

Campañas Match para medir la pérdida de ozono estratosférico: una contribución fundamental para el Año Polar Internacional 2007-2008

por Markus Rex* y Peter von der Gathen*

Año Polar Internacional 2007-2008

El año 2007 supone un importante hito en la historia de la geociencia: el 125.º aniversario del primer Año Polar Internacional (API) 1882-1883.

Las actividades iniciadas durante el primer API y sus continuaciones en 1932-1933 y, particularmente, en el Año Geofísico Internacional 1957-1958, sentaron las bases de muchos elementos importantes con los que contamos actualmente para comprender el sistema de la Tierra. Para sumarse a este gran éxito y fortalecer la inercia adquirida de cara a otra actividad de investigación completamente innovadora, la comunidad internacional de geocientíficos estableció el API 2007-2008.

El enfoque hacia las regiones polares pone de manifiesto la idea generalizada de que hemos logrado un progreso importante en la observación y comprensión del sistema de la Tierra, aunque nuestro conocimiento en lo que respecta a muchos procesos de las regiones polares sigue siendo limitado como consecuencia de la escasa cantidad de datos disponibles. Un impresionante abanico de actividades durante el API se encargará de abordar todos los aspectos relativos a la investigación polar en los campos que van desde la oceanografía,

pasando por la física de la tierra sólida y la criosfera, y llegando hasta la atmósfera (<http://www.ipy.org>).

Las piedras angulares de la investigación atmosférica durante el API son los estudios que se encargan de afrontar la disminución de la concentración de ozono polar estratosférico, una de las señales antropogénicas más importantes del sistema climático mundial. La actividad de la campaña Match constituye una de las actividades de investigación de mayor calibre en la estratosfera polar durante el API.

Destrucción de la capa de ozono en el entorno polar

La capa de ozono es un componente importante del sistema medioambiental mundial. La absorción de la dañina radiación ultravioleta (UV) procedente del Sol que se lleva a cabo en la capa de ozono protege la biosfera y calienta la estratosfera. De esta manera, los cambios en la circulación atmosférica y en la emisión de sustancias antropogénicas que afectan a la abundancia de ozono en la atmósfera tienen un efecto directo sobre el sistema climático mundial. Conocer con detalle los procesos que regulan la distribución de ozono en la atmósfera se antoja fundamental para efectuar predicciones climáticas fiables y de cara a evaluar los niveles de UV futuros en la superficie, un parámetro importante para la biosfera.

Desde las décadas de 1960 y 1970, la especie humana ha vertido a la atmósfera grandes cantidades de clorofluorocarbonos (CFC) y de compuestos con cierto índice de contenido de bromo (halones). En la troposfera, estas sustancias son extremadamente estables y muy poco reactivas, por lo que pueden alcanzar una vida atmosférica a nivel local de varios siglos. Sin embargo, desde la troposfera ascienden lentamente hasta la estratosfera, donde se disocian debido a la presencia de radiaciones UV de onda corta extremadamente energéticas por encima de la capa de ozono.

La disociación de los CFC y halones provoca la liberación de radicales de cloro y de bromo, que son tremendamente eficaces en lo que respecta a la destrucción del ozono. Estos ciclos de destrucción del ozono implican una serie de compuestos conocidos como componentes activos del cloro "ClO_x" (cloro (Cl), monóxido de cloro (ClO) y peróxido de cloro (Cl₂O₂)). Afortunadamente, a través de rápidas reacciones de estas especies con otros oligoelementos que se hallan en la estratosfera, las especies derivadas del ClO_x se agrupan en elementos reservorios inactivos, como son el nitrato de cloro (ClONO₂) y el cloruro de hidrógeno (HCl), que no dañan apenas la capa de ozono. En consecuencia, la abundancia estratosférica de ClO_x suele ser muy pequeña.

Con las concentraciones estratosféricas actuales de bromo total en la estratosfera, los radicales de bromo únicamente son eficaces a la hora de destruir el ozono si se da la presencia

* Instituto Alfred Wegener de investigación polar y marina, Departamento de investigación, Potsdam (Alemania)

de elementos ClO_x en concentraciones importantes. De esta manera, el efecto de las emisiones de CFC y halones sobre el ozono estratosférico es muy limitado en latitudes medias y tropicales. En este caso, la pérdida significativa de ozono está limitada a las partes más altas de la capa de ozono, donde la radiación UV es lo suficientemente intensa como para desencadenar reacciones que liberan importantes cantidades de radicales de cloro de las longevas especies reservorios.

La situación es diferente en la región polar. Dentro del vórtice polar (un sistema aislado de baja presión que se forma cada invierno en la estratosfera polar), las temperaturas caen de manera significativa. A temperaturas por debajo de unos -78°C pueden formarse nubes estratosféricas polares (NEP) (Figura 1). En la superficie de las partículas de las NEP tienen lugar reacciones químicas heterogéneas que, en el transcurso de unas pocas horas, pueden convertir todos los compuestos reservorios de cloro inofensivos de nuevo en ClO_x . Durante la siguiente primavera polar, los radicales ClO_x destruirán el ozono en un ciclo catalítico que requiere la presencia de la luz solar. La existencia de radicales de bromo permite que pueda tener lugar un segundo ciclo catalítico que, en términos generales, hace que el proceso de disminución de ozono sea aún más eficaz. Durante más de dos décadas, estos procesos han desembocado en la aparición estacional

del agujero de ozono sobre la Antártida casi todas las primaveras (por ejemplo, OMM, 2007).

En comparación con la región antártica, las condiciones meteorológicas que se dan en la estratosfera ártica durante el invierno son bastante más variables y las temperaturas suelen ser considerablemente más elevadas, desembocando en una formación menos frecuente y menos extensa de nubes estratosféricas polares. A principios de la década de 1990, no estaba claro si los procesos químicos comparables que se conocían en la región antártica provocarían la destrucción de ozono en la estratosfera ártica. Por motivos dinámicos, el campo de ozono de la zona ártica es muy distinto del existente en la región antártica, y los atisbos de reducción química del ozono son difíciles de detectar.

Se han desarrollado diversos métodos encaminados a identificar y cuantificar las pérdidas de ozono en el variable entorno ártico. Estos métodos incluyen, entre otros, el de Match, que fue desarrollado para medir de manera precisa el índice de pérdida química de ozono en la estratosfera polar. Desde principios de los años 90, se detectó claramente la pérdida química antropogénica de ozono en una serie de inviernos árticos fríos. Las comparaciones detalladas de los índices medidos de pérdida de ozono y los resultados del modelo muestran la gran incertidumbre que subyace en nuestro conocimiento cuantitativo del

proceso de pérdida de ozono y el papel fundamental de estas grandes incertidumbres en los parámetros cinéticos fundamentales que son necesarios para calcular los índices de reducción química del ozono mediante un modelo químico. Con objeto de profundizar en nuestro conocimiento cuantitativo del proceso de pérdida de ozono y a fin de proporcionar una base más sólida para predecir, con la ayuda de los modelos, el futuro de la capa de ozono, está teniendo lugar una campaña Match adicional en la región antártica dentro del marco establecido por el API.

Cuantificación de la pérdida antropogénica de ozono: el método de Match

La abundancia de ozono sobre una estación polar individual cambia constantemente, como consecuencia de los procesos variables de transporte. Estas fluctuaciones causadas por motivos dinámicos ocultan la pérdida química antropogénica, y deben ser separadas de cualquier señal química relativa a la pérdida de ozono. En vez de observar series temporales de ozono en localizaciones fijas (es decir, en un sentido euleriano), el método de Match se basa en medidas lagrangianas. La idea básica es la de llevar a cabo mediciones repetidas en masas de aire individuales cuando estas discurren a través de los casquetes polares y, en ocasiones, se acercan a alguna de las muchas estaciones de ozonosondeo situadas en las regiones polares.

La principal ventaja de este procedimiento es que los términos de advección que dominan los cambios de ozono en el marco euleriano desaparecen en la formulación lagrangiana de la ecuación de continuidad. El impacto de los términos de difusión en la ecuación de continuidad también puede limitarse mediante una selección cuidadosa de las masas de aire observadas basándose en propiedades del flujo. De esta manera, los cambios en la concentración de ozono durante el intervalo entre dos mediciones pueden atribuirse a una

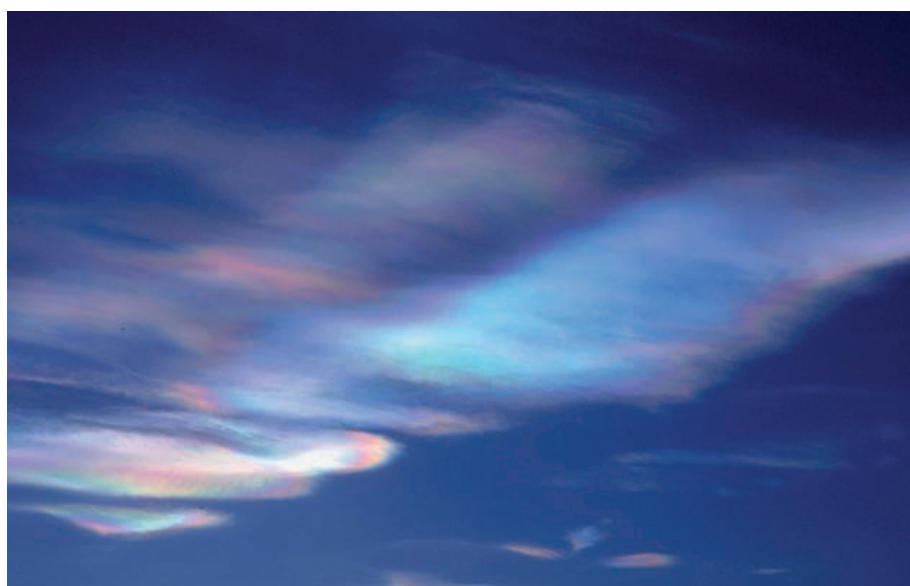


Figura 1 – Nubes estratosféricas polares

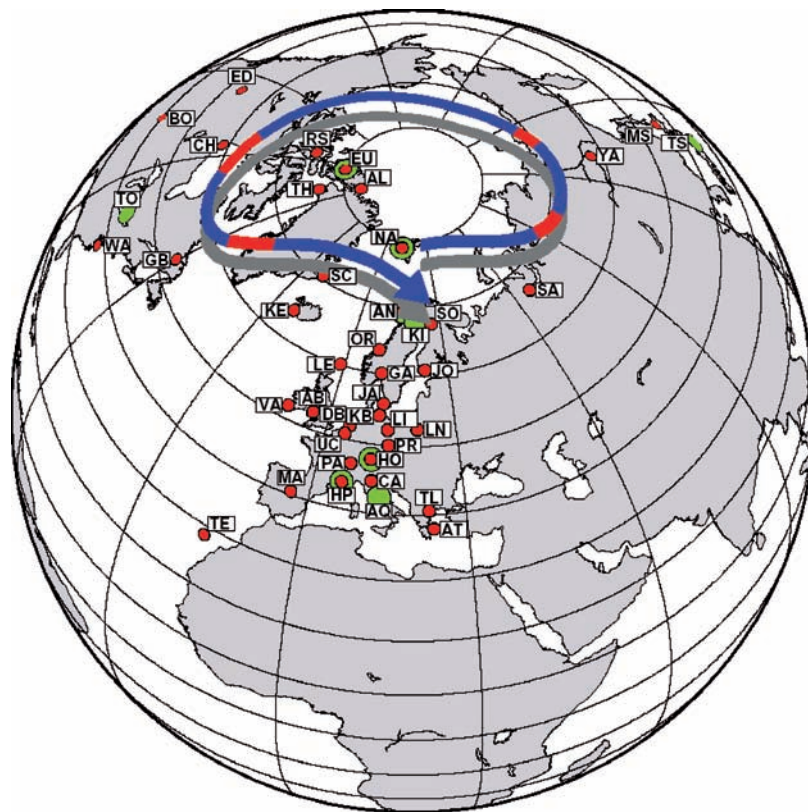


Figura 2 – Ilustración del método de Match: los puntos rojos señalan las estaciones de ozonosondeo, mientras que la línea azul muestra un ejemplo de trayectoria, con las partes iluminadas por el Sol en color rojo.

reducción química. A través de un análisis estadístico de un gran número de estos pares de mediciones, es posible observar una disminución química antropogénica del ozono de forma directa, así como medir in situ los índices de pérdida química de ozono.

En el método de Match, las mediciones se llevan a cabo mediante ozonosondas operativas en multitud de estaciones polares y subpolares. De cara a identificar “episodios de Match” (o sea, situaciones en las que masas de aire individuales suelen ser registradas por partida doble en diferentes estaciones) se calculan las trayectorias, utilizando datos del Centro europeo de predicción meteorológica a medio plazo (Figura 2). En el invierno ártico de 1991/1992, se identificaron los episodios de Match tras el lanzamiento de cerca de 1 200 ozonosondas durante el invierno sin coordinación en tiempo real (Rex, 1993; von der Gathen y otros, 1995). Desde el invierno de 1994/1995, los episodios de Match han sido registrados gracias a la realización de varios centenares de sondeos de ozono en cada invierno, con coordinación en tiempo real.

Durante los experimentos de la campaña Match, normalmente suelen lanzarse entre 300 y 600 ozonosondas en alrededor de 30 estaciones del hemisferio norte, o bien en nueve estaciones de la región antártica. También se utilizan datos provenientes de satélites. Sin embargo, debido a la gran cizalladura vertical en el flujo, hay que ajustarse a la limitación de los sensores satelitales que pueden proporcionar datos de resolución vertical elevada (1-1,5 km ó mejor). Se han empleado con éxito datos procedentes de las misiones de Medida del ozono y los aerosoles en las regiones polares, así como los provenientes de los satélites ILAS (Espectrómetro atmosférico mejorado en los limbos) y del SAGE (Experimento sobre gases y aerosoles estratosféricos). Las campañas Match han tenido lugar a lo largo de 10 inviernos árticos y un invierno antártico (2003), sin contar la segunda campaña Match antártica en el hemisferio sur que se está llevando a cabo en la actualidad.

Varios pasos importantes de la investigación sobre el ozono dependen del método de Match, que encontró, por

primera vez, pruebas sin ambigüedad de la pérdida química antropogénica de ozono en la estratosfera ártica. Además, basándose en los datos in situ de Match, se demostró que, efectivamente, la luz solar es necesaria para el proceso de pérdida de ozono, lo que confirma un importante elemento de nuestro conocimiento teórico del proceso. También se demostró que la desnitrificación tiene el potencial de dificultar el proceso de pérdida de ozono en la región ártica si el invierno es especialmente frío (Rex y otros, 1997). Anteriormente, este efecto solamente se conocía en la estratosfera antártica. Los datos plurianuales provenientes de las campañas Match permitieron establecer la sensibilidad de la pérdida de ozono en la región ártica con respecto a los cambios en el clima, un parámetro fundamental de cara a las futuras proyecciones de pérdida de ozono polar en la atmósfera cambiante.

Se decidió continuar con la actividad de las campañas Match, teniendo en cuenta dos resultados de investigación obtenidos durante la pasada década. En primer lugar, las condiciones relativas a las masas de aire registradas por la campaña Match están bien representadas, por lo que los productos resultan especialmente apropiados para efectuar comparaciones detalladas con cálculos de modelos altamente restringidos. Esto permite inspeccionar muy de cerca el nivel de nuestro conocimiento teórico acerca del proceso de pérdida de ozono. Recientemente se pusieron en evidencia las grandes incertidumbres que encierra nuestra comprensión teórica de la cinética de los procesos químicos más importantes. Las mediciones continuas de las campañas Match pueden ayudar a ofrecer una base de observación más sólida para reducir estas incertidumbres.

En segundo lugar, aunque los inviernos estratosféricos árticos, tanto cálidos como fríos, están gobernados por la variabilidad interna del sistema climático, se ha observado una tendencia que apunta a que los fríos inviernos árticos se han vuelto mucho más fríos durante los últimos 40 años. Este cambio en las condiciones climáticas de la estratosfera ártica ha contribuido a grandes pérdidas de ozono ártico

desde mediados de la década de 1990. No está claro si la tendencia continuará en el futuro y cuál podría ser el efecto sobre el ozono de la región ártica. A continuación abordaremos estas dos cuestiones con un mayor detalle.

Comprensión cuantitativa del proceso químico de pérdida de ozono

Tener un conocimiento teórico cuantitativamente correcto de los índices observados de pérdida de ozono se antoja fundamental para efectuar una predicción fiable de la distribución estratosférica del ozono en un mundo que experimenta un creciente nivel de concentraciones de gases de efecto invernadero y una carga de halógenos en descenso. Se han desarrollado modelos con distintos grados de complejidad para calcular las tasas de pérdida de ozono de las masas de aire sondeadas durante las campañas Match. Las conclusiones más sólidas sobre el estado de nuestro conocimiento actual provienen de los productos de salida de modelos en los que el nivel de activación del cloro se especifica de manera externa. Esta configuración del modelo permite calcular con solidez los límites superiores de las posibles tasas de pérdida de ozono, considerando nuestro conocimiento teórico actual en el ámbito de la química. El resultado es que, basándonos en supuestos normalizados, los límites superiores calculados son, sistemáticamente, alrededor de un 20 por ciento menores que las tasas de pérdida de ozono observadas en los fríos meses de enero de la región ártica (Rex y otros, 2004).

Un supuesto fundamental común a todos los modelos afecta a la cantidad total de especies de bromo presentes en la estratosfera. Durante mucho tiempo se pensó que únicamente las especies de bromo con una supervivencia larga, como el bromuro de metilo y los halones, eran capaces de alcanzar la estratosfera. Sin embargo, las observaciones recientes relativas al bromo apuntan a que en la estratosfera existe una concentración de bromo mayor de la que cabría esperar si se tuvieran en cuenta solamente

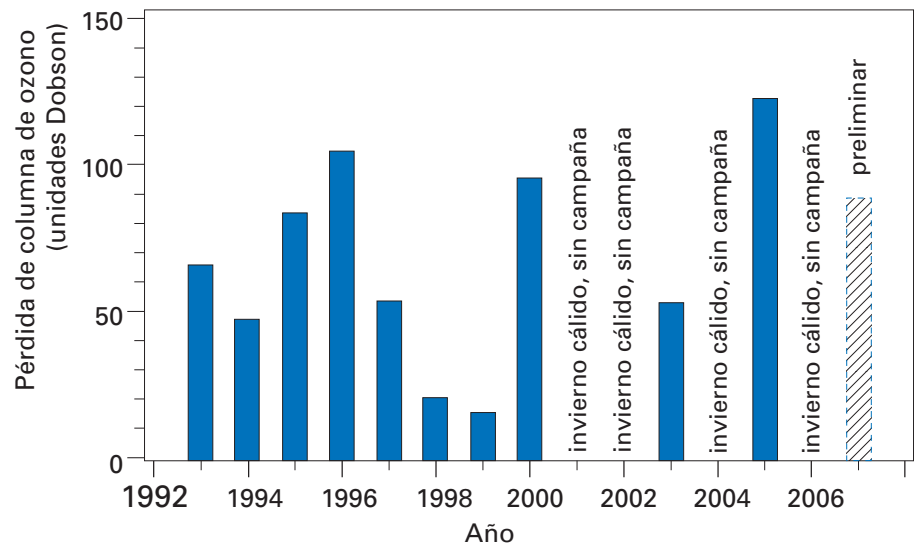


Figura 3 – Variación de las pérdidas totales de ozono desde principios de la década de 1990

las especies de bromo con larga vida. Esto pone de manifiesto que una parte de las especies de bromo con vida muy corta es capaz también de alcanzar la estratosfera. El incremento del nivel de bromo estratosférico explica en parte las discrepancias existentes entre los límites superiores calculados y observados de las tasas de pérdida de ozono.

Los cálculos del modelo están basados en parámetros cinéticos recomendados por un grupo especial de químicos de laboratorio, aproximadamente cada cuatro años. Sin embargo, a partir de las observaciones relativas al equilibrio entre el ClO y el peróxido de cloro (ClOOCl) en la estratosfera, se dedujo que el índice de fotólisis del ClOOCl es mayor (alrededor del 150% más) que el valor recomendado actualmente (Stimpfle y otros, 2004). Este valor, deducido a partir de observaciones in situ, sigue encontrándose dentro de las estimaciones de incertidumbre del valor recomendado. Si se utiliza el valor mayor, la tasa calculada de pérdida de ozono según el modelo se incrementa aún más, eliminando casi todas las discrepancias restantes (Frieler y otros, 2006; OMM, 2007). Estos resultados provocaron la realización de nuevas medidas relativas a las secciones transversales de la fotólisis en el caso del ClOOCl (Pope y otros, 2007). Como dato interesante, las nuevas mediciones, muy mejoradas, arrojan valores de casi un orden de magnitud más pequeño que las secciones transversales que se obtienen

por las mediciones in situ, y dan como resultado una buena reproducción de las tasas observadas de pérdida de ozono. Considerando las secciones transversales de Pope y otros (2007), nuestro conocimiento del proceso de pérdida de ozono polar fracasaría por completo, un hecho que pone de manifiesto las grandes incertidumbres que siguen estando presentes en nuestro conocimiento teórico de uno de los procesos antropogénicos más importantes que ocurren en la atmósfera de todo el mundo.

Pérdida de ozono y cambio climático

La Figura 3 muestra la variación interanual de las pérdidas químicas de ozono en la región ártica desde el comienzo de la década de 1990. La fuerte variabilidad de año a año es mucho mayor que el impacto del cambio gradual de la concentración de cloro y halógenos durante este período de tiempo. Mejor dicho: debido al importante papel desempeñado por las reacciones heterogéneas en las nubes estratosféricas polares, la variabilidad de la pérdida de ozono se ve gobernada sobre todo por la pronunciada variabilidad de las condiciones meteorológicas. Esta circunstancia se refleja en la Figura 4, donde se muestran las pérdidas de ozono frente a V_{NEP} (V_{NEP} es un parámetro basado exclusivamente en la temperatura y que, básicamente, proporciona el volumen

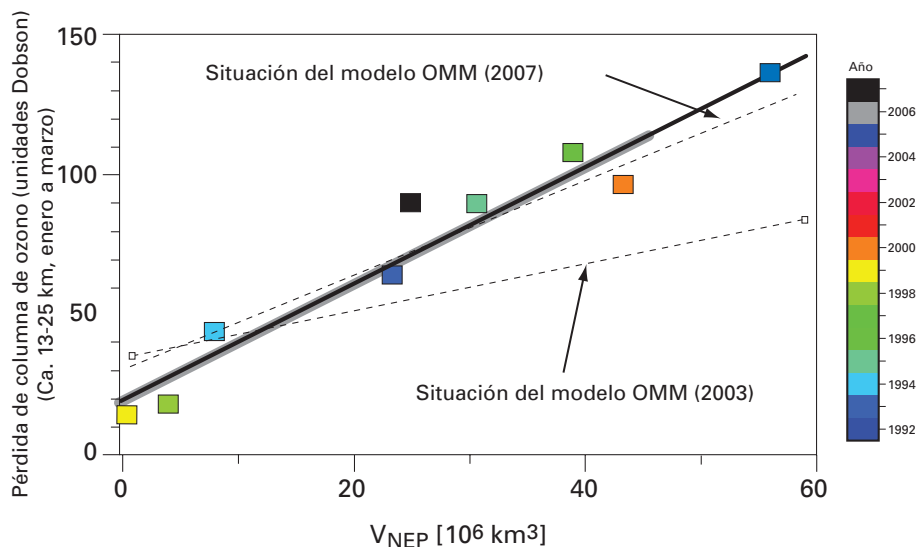


Figura 4 – Relación entre la pérdida total de ozono y V_{NEP} (parámetro basado en la temperatura, que facilita el volumen medio invernal, en el que las temperaturas se encontraban por debajo del umbral de formación de nubes estratosféricas polares (NEP)). El valor para el año 2007 (símbolo negro) se basa en datos preliminares.

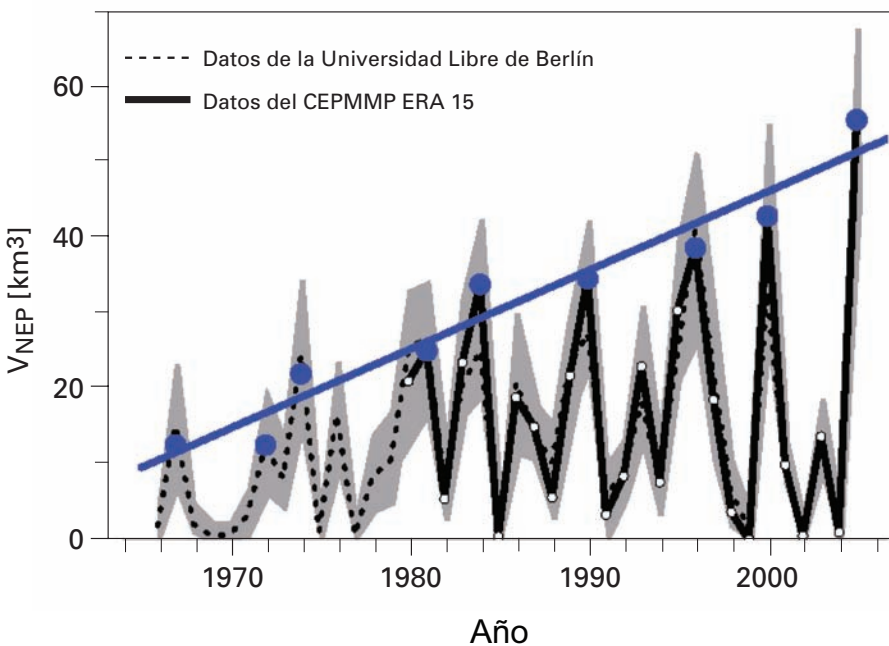


Figura 5 – Evolución a largo plazo del parámetro V_{NEP} durante las últimas cuatro décadas

medio invernal en el que las temperaturas se encontraban por debajo del umbral de formación de nubes estratosféricas polares).

Desde la perspectiva de la compacta relación empírica entre la pérdida de ozono y el parámetro V_{NEP} que se muestra en la Figura 4 puede obtenerse la sensibilidad de la pérdida de ozono ártico con respecto al posible cambio climático en la estratosfera ártica. Para la actual concentración de halógenos, se puede deducir que pueden esperarse del orden de 15

unidades Dobson de pérdida adicional de ozono por cada grado Kelvin que baje la temperatura en la estratosfera ártica. La Figura 4 también ofrece una comparación de los datos observacionales con un modelo basado en supuestos normalizados extraídos de la Evaluación de ozono de la OMM de 2002. Este modelo subestimaba la sensibilidad climática de la pérdida de ozono ártico en un factor de alrededor de tres. Las mejoras del modelo descritas anteriormente originan un importante avance de la capacidad del modelo para reproducir la sensi-

bilidad climática observada y, de esta manera, perfecciona su capacidad de predicción.

La Figura 5 muestra el desarrollo del parámetro V_{NEP} durante las últimas cuatro décadas (Rex y otros, 2006; OMM, 2007). Los inviernos cálidos que definen la capa envolvente inferior de la variabilidad tan solo muestran pequeños cambios. Sin embargo, el riesgo de que se produzcan grandes pérdidas de ozono en la región ártica o incluso la formación de un agujero de ozono en esta zona son aspectos que dependen del futuro desarrollo de las condiciones correspondientes a los inviernos fríos (la capa envolvente superior de la variabilidad). Los inviernos fríos muestran una importante tendencia a haberse vuelto aún más fríos durante las últimas cuatro décadas. La probabilidad de que esta tendencia tenga lugar de forma casual en una serie temporal aleatoria es inferior a 10^{-6} (Rex y otros, 2006). Existen dos posibles explicaciones: en primer lugar, la tendencia ha sido forzada desde el exterior, por ejemplo, por el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera; o, en segundo lugar, se debe a la variabilidad interna a largo plazo del sistema climático a una escala de tiempo decenal. De hecho, los crecientes niveles de gases de efecto invernadero tienden a enfriar la estratosfera, pero el enfriamiento observado durante los inviernos fríos es mucho más intenso del que podría entenderse de modo simple, y requeriría la existencia de un mecanismo de realimentación dinámica. Es necesario investigar los posibles mecanismos de realimentación y el papel de la variabilidad interna a escala decenal de la estratosfera ártica, para lo que se requieren estudios globales con modelos en 3D. Resulta fundamental conocer mejor los motivos desencadenantes de la tendencia observada en el pasado antes de poder evaluar la probabilidad de su posible continuidad en el futuro.

Las grandes pérdidas de ozono de algunos de los últimos inviernos árticos fueron resultado de los cambios a largo plazo experimentados en la distribución del parámetro V_{NEP} y, por ende, consecuencia del cambio a

largo plazo en las condiciones climáticas de la estratosfera ártica invernal. Estas grandes pérdidas de ozono no habrían tenido lugar si aún estuvieran presentes las condiciones meteorológicas de los años sesenta, incluso en lo que respecta a la elevada concentración actual de halógenos. De esta manera, para realizar una predicción fiable de la distribución de ozono en la estratosfera ártica durante las décadas venideras se necesita comprender mejor los motivos que impulsan estos cambios meteorológicos.

Las observaciones que se llevarán a cabo durante el Año Polar Internacional ayudarán a tratar los asuntos descritos anteriormente. La acción coordinada por numerosos científicos de todo el mundo para explorar mejor el entorno ártico en todas sus facetas supone una tarea apasionante y una oportunidad sin precedentes de aumentar nuestro conocimiento relativo a numerosos aspectos de estas regiones de nuestro planeta, con condiciones severas, pero extremadamente bellas e interesantes.

Agradecimientos

Queremos dar las gracias a las numerosas personas que contribuyeron a las actividades de la campaña Match, proporcionando o lanzando ozonosondas, ofreciendo datos meteorológicos (por ejemplo, el Centro europeo de predicción meteorológica a medio plazo), así como a través de los productos meteorológicos facilitados y mediante valiosos debates científicos durante todos los años en los que las actividades han tenido lugar. La cooperación internacional que representa la campaña Match es posible gracias a la dedicación de todas las personas implicadas (de hecho, demasiadas como para nombrarlas aquí). También queremos dar las gracias a todos los organismos que patrocinaron estas actividades, y especialmente, a la Dirección General de Investigación de la Comisión Europea por el apoyo en varios proyectos.

Referencias

FRIELER, K., M. REX, R. J. SALAWITCH, T. CANTY, M. STREIBEL, R. STIMPFLE, K. PFEILSTICKER, M. DORF, D. K. WEISENSTEIN y S. GODIN-BEEKMAN, 2006: Towards a better quantitative understanding of polar stratospheric ozone

loss, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L10812, doi:10.1029/2005GL025466.

POPE, F. D., J. C. HANSEN, K. D. BAYES, R. R. FRIEDL y S. P. SANDER, 2007: Ultraviolet Absorption Spectrum of Chlorine Peroxide, ClOOCl, *J. Phys. Chem. A*, 111 (20), 4322-4332.

REX, M., 1993: *Stratosphärische Ozonabbauraten aus den Ozonsondendaten der EASOE-Kampagne im Winter 1991/92*, Diplomarbeit, Fachbereich Physik, Georg-August-Universität zu Göttingen.

REX, M., N. R. P. HARRIS, P. VON DER GATHEN, R. LEHMANN, G. O. BRAATHEN, E. REIMER, A. BECK, M. P. CHIPPERFIELD, R. ALFIER, M. ALLAART, F. O'CONNOR, H. DIER, V. DOROKHOV, H. FAST, M. GIL, E. KYRÖ, Z. LITYNSKA, I. S. MIKKELSEN, M.G. MOLYNEUX, H. NAKANE, J. NOTHOLT, M. RUMMUKAINEN, P. VIATTE y J. WENGER, 1997: Prolonged stratospheric ozone loss in the 1995/96 Arctic winter, *Nature*, 389, 835-838.

REX, M., R. J. SALAWITCH, P. VON DER GATHEN, N. R. P. HARRIS, M. CHIPPERFIELD y B. NAUJOKAT, 2004: Arctic ozone loss and climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 31, L04116, doi:10.1029/2003GL018844.

REX, M., R. J. SALAWITCH, H. DECKELMANN, P. VON DER GATHEN, N. R. P. HARRIS, M. P. CHIPPERFIELD, B. NAUJOKAT, E. REIMER, M. ALLAART, S. B. ANDERSEN, R. BEVILACQUA, G. O. BRAATHEN, H. CLAUDE, J. DAVIES, H. DE BACKER, H. DIER, V. DOROKOV, H. FAST, M. GERDING, K. HOPPEL, B. JOHNSON, E. KYRÖ, Z. LITYNSKA, D. MOORE, T. NAGAI, M. C. PARRONDO, D. RISLEY, P. SKRIVANKOVA, R. STÜBI, C. TREPTE, P. VIATTE y C. ZEREFOS, 2006: Arctic winter 2005: Implications for stratospheric ozone loss and climate change, *Geophys. Res. Lett.*, 33, L23808. doi:10.1029/2006GL026731.

STIMPFLE, R., D. M. WILMOUTH, R. J. SALAWITCH y J. G. ANDERSON, 2004: First measurements of ClOOCl in the stratosphere: The coupling between ClOOCl and ClO in the Arctic polar vortex, *J. Geophys. Res.*, 109, D03301, doi:10.1029/2003JD003811.

VON DER GATHEN, P., M. REX, N. R. P. HARRIS, D. LUCIC, B. M. KNUDSEN, G. O. BRAATHEN, H. DE BACKER, R. FABIAN, H. FAST, M. GIL,

E. KYRÖ, I. ST. MIKKELSEN, R. RUMMUKAINEN, M., J. STÄHELIN y C. VAROTSOS, 1995: Observational evidence for chemical ozone depletion over the Arctic in winter 1991-92, *Nature*, 375, 131-134.

WMO[OMM], 2003: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002*, Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 47, 498 pp., Ginebra (Suiza).

WMO[OMM], 2007: *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2006*, Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 50, 572 pp., Ginebra (Suiza).