

Influencia de la variabilidad atmosférica de baja frecuencia en el Atlántico Norte sobre las anomalías extremas de ozono en Islandia

M^a Concepción PARRONDO SEMPERE¹ y Encarna SERRANO MENDOZA²

¹ INTA; Área de Investigación e Instrumentación Atmosférica
parrondosc@inta.es

² Universidad Complutense de Madrid; Departamento de Física de la Tierra I (Geofísica y Meteorología)
eserrano@fis.ucm.es

RESUMEN

En el presente trabajo se analiza la influencia de la variabilidad atmosférica de baja frecuencia de la región del Atlántico Norte sobre las anomalías extremas de ozono total registradas en la estación ártica de Reikiavik en dos periodos estacionales (febrero-marzo-abril y agosto-septiembre-octubre) a lo largo de los años 1978-2002. Para ello, en primer lugar se han obtenido los modos principales del geopotencial sobre el dominio atlántico en siete niveles de altura (desde 1000 hPa hasta 10 hPa) aplicando la técnica de las Funciones Empíricas Ortogonales a las anomalías mensuales de geopotencial, para cada secuencia trimestral. El grado de conexión entre la ocurrencia de eventos extremos de ozono en Reikiavik y la variabilidad atmosférica se cuantifica mediante una regresión múltiple establecida por un criterio estadístico selectivo «paso a paso». Para ambos periodos de estudio, se identifica importantes conexiones entre el geopotencial anómalo en 10 hPa y la ocurrencia de casos extremos de ozono en Reikiavik, con una relación directa entre los signos de las anomalías de ambas variables sobre el lugar. En el caso de los meses agosto-septiembre-octubre, se observa también cierta influencia de las anomalías del geopotencial en superficie (la segunda EOF) sobre las anomalías de ozono total en la estación ártica.

Palabras clave: ozono total, casos extremos de ozono, modos principales del geopotencial, variabilidad atmosférica de baja frecuencia, EOFs, regresión múltiple «paso a «paso».

Influence of the North Atlantic atmospheric low frequency variability on the ozone extreme events in Iceland

ABSTRACT

The influence of the North Atlantic atmospheric low frequency variability on the ozone extreme events in the arctic station of Reykjavik is analyzed for the two 3-months sequences February-March-April and August-September-October through 1978-2002. First, the main geopotential modes over the Atlantic region in seven pressure levels (1000-10 hPa) have been obtained by the Empirical Orthogonal Function technique on the monthly geopotential means. The degree of connection between ozone extreme events in Reykjavik and atmospheric variability is quantified by a multiple stepwise regression. For both periods, significant connections between anomalous 10 hPa geopotential and ozone extreme events at Reykjavik are identified, with a direct relationship between the both variables anomalies on the site. Additionally, for August-September-October sequence, the total ozone at the arctic station appears influenced by surface geopotential anomalies (the second EOF) as well.

Keywords: total ozone, ozone extreme events, principal geopotential modes, atmospheric low frequency variability, EOFs, stepwise regression.

SUMARIO: 1. Introducción. 2. Datos y metodología. 3. Variabilidad atmosférica en la región del Atlántico Norte. 4. Influencia de la VBF en la ocurrencia de casos extremos de ozono. 5. Discusión de resultados. 6. Conclusiones. 7. Agradecimientos. 8. Referencias bibliográficas.

1. INTRODUCCIÓN

Es un hecho constatado que la acción del hombre está haciendo variar, con mayor intensidad en los últimos años, la composición global de la atmósfera. Uno de los gases que más ha sufrido estas consecuencias ha sido el ozono estratosférico (WMO 2002).

Las medidas rutinarias de ozono, tanto desde plataformas orbitales como desde instrumentación terrestre, han puesto de manifiesto que la concentración de ozono total a latitudes altas y medias en los dos hemisferios ha disminuido en las últimas décadas (WMO 2002). Esta tendencia decreciente tiene una dependencia estacional, siendo máxima durante el invierno y principios de primavera (Hollandsworth y Binder 1998). Superpuesta a esta tendencia estacional, existe una considerable variabilidad anual e interanual. Las variaciones a largo plazo de la distribución del ozono es un hecho preocupante debido a varias razones. En primer lugar, actúa como absorbente de la radiación solar de longitud de onda inferior a 320 nm, dañina para el desarrollo celular de los seres vivos. Asimismo, juega un papel muy importante en el equilibrio radiativo de la atmósfera (Ramaswamy et al. 2001). Una disminución del contenido de ozono junto a un aumento de la concentración de gases invernaderos conllevarían a acentuar el gradiente térmico vertical entre estratosfera y troposfera, originando un cambio en la circulación general de la atmósfera. Por todo ello, en los modelos atmosféricos, especialmente en los modelos climáticos, es importante la consideración de factores implicados en la formación, destrucción y transporte de ozono.

La variabilidad del ozono en la estratosfera está gobernada tanto por procesos químicos como dinámicos. Numerosos trabajos se han llevado a cabo para cuantificar la influencia de ciertos parámetros dinámicos en la variabilidad del contenido total de ozono, tales como la altura de la tropopausa (Steinbrecht et al. 1998), la altura del geopotencial (Entzian y Peters 1999), la intensidad del vórtice polar (Ansmann et al. 1996), la vorticidad potencial (Vaughan y Price 1991) y la actividad de ondas planetarias (Fusco y Salby 1999). Sin embargo, existe otro factor dinámico poco estudiado hasta los últimos años y que juega un papel muy importante en la distribución y variabilidad del contenido de ozono. Se trata de la variabilidad atmosférica de baja frecuencia (VBF) del sistema climático, aspecto que considera el presente trabajo. Las variaciones en el sistema océano-atmósfera pueden dar lugar a cambios en la intensidad de las ondas planetarias, responsables del transporte y distribución de ozono desde sus fuentes de producción hacia latitudes altas y por tanto pueden alterar el contenido de la composición química de la atmósfera.

Numerosos estudios han puesto de manifiesto la gran influencia de la VBF del Atlántico Norte en la variabilidad del clima regional de Europa, especialmente durante el invierno (Hurrell 1995; Rodríguez-Fonseca y Serrano 2002; Thompson y Wallace 2002). Durante los últimos años, la conexión entre la VBF en el Atlántico Norte y la evolución temporal de ozono ha sido objeto de estudio por distintos autores (Thompson y Wallace 2000; Brönnimann et al. 2000; Steinbrecht et al. 2001; Orsolini y Doblas-Reyes 2003). Estos estudios han demostrado que parte de las variaciones en el contenido total de ozono y en el nivel de la tropopausa en el Hemisferio Norte están relacionadas con conocidos patrones atmosféricos (Oscilación del Atlántico Norte, NAO; Oscilación

Ártica, AO; patrón del Atlántico Este, EA...), todos ellos definidos en niveles de presión troposféricos (≥ 500 hPa). Además, algunos de estos trabajos evidencian diferencias geográficas en las tendencias de ozono inducidas por las variaciones en los patrones atmosféricos (Appenzeller et al. 2000; Orsolini y Doblas-Reyes 2003).

El presente trabajo pretende ampliar el conocimiento actual sobre la influencia de la variabilidad climática en el ozono total medido en una estación ártica (Reikiavik), ya que su localización en altas latitudes ofrece gran interés en la evaluación de los procesos de destrucción de ozono. Con este fin, se analiza el grado de conexión entre los casos de anomalías extremas de ozono y los principales modos atmosféricos en diferentes niveles de presión, desde 1000 hPa hasta 10 hPa. Asimismo, como complemento a estudios previos, el presente trabajo no sólo ha considerado los meses de principios de primavera (es decir, cuando se observan los máximos de ozono en el Hemisferio Norte), sino también incluye un análisis paralelo correspondiente a meses estivales.

2. DATOS Y METODOLOGÍA

El presente estudio se basa en datos promedios mensuales correspondientes a dos periodos estacionales, uno formado por los meses de febrero, marzo y abril (FMA), y un segundo, con los meses de agosto, septiembre y octubre (ASO) a lo largo de 25 años (1978-2002).

La información sobre el contenido total de ozono en la estación de Reikiavik (64°N - 23°W) procede de la serie de datos diarios medidos con el espectrómetro Dobson #51 instalado en 1957. Los campos de geopotencial corresponden a los valores medios mensuales en los niveles de 1000, 500, 250, 100, 50, 30 y 10 hPa del reanálisis del NCEP (National Centers for Environmental Prediction) sobre la región del Atlántico Norte (en concreto, 100°W - 30°E - 20°N - 80°N), con una resolución espacial de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ en latitud-longitud (Kalnay et al. 1996).

Al tratarse de un estudio de variabilidad climática, a partir de los datos iniciales se han calculado las anomalías mensuales para los distintos parámetros (cantidad total de ozono y geopotencial) respecto al correspondiente valor medio mensual en todo el periodo (1978-2002). Los principales modos que definen la variabilidad atmosférica en la región de estudio se han identificado aplicando la técnica de las Funciones Empíricas Ortogonales (Barnston y Livezey 1987) a las anomalías mensuales del geopotencial en los siete niveles de altura.

Como es habitual en los estudios de variabilidad climática, los casos extremos se han identificado como aquéllos en los que la anomalía estandarizada en valor absoluto es mayor que la unidad.

3. VARIABILIDAD ATMOSFÉRICA EN LA REGIÓN DEL ATLÁNTICO NORTE

El análisis de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOFs) de las anomalías mensuales del geopotencial a diferentes alturas (desde 1000 hasta 10 hPa) indica que

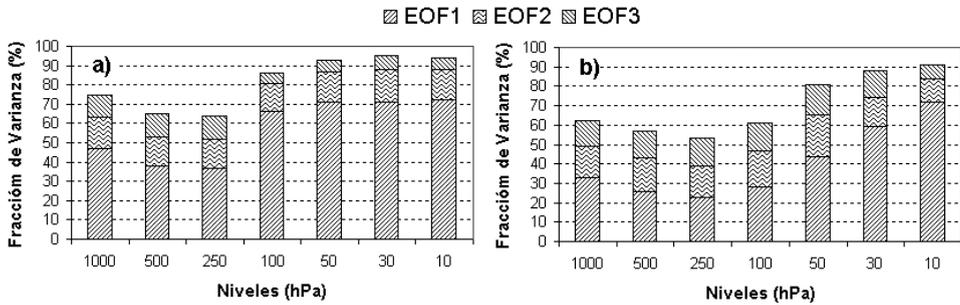


Figura 1. Fracción de varianza del geopotencial correspondiente a las tres primeras EOFs en diferentes niveles atmosféricos para las secuencias trimestrales FMA (a) y ASO (b) durante 1978-2002.

la variabilidad atmosférica en el Atlántico Norte durante los meses febrero-marzo-abril (FMA) está prácticamente definida en función de los tres primeros modos. La Fig. 1a muestra la contribución de estos principales modos del geopotencial en la varianza total, de forma que puede apreciarse que los porcentajes en los tres niveles inferiores (≥ 250 hPa) son muy parecidos. Asimismo, se observa la influencia dominante del primer patrón, cuya importancia es más notable en los niveles superiores, con una fracción de varianza del orden del 70%. Estas diferencias entre troposfera y baja estratosfera podrían deberse a que la escala temporal de los procesos dinámicos que perturban el flujo medio en la troposfera es considerablemente menor que aquéllos que ocurren en la estratosfera. Mientras que la circulación troposférica extratropical está continuamente perturbada por el desarrollo rápido de ondas baroclínicas, la circulación en la estratosfera está controlada principalmente por las interacciones entre el flujo zonal y las ondas planetarias que se propagan verticalmente desde la troposfera.

La Fig. 1b refleja que la variabilidad atmosférica sobre la región del Atlántico Norte en la secuencia trimestral agosto-septiembre-octubre (ASO) viene definida por más modos que en los meses FMA. La diferencia más destacada en la contribución de cada EOF entre ambos periodos es una significativa reducción del primer modo en prácticamente todos los niveles (excepto en el más alto, 10 hPa).

4. INFLUENCIA DE LA VBF EN LA OCURRENCIA DE CASOS EXTREMOS DE OZONO

Como se indicó en la Introducción, uno de los factores dinámicos que más modulan el contenido total de ozono en el Hemisferio Norte es la variabilidad atmosférica de baja frecuencia en el Atlántico Norte. El grado de conexión de los casos extremos de ozono en Reikiavik observados en las secuencias trimestrales febrero-marzo-abril y agosto-septiembre-octubre con los principales modos del geopotencial se ha establecido a partir de regresiones lineales y múltiples entre las anomalías extremas mensuales de

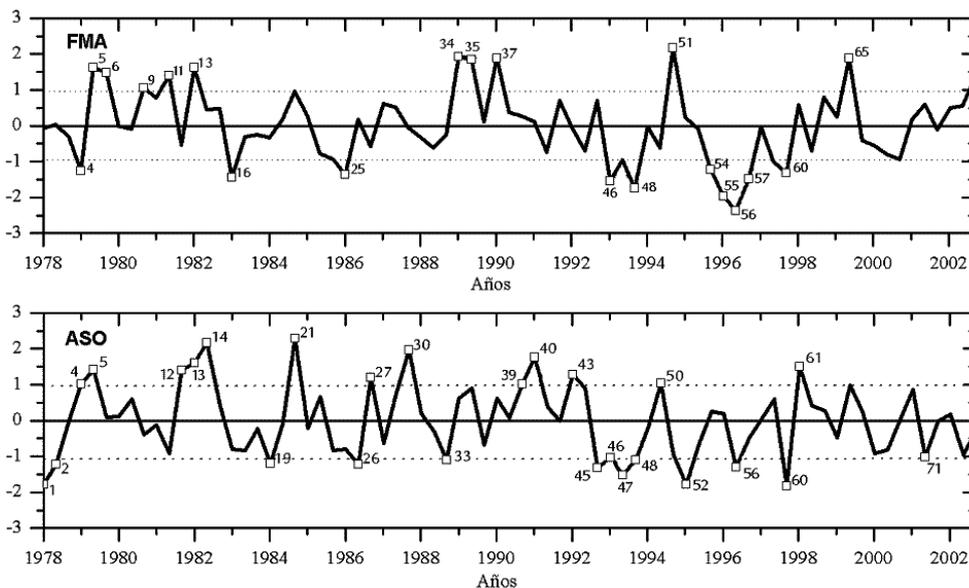


Figura 2. Evolución temporal de las anomalías mensuales estandarizadas de ozono en la estación de Reikiavik a lo largo de las secuencias trimestrales FMA y ASO durante los años 1978-2002. Los cuadrados blancos identifican los casos extremos.

ozono y los correspondientes valores de cada componente principal (PC) del geopotencial por nivel, en cada periodo de estudio.

La evolución temporal de la serie de anomalías mensuales estandarizadas de ozono en los dos periodos de estudio se muestra en la Fig. 2, de modo que los casos extremos se han etiquetado con el número de orden que ocupa en la correspondiente serie completa. De los 75 datos que componen cada serie trimestral, se han identificado 21 y 26 valores extremos en las secuencias de FMA y ASO, respectivamente. En ambas secuencias, puede observarse un cierto comportamiento decadal en las anomalías extremas de ozono, de modo que los valores positivos ocurren principalmente en los años 1980 mientras que los negativos en los años 1990.

Los coeficientes de correlación lineal recogidos en la Tabla 1 indican que el primer modo del geopotencial en niveles estratosféricos son los más influyentes en la ocurrencia de anomalías extremas de ozono en Reikiavik en ambos periodos, en particular, el patrón del geopotencial en 10 hPa (Z10). No obstante, como muestran las Figs. 3a y 4a, la estructura de este modo principal no es el mismo entre los dos periodos. El primer patrón de Z10 en los meses ASO no es ni tan zonal ni tan intenso como en FMA, correspondiendo en este último caso a una porción de la estructura anular de la Oscilación Ártica (AO). La Tabla 1 indica además una cierta conexión entre las anomalías extremas de ozono y el principal modo atmosférico en superficie (tipo NAO, véase las Figs. 3c y 4c).

Tabla 1. Coeficientes de correlación lineal entre las anomalías mensuales extremas de ozono en Reikiavik y las tres primeras PCs del geopotencial en diferentes alturas para los meses FMA y ASO durante 1978-2002 (valores estandarizados). Se destacan los valores estadísticamente significativos al 99% (test t-Student)

Nivel (hPa)	FMA			ASO		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
1000	0.54	0.37	0.07	0.58	0.70	0.21
500	0.45	0.27	0.24	0.64	0.66	0.50
250	0.38	0.32	0.23	0.71	0.59	0.47
100	0.22	0.57	0.49	0.43	0.69	0.23
50	0.49	0.62	0.40	0.70	0.50	0.27
30	0.60	0.64	0.28	0.79	0.43	0.33
10	0.66	0.64	0.07	0.81	0.28	0.00

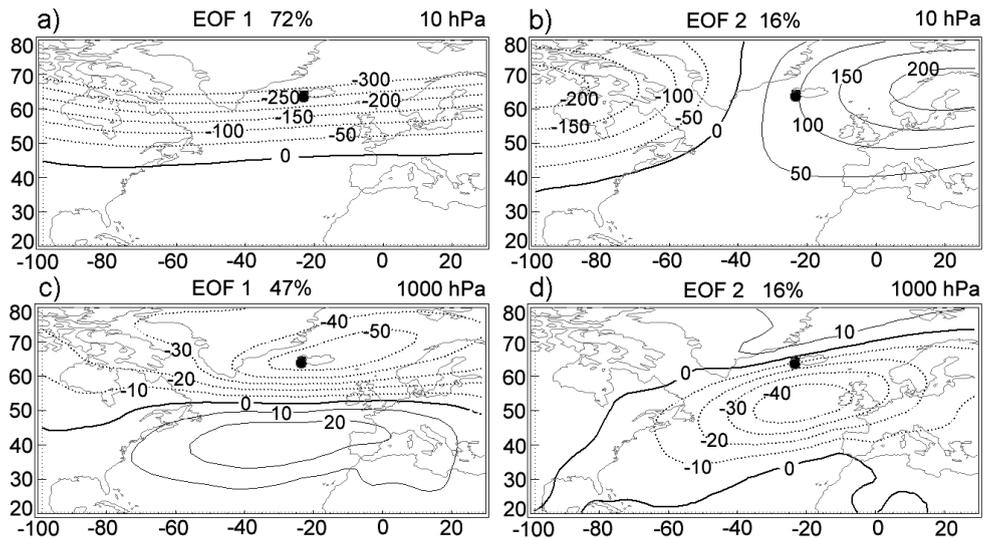


Figura 3. Dos primeras EOFs del geopotencial en 1000 hPa y 10 hPa sobre la región de Atlántico Norte en la secuencia trimestral FMA (1978-2002). En cada EOF se indica la fracción de varianza correspondiente. Las isolinéas muestran el valor de la anomalía de la altura del geopotencial (en m) que está asociada a una desviación estándar de la correspondiente componente principal.

Con objeto de identificar aquellos patrones del geopotencial que conjuntamente recojan la contribución atmosférica en la ocurrencia de los casos extremos de ozono en Reikiavik se ha llevado a cabo un análisis de regresión múltiple selectivo «paso a paso» (conocido como «stepwise», Neter y Wasserman 1974). Mediante esta

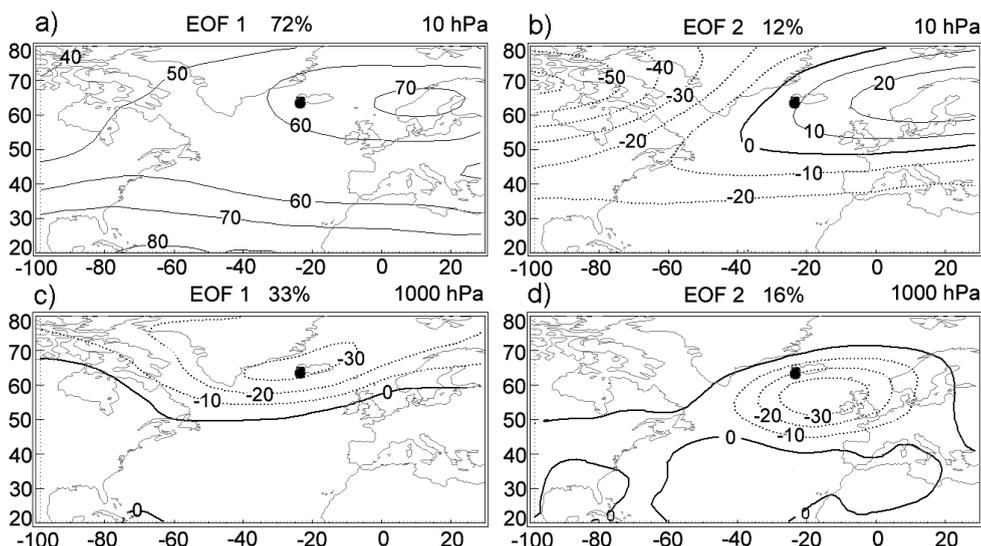


Figura 4. Como Fig. 3 pero para la secuencia trimestral ASO.

técnica, el número de PCs del geopotencial que aparecen relacionadas con las anomalías extremas de ozono se reduce considerablemente al tener en cuenta que algunas de las PCs pueden no ser fundamentales en la conexión o cuya influencia esté implícitamente incluida a través de alguna PC ya seleccionada.

Estableciendo un nivel de confianza del 99%, el proceso estadístico de selección «paso a paso» indica que, en los meses FMA además de la influencia del patrón dominante del geopotencial en 10 hPa, el segundo modo en este nivel completa la conexión atmosférica con la ocurrencia de anomalías extremas de ozono en Reikiavik (coeficiente de correlación múltiple 0.77). La expresión explícita de la regresión múltiple seleccionada es:

$$[03]_{\text{FMA}} = (-8.88 \text{ PC}_{1_{10}} + 5.67 \text{ PC}_{2_{10}} + 0.58) \times 10^{-1} \quad [1]$$

siendo O3 las anomalías estandarizadas de ozono y las PCs valores estandarizados también. Teniendo en cuenta el signo de los parámetros de la regresión múltiple [1], así como el signo de las anomalías del geopotencial en los patrones atmosféricos EOF1 y EOF2 en 10 hPa mostrados en las Figs. 3a y 3b, se concluye que en un considerable número de ocasiones las anomalías extremas de ozono total en Reikiavik en FMA parecen estar conectadas con fuertes anomalías del mismo signo del geopotencial en 10 hPa sobre el lugar. Estas anomalías atmosféricas forman parte de una estructura híbrida de dos patrones: uno, análogo a la sección atlántica de la AO (EOF1) y otro, un patrón dipolar con orientación oeste-este (EOF2). La Fig. 5 (panel izquierdo) muestra el alto grado de coincidencia en la forma de evolución entre las secuencias temporales de las anomalías (estandarizadas) extremas de ozono y de las anomalías estimadas usando la expresión [1] para los meses FMA.

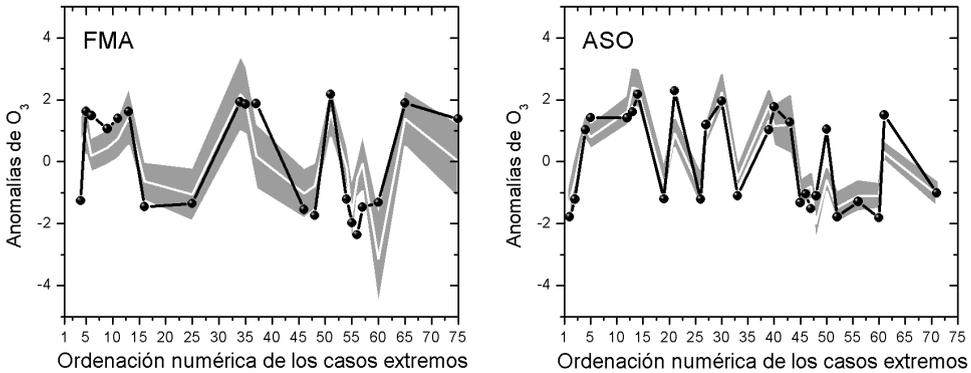


Figura 5. Anomalías estandarizadas extremas de ozono en Reikiavik en las secuencias trimestrales FMA y ASO: valores reales en línea continua gruesa y valores estimados (a partir de las regresiones múltiples [1] y [2] respectivamente) en línea continua blanca. La banda sombreada muestra el intervalo de confianza de 95% para los valores estimados. En el eje de abscisas se indica el n° de orden de los casos extremos en la secuencia temporal de la serie total de datos.

Dado que la variabilidad climática de baja frecuencia (VBF) no es el único proceso que influye en el contenido total de ozono, es razonable que ciertos episodios extremos no sean «captados» por la expresión [1]. Tal es el caso del episodio n° 56 (marzo 1996), precisamente el episodio más extremo de los registrados en el periodo FMA. Esta anomalía tan negativa parece fue debida en gran parte a procesos químicos de destrucción de ozono, tal como se referencia en ciertos estudios (Muller et al. 1997). Otros episodios «no estimados adecuadamente» por la VBF son el n° 16 y n° 48, correspondientes a febrero 1983 y abril 1993, respectivamente. Estos episodios parecen estuvieron relacionados con procesos de destrucción de ozono motivados por el aumento de aerosoles sulfatados emitidos en las erupciones volcánicas del Chinchón en 1982 y del Pinatubo en 1991 respectivamente (Hofmann 1987; Kerr et al. 1993).

En los meses ASO, la conexión entre VBF y ozono en Reikiavik identificada por el análisis de regresión «paso a paso» viene dada por:

$$[03]_{ASO} = (6.67 PC1_{10} - 4.81 PC2_{1000} - 0.01) \times 10 \quad [2]$$

con un coeficiente de correlación múltiple de 0.89. La expresión [2] indica que en los meses ASO, el primer modo del geopotencial en 10 hPa es también la estructura atmosférica más frecuentemente conectada con la ocurrencia de casos extremos de ozono. Si bien, como ya se ha indicado, dicha estructura no tiene la forma zonal ni la intensidad que presenta dicho modo en los meses FMA, posiblemente como consecuencia de la no-existencia del vórtice polar en los meses ASO. Dado el signo de las isolíneas de la EOF1 de Z10 y la EOF2 de Z1000 mostradas en las Figs. 4a y 4d respectivamente, la expresión [2] indica que eventos extremos positivos de ozono

total en Reikiavik en este periodo están asociados a anomalías del geopotencial positivas en la baja estratosfera y negativas en superficie.

5. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos parecen indicar que una gran parte de las anomalías extremas de ozono total observadas en Reikiavik están relacionadas con variaciones en la circulación de la baja estratosfera. Un incremento en el gradiente meridional de los campos del geopotencial contribuye a una intensificación del flujo zonal hacia el oeste (Kodera y Koide 1997), hecho que dificulta la penetración de ondas semiestacionarias a gran escala, las cuales representan la principal fuente de transporte meridional de ozono en la baja estratosfera desde la troposfera, reflejándose en las anomalías de ozono observadas.

Al igual que otros estudios (Thompson et al. 2000), el presente trabajo evidencia que la variabilidad del principal modo de variabilidad atmosférica en el Hemisferio Norte, la AO, modula el contenido total de ozono. Si bien en numerosos trabajos se pone de manifiesto la influencia de patrones del geopotencial en los niveles troposféricos (tales como la NAO) sobre las anomalías de ozono, en el presente estudio se ha identificado esta influencia de forma explícita en el periodo ASO, mientras que en el periodo FMA, los patrones troposféricos están implícitamente incluidos en las dos primeras EOFs del geopotencial en 10 hPa dada la conexión existente entre troposfera y estratosfera en este periodo.

6. CONCLUSIONES

Tanto para los meses febrero-marzo-abril (FMA) como en agosto-septiembre-octubre (ASO), el correspondiente primer modo del geopotencial en 10 hPa sobre la región del Atlántico Norte ha sido estadísticamente identificado (regresión «paso a paso») como el más influyente en la ocurrencia de casos extremos de O_3 en Reikiavik, con una relación directa entre los signos de las anomalías de ambas variables sobre el lugar. Este resultado sugiere que la existencia del vórtice polar ártico, aún siendo un factor importante asociado al contenido total de O_3 , no es causa única en la ocurrencia de anomalías extremas. No obstante, los resultados obtenidos en el presente estudio constituyen una evidencia más de que una tendencia positiva (negativa) de la AO está asociada a una disminución (incremento) de la actividad de ondas planetarias, a una intensificación (debilitamiento) del vórtice polar en los meses de invierno y por lo tanto, a anomalías negativas (positivas) de la columna total de ozono en latitudes medias y altas del Hemisferio Norte.

Por otra parte, la influencia atmosférica en la variabilidad extrema del O_3 en Reykiavik parece potenciarse al considerar también un segundo modo del geopotencial: el de 10 hPa para los meses FMA, o el de 1000 hPa en los meses ASO. Esta diferencia entre periodos parece reflejar el mayor grado de conexión entre troposfera y estratosfera existente en FMA respecto a los meses ASO.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center (Boulder, Colorado, USA); <http://www.cdc.noaa.gov/>) los datos proporcionados de geopotencial del reanálisis NCEP y al Dr. B. Thorkelsson (Icelandic Meteorological Office) los datos de ozono total en Reikiavik.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANSMANN, A.; F. WAGNER, U. WANDINGER & I. MATTIS (1996). Pinatubo aerosol and stratospheric ozone reduction: Observations over Central Europe. *J. Geophys. Res.*, 101, 18775-18785.
- APPENZELLER, C.; A. K. WEISS & J. STAEHELIN (2000). North Atlantic Oscillation modulates total ozone winter trends. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 1131-1134.
- BARNSTON, A. G. & R. E. LIVEZEY (1987). Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Mon. Wea. Rev.*, 115, 1083-1126.
- BRONNIMANN, S.; J. LUTERBACHER, C. SCHMUTZ & H. WANNER (2000). Variability of total ozone at Arosa, Switzerland, since 1931 related to atmospheric circulation indices. *Geophys. Res. Lett.*, 27, 2213-2216.
- ENTZIAN, G. & D. PETERS (1999). Very low zonally asymmetric ozone values in March 1997 above the North Atlantic-European region, induced by dynamical processes, *Ann. Geophysicae*, 17, 933-940.
- FUSCO, A. C. & M. L. SALBY (1999). Interannual variations of total ozone and their relationship to variations of planetary wave activity. *J. Climate*, 12, 1619-1629.
- HOFMANN, D. J. (1987). Perturbations to the global atmosphere associated with the El Chinchón volcanic eruption of 1982. *Rev. Geophys.*, 25, 743-759.
- HOLLANDSWORTH, S. M & M. D. BINDER (1998). Stratospheric Ozone, an electronic textbook. Goddard Space Flight, Center Atmospheric Chemistry and Dynamic Branch of NASA.
- HURRELL, J. W. (1995). Decadal trends in the North Atlantic Oscillation regional temperatures and precipitation. *Science*, 269, 676-679.
- KALNAY, E.; M. KANAMITSU, R. KISTLER, W. COLLINS, D. DEAVEN, L. HANDIN, M. IREDELL, S. SAHA, G. WHITE, J. WOOLLEN, Y. ZHU, M. CHELLIAH, W. EBISUZAKI, W. HIGGINS, J. JANOWIAK, K. C. MO, C. ROPELEWSKI, J. WANG, A. LEETMAA, R. RENOLDS, R. JENNE & D. JOSEPH (1996). The NCEP / NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77, 437-471.
- KERR, J.B.; D. I. WARDLE & D. W. TARASICK (1993). Record low ozone values over Canada in early 1993. *Geophys. Res. Lett.*, 20, 1979-1982.
- KODERA, K. & H. KOIDE (1997). Spatial and Seasonal Characteristics of Recent Decadal Trends in the Northern Hemispheric Troposphere and Stratosphere. *J. Geophys. Res.*, 102, 19433-19447.
- MÜLLER, R.; P. CRUTZEN, J. U. GROOß & C. BRÜHL (1997). Severe chemical ozone loss in the arctic during the winter of 1995-1996. *Nature*, 389, 709-712.
- NETER, J. & W. WASSERMAN (1974). *Applied Linear Statistical Models*. Richard D. Irwin, Inc. Illinois. 842 pp.

- ORSOLINI, Y. & F. DOBLAS-REYES (2003). Ozone signatures of climate patterns over the Euro-Atlantic sector in the spring. *Quart. J. of the Royal Met. Soc.*, 129, 3251-3263.
- RAMASWAMY, V.; M. L. CHANIN, J. ANGELL, J. BARNETT, D. SEIDEL, M. GELMAN, P. KECKHUT, Y. KOSHLEKOV, K. LABITZKE, J. J. LIN, A. O'NEILL, J. NASH, W. RANDEL, R. ROOD, K. SHINE, M. SHIOTANI & R. SWINBANK (2001). Stratospheric temperature trends: Observations and model simulations. *Reviews of Geophysics*, 39, 71-122.
- RODRÍGUEZ-FONSECA, B. & E. SERRANO (2002). Winter 10-day coupled patterns between geopotential height and Iberian Peninsula rainfall using the ECMWF precipitation reanalysis. *J. Climate*, 15, 1309-1321.
- STEINBRECHT, W.; H. CLAUDE, U. KÖHLER & K. P. HOINKA (1998). Correlations between tropopause height and total ozone: Implications for long-term changes. *J. Geophys. Res.*, 103, 19183-19192.
- STEINBRECHT, W.; H. CLAUDE, U. KÖHLER & P. WINKLER (2001). Interannual changes of total ozone and northern hemisphere circulation patterns. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 1191-1194.
- THOMPSON, D. W. J. & J. M. WALLACE (2000). Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J. Climate*, 13, 1000-1016.
- THOMPSON, D. W. J.; J. M. WALLACE & G. C. HEGERL (2000). Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends. *J. Climate*, 13, 1018-1036.
- THOMPSON, D. W. J. & J. M. WALLACE (2002). Regional climate impacts of the northern hemisphere annular mode. *Science*, 293, 85-89.
- VAUGHAN, G. & J. D. PRICE (1991). On the relation between total ozone and meteorology. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 117, 1281-1298.
- WMO (2002). *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002*.

