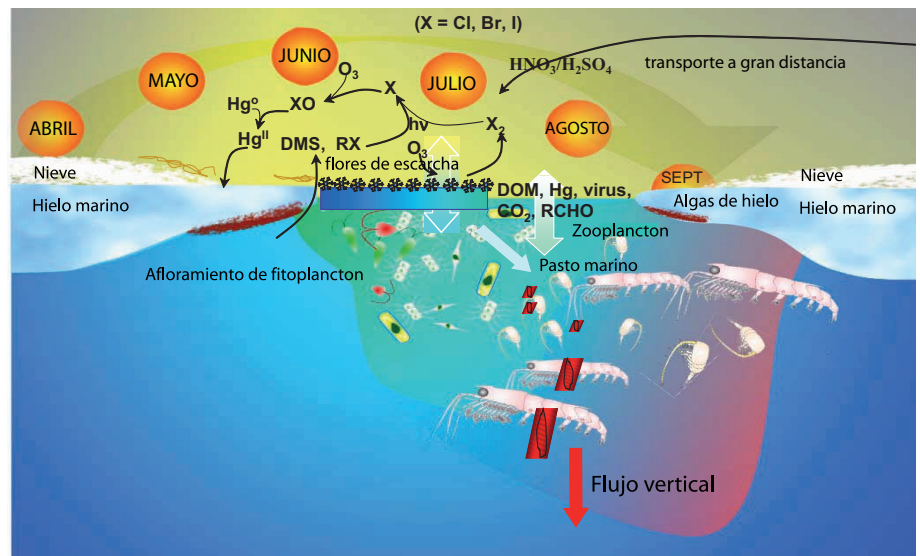


Figura 4 – Ilustración de la forma en que OASIS se dirige a estudiar los procesos que modifican los flujos biogeoquímicos entre las superficies de la atmósfera, el hielo y el océano. (<http://www.oasishome.net/Docs/Science%20Plan%20version%202.2.pdf>).

mulaciones de nieve, con respecto a la química troposférica, la criosfera, y el medio marino y sus mecanismos de realimentación en el contexto de un clima en cambio. Las cuestiones más generales a tratar son las siguientes:

- ¿Cuál es la naturaleza de los bucles de realimentación entre los procesos de intercambio en el sistema atmósfera-hielo marino-nieve y el cambio climático global?
- ¿Cuáles son los mecanismos fundamentales inducidos física, química y biológicamente de los procesos de intercambio en el sistema atmósfera-hielo marino-nieve en los que se ven involucrados halógenos, dimetil sulfuro, óxidos de nitrógeno, ozono, compuestos orgánicos volátiles, contaminantes orgánicos persistentes, mercurio, componentes de azufre, materia particulada y dióxido de carbono en las regiones polares?
- ¿Cuáles son los impactos del sistema atmósfera-hielo marino-nieve sobre los procesos de intercambio en la criosfera marina (hielo/nieve) y en el océano polar contiguo?
- ¿Qué relación existe entre los procesos de intercambio en el

sistema atmósfera-hielo marino-nieve y la química, física y biología de los gases transportados por el aire, las partículas que se hallan en el aire y la formación de hielo y nieve?

- Con respecto a la contaminación medioambiental, ¿cuál es el impacto sobre el sistema atmósfera-hielo marino-nieve y cuál es el efecto causado por este sistema? y, ¿qué papel desempeñan los cambios a largo plazo?

La Figura 4 ilustra la forma en que OASIS se dirige a estudiar los procesos que modifican los flujos biogeoquímicos entre las superficies de la atmósfera, el hielo y el océano.

El proyecto AICI (Interacciones químicas aire-hielo; <http://classic.ipy.org/development/eoi/proposal-details.php?id=20>) se ha creado para determinar en qué medida la acumulación de nieve de las regiones polares controla los procesos químicos que tienen lugar en la parte inferior de la atmósfera: los procesos químicos de los halógenos sobre la zona de hielo marino merma el ozono de la capa límite y origina la deposición del mercurio. La producción fotoquímica de la nieve altera los procesos químicos de los óxidos de nitrógeno y, en algunos casos, el estado de oxidación de

grandes partes de la capa límite polar. Los compuestos orgánicos persistentes sufren una destilación que ocasiona su deposición en las regiones polares. Los procesos bioquímicos en espacios abiertos juegan un papel fundamental en la formación de condensación nubosa y en los núcleos de formación de cristales de hielo. Por medio de la formación de nubes, este proceso puede desempeñar un papel esencial en las realimentaciones climáticas del albedo del hielo. El AICI contribuirá a evaluar el modo en que estos procesos pueden cambiar con un calentamiento del clima y una disminución de la criosfera. A este respecto, el API ofrece la posibilidad de definir la configuración espacio-temporal de la química y los procesos que tienen lugar en la superficie del hielo a través de la capa límite, incluida la formación de nubes, al interrelacionar las diferentes actividades de campo de las dos regiones polares llevadas a cabo en el mismo año. AICI-API proporcionará un margo general, ofrecerá apoyo para los estudios de laboratorio y de simulación y para la integración de los datos de teledetección, y organizará reuniones de síntesis. Asimismo, AICI-API coordinará la publicación de los análisis más importantes sobre el intercambio y los procesos químicos que afectan a la superficie y la atmósfera polar, y pondrá de relieve cómo el API ha mejorado nuestro conocimiento acerca de las relaciones entre un clima en cambio, una superficie en cambio y la atmósfera.

## Referencias

- AAS, W., S. SOLBERG, T. BERG, S. MANØ y K. E. YTTRI, 2006: Overvåking av langtransportert forurenset luft og nedbør. *Atmosfærisk tilførsel* 2005. NILU OR 36/2006, ISBN 82-425-1759-2.
- DENMAN, K. L., G. BRASSEUR, A. CHIDTHAISONG, P. CIAIS, P. M. COX, R. E. DICKINSON, D. HAUGLUSTAINE, C. HEINZE, E. HOLLAND, D. JACOB, U. LOHMANN, S. RAMACHANDRAN, P. L. DA SILVA DIAS, S. C. WOFSY y X. ZHANG, 2007: Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry. En: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge (Reino Unido) y Nueva York (EEUU).
- GRANNAS, A. M., A. E. JONES, J. DIBB, M. AMMANN, C. ANASTASIO, H. J. BEINE, M. BERGIN, J. BOTTENHEIM, C. S. BOXE, G. CARVER, G. CHEN, J. H. CRAWFORD, F. DOMINÉ, M. M. FREY, M. I. GUZMÁN, D. E. HEARD, D. HELMIG, M. R. HOFFMANN, R. E. HONRATH, L. G. HUEY, M. HUTTERLI, H. W. JACOBI, P. KLÁN, B. LEFER, J. MCCONNELL, J. PLANE, R. SANDER, J. SAVARINO, P. B. SHEPSON, W. R. SIMPSON, J. R. SODEAU, R. VON GLASOW, R. WELLER, E. W. WOLFF y T. ZHU, 2007: *An overview of snow photochemistry: evidence, mechanisms and impacts*. *ACPD* 7, 4329-4373.
- IVERSEN, T., 1984: On the atmospheric transport of pollution to the Arctic, *Geophys. Res. Lett.*, 11., 457-460.
- MACFARLING MEURE, C., D. ETHERIDGE, C. TRUDINGER, P. STEELE, R. LANGENFELDS, T. VAN OMMEN, A. SMITH y J. ELKINS, 2006: Law Dome CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O ice core records extended to 2000 years *BP*, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L14810, doi:10.1029/12006GL026152.
- ORGANIZATION FOR ECONOMIC COOPERATION AND DEVELOPMENT [ORGANIZACIÓN DE COOPERACIÓN Y DESARROLLO ECONÓMICOS], 1977: The OECD Programme on Long Range Transport of Air Pollutants. Measurements and Findings. OECD Report, París, 1-318.
- OTTAR, B., Y. GOTAAS, Ø. HOV, T. IVERSEN, E. JORANGER, M. OEHME, J. PACYNA, A. SEMB, W. THOMAS y V. VITOLS, 1986: *Air pollutants in the Arctic*. Final report of a research programme conducted on behalf of British Petroleum Ltd. NILU OR 30/86.
- RIEBESSELL, U., I. ZONDERVAN, B. ROST, P. D. TORTELL, R. E. ZEEBE, F. M. M. MOREL, 2000: Reduced calcification of marine plankton in response to increased atmospheric CO<sub>2</sub>, *Nature*, 407, 364-367.
- SCHROEDER, W. H., K. G. ANLAUF, L. A. BARRIE, J. Y. LU, A. STEFFEN, D. R. SCHNEEBERGER y T. BERG: Arctic spring-time depletion of mercury, *Nature*, 394, 331-332, 1998.
- SIMPSON, W. R., R. VON GLASOW, K. RIEDEL, P. ANDERSON, P. ARIYA, J. BOTTENHEIM, J. BURROWS, L. CARPENTER, U. FRIESS, M. E. GOODSITE, D. HEARD, M. HUTTERLI, H.-W. JACOBI, L. KALESCHKE, B. NEFF, J. PLANE, U. PLATT, A. RICHTER, H. ROSCOE, R. SANDER, P. SHEPSON, J. SODEAU, A. STEFFEN, T. WAGNER y E. WOLFF, 2007: *Halogens and their role in polar boundary-layer ozone depletion*. *ACPD* 7, 4375-4418.
- STOHL, S., 2006: Characteristics of atmospheric transport into the Arctic troposphere, *J. Geophys. Res.* 111, D11306, doi: 10.1029/2005JD006888.
- STOHL, S., T. BERG, J. F. BURKHART, A. M. FJÆRAA, C. FORSTER, A. HERBER, Ø. HOV, C. LUNDER, W. W. McMILLAN, S. OLTMANS, M. SHIOBARA, D. SIMPSON, S. SOLBERG, K. STEBEL, J. STRØM, K. TØRSETH, R. TREFFEISEN, K. VIRKKUNEN y K. E. YTTRI, 2007: *Arctic smoke – record high air pollution levels in the European Arctic due to agricultural fires in Eastern Europe*. *ACP* 7, 511-534.
- STROEVE, J., M. M. HOLLAND, W. MEIER, T. SCAMBOS y M. SERREZE, 2007: Arctic sea ice decline: faster than forecast, *Geophys. Res. Lett.*, 34, Art. No. L09501 MAY 1 2007.