

Investigando el “agujero de ozono” en la Patagonia Austral

Beatriz Milicic

Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura
 Universidad Nacional de Rosario
 bmilicic@fceia.unr.edu.ar

En este trabajo se presenta una introducción al conocimiento del fenómeno de la drástica disminución en la concentración de ozono estratosférico en primavera, que se ha dado en llamar “agujero de ozono”. Consta de dos partes: en la primera se realiza una caracterización del ozono, su distribución, los procesos de generación y destrucción, el “agujero de ozono” y su influencia en la biosfera. En la segunda parte se presentan los grupos de investigación sobre ozono y radiación UV que trabajan en la Patagonia.

Palabras clave: agujero de ozono, radiación UV, investigación en Patagonia, efectos biológicos

This paper presents an introduction to the knowledge of the phenomenon due to the huge decrease of the stratospheric ozone concentration in spring, which is known as “ozone hole”. It has two parts: the first one characterizes ozone, its distribution, generation and destruction processes, the so-called “ozone hole” and its influence in the biosphere. The second part presents Patagonian ozone and UV radiation research groups.

Keywords: ozone hole, UV radiation, research in Patagonia, biological effects

Caracterización del ozono estratosférico

El descubrimiento del “agujero de ozono”, a mediados de los años ‘80, tomó por sorpresa a los científicos, quienes creían comprender los procesos físicos y fotoquímicos que sufría el ozono estratosférico¹. En 1985, Joseph Farman y sus colegas descubrieron que el valor de las mediciones de concentración de ozono realizadas desde la base antártica de Halley Bay (UK) decrecía un orden del 50 % en la primavera polar a partir de 1975 (Figura 1). Observaron además que era un fenómeno estacional: durante el verano la concentración de ozono volvía a sus valores normales. (Todaro, 2000)

En 1986 Richard Stolarski y sus colegas analizaron en profundidad las mediciones

satelitales de ozono realizadas con el equipo TOMS, tomadas de rutina y disponibles desde 1978. Los valores encontrados mostraban una disminución en la concentración del ozono durante la primavera, extendida sobre toda la superficie de la Antártida, centrada en el Polo Sur. Estas mediciones coincidían con las de Farman, (Figura 1) con lo cual se demostró además la confiabilidad de los datos satelitales. Una manera de ilustrar en forma gráfica las mediciones de una vasta región es mediante imágenes de falso color (Figura 2). Debido a la apariencia visual de esta región de baja concentración de ozono, se la denominó “agujero de ozono”. En realidad, no existe un agujero ni tampoco una capa de ozono, sino que son metáforas utilizadas para ilustrar al fenómeno.

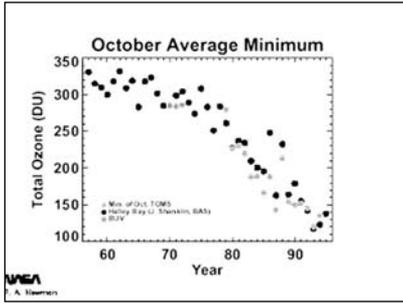


Figura 1: Gráfico de los resultados de las mediciones en Halley Bay en el período 1957-1995 (puntos negros) y las obtenidas por el TOMS (puntos grises). Se observa el cambio en la pendiente a mediados de los años '70. (Fuente Todaro, 2000)

EP/TOMS Total Ozone for Oct 9, 2005

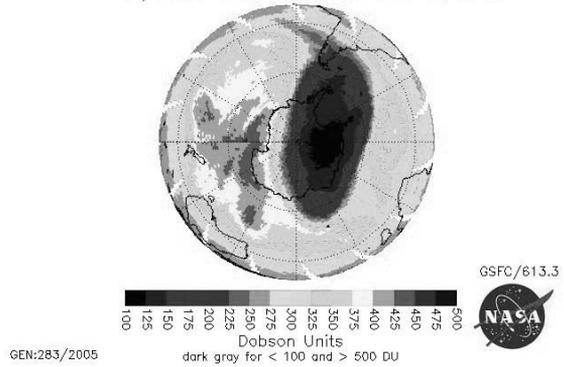


Figura 2: Imagen en falso color del hemisferio sur, centrada en el Polo Sur, en el que se observa el “agujero de ozono” sobre la Patagonia. Fuente: NASA

Ozono

El ozono es una molécula constituida por tres átomos de oxígeno (O₃). Es un gas que aún en concentraciones de algunas partes por millón es tóxico para los seres vivos, por lo cual se lo considera contaminante cuando se encuentra en la troposfera (ver recuadro Ozono troposférico). Sin embargo, es imprescindible para la vida cuando se encuentra en la estratosfera debido a que absorbe radiación ultravioleta, disminuyendo así su intensidad.

En la figura 3 se observa el perfil* de concentraciones de ozono: el 90 % del ozono presente en la atmósfera se encuentra en la estratosfera, entre los 15 y 30 km de altura, mientras que el 10 % restante está en la troposfera. Otra forma de indicar la cantidad de ozono presente en la atmósfera, consiste en medir la cantidad total de ozono que se encuentra en una columna imaginaria vertical que va desde la superficie terrestre hasta el límite superior de la atmósfera. La cantidad total de ozono se mide en unidades Dobson (UD), que indican el espesor que tendría una capa formada sólo por moléculas de ozono, a presión atmosférica normal, 1013,25 mb y a una temperatura de 0°C, donde 1 UD = 10⁻⁵ m, o sea una centésima de milímetro. Una concentración normal de ozono para latitudes medias es de 300 UD, lo que equivale a un espesor de 3 mm.

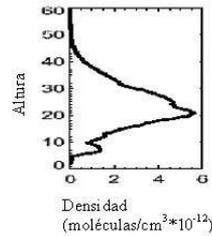


Figura 3: Perfil de ozono (Fuente Todaro, 2000)

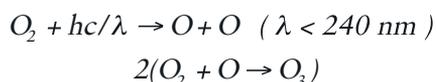
El ozono estratosférico es esencial para la vida, ya que absorbe una parte importante de la radiación ultravioleta (UV): una disminución en su concentración implica un aumento de radiación UV en la superficie terrestre. Los efectos biológicos de la radiación UV se derivan de su alta capacidad para ionizar moléculas y de su gran poder de penetración en los organismos, dando lugar a la destrucción de cadenas de ácidos nucleicos, mutaciones genéticas y muerte celular. Las exposiciones prolongadas en los seres humanos puede ocasionar cáncer de piel, daños en la retina y deficiencias en el sistema inmunológico, aumentando la probabilidad de que ocurran infecciones bacterianas y virales.

En la primera parte de este artículo se describe el proceso de formación, circulación, acumulación y destrucción del ozono estratosférico y del “agujero de ozono” en particular, estos conceptos se han tomado de Todaro (2000). En el CD adjunto a esta publicación (Misceláneas) se presenta información complementaria. En la segunda parte se realiza una breve reseña de los grupos que investigan este tema que se encuentran en la Patagonia Austral.

Procesos de generación y destrucción del ozono

La cantidad de ozono que se encuentra en la estratosfera depende de un equilibrio dinámico: surge del balance entre su producción a partir de la radiación UV y su destrucción por reacciones catalíticas. Si aumenta la radiación UV de longitudes de onda menores a 240 nm, aumentará la producción de ozono. La pérdida de ozono es un proceso natural que se debe a la presencia en la atmósfera de niveles normales de gases como el metano, el óxido nitroso, el bromuro de metilo, el cloruro de metilo, etc. Si se incrementan estas sustancias o si se agregan otros compuestos nuevos en la estratosfera, disminuye la concentración de ozono, hasta que se llegue a un nuevo equilibrio entre su generación y su destrucción.

El ozono se forma cuando la radiación ultravioleta de longitud de onda menor a 240 nm interactúa con moléculas de oxígeno (O_2), descomponiéndose en oxígeno atómico (O) y formándose moléculas de ozono (O_3). Este proceso se representa de la siguiente manera:



Donde: hc/λ^2 : fotón o radiación UV incidente

h: constante de Planck

c: velocidad de la luz

λ : longitud de onda del fotón

La velocidad de generación del ozono es muy lenta: si se destruyera todo el ozono que se

Ozono troposférico.

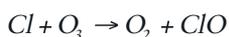
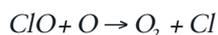
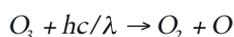
El ozono que se encuentra en la troposfera (capa atmosférica que se encuentra entre la superficie terrestre y los 12 km de altura) es uno de los principales componentes de la bruma industrial y se forma por reacción fotoquímica (con la luz solar) de contaminantes como los óxidos de nitrógeno (NO_x) emitidos por los vehículos y la industria, o los compuestos orgánicos volátiles emitidos por los vehículos, los disolventes y la industria. Los mayores niveles de contaminación por ozono se registran cuando hay tiempo soleado.

Según lo reportado por la Organización Mundial de la Salud (2006) El exceso de ozono en el aire puede tener importantes efectos en la salud humana. Puede causar problemas respiratorios, desencadenar ataques de asma, reducir la función pulmonar y causar enfermedades pulmonares. En Europa es uno de los contaminantes atmosféricos más preocupantes. Varios estudios europeos han revelado que la mortalidad diaria aumenta en un 0,3%, y la mortalidad por cardiopatías en un 0,4%, por cada $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ adicionales de exposición al ozono. Para mayor información, consultar la Directiva 2002/3/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 12 de febrero de 2002 relativa al ozono en el aire ambiente. (disponible en la página de Internet: www.mityc.es/NR/rdonlyres/E39BF38F-2B25-4DB6-83E0-26E96B1B7D4/0/Directiva2002_3_CE.pdf)

encuentra a una altura de 20 km, se tardaría un año en reemplazarlo. La producción de ozono tiene lugar mayoritariamente en la estratosfera, en la región de los trópicos, debido a que allí es más alta la intensidad de la radiación UV. Por lo tanto, se esperaría que allí estuvieran sus mayores concentraciones, sin embargo, éstas se encuentran en las latitudes medias y altas de ambos hemisferios. Esto se debe a la circulación estratosférica de masas de aire que es conocida como de Brewer-Dobson: estos vientos transportan el ozono de la alta estratosfera en la región de los trópicos hacia la baja estratosfera en las latitudes medias.

La molécula de ozono se destruye cuando reacciona con otros elementos que se encuentran en la estratosfera, por ejemplo cloro,

nitrógeno, bromo o hidrógeno. Generalmente ocurre a través de un proceso catalítico³. Este proceso es muy eficiente ya que la radiación UV es removida antes de que llegue a la superficie terrestre. En el caso del cloro, la reacción es la siguiente:



Efecto neto: $O_3 + O_3 \rightarrow 3O_2$

A los 40 km de altura, esta cadena catalítica Cl-ClO puede destruir mil moléculas de ozono antes de convertirse en HCl o ClONO₂. Estos compuestos viven durante unos días, hasta que nuevamente son fotolizados por la radiación UV, liberando nuevamente al átomo de Cl, que reinicia el ciclo. Durante su vida en la estratosfera, un átomo individual de Cl puede destruir unas 100.000 moléculas de ozono, antes de recombinarse formando una molécula estable.

El cloro liberado a la atmósfera puede provenir de fuentes naturales o generadas por el hombre (antropogénicas). Entre las naturales, las más importantes son las erupciones volcánicas, cuando las erupciones son explosivas, pueden inyectar material directamente a la estratosfera, a alturas que pueden alcanzar los 30 km. Entre estos materiales se encuentra el dióxido de azufre, que es oxidado en la estratosfera formando ácido sulfúrico en aerosoles⁴, que actúan como núcleos de condensación en la formación de las nubes estratosféricas polares, cuya presencia es una condición necesaria para los procesos de destrucción masiva del ozono, como se analizará más adelante.

Entre las antropogénicas, la más importante es la de los clorofluorcarbonados, CFC (ver recuadro). Otras fuentes son los productos de combustión liberados a la atmósfera por la quema de bosques (especialmente los del Amazonas, debido a su magnitud), por los

Caracterización de los CFC

Los CFC, compuestos por cloro, carbono y flúor, fueron desarrollados por Thomas Midgely en 1928 para reemplazar al amoníaco como refrigerante. Debido a su alta estabilidad, su no toxicidad y sus propiedades térmicas fueron utilizados ampliamente en sistemas de refrigeración, en espumas sintéticas, como propelente de insecticidas, en desodorantes, etc. Al ser liberados en la troposfera, llegan a la estratosfera a través de circulaciones verticales en los trópicos y son llevados hacia las regiones polares por vientos estratosféricos. Estos compuestos reaccionan mediante procesos de química heterogénea (que se analizarán más adelante), liberando átomos de cloro y bromo, los cuales pueden actuar como catalizadores en la destrucción del ozono y eventualmente reaccionar con el metano para formar ácido clorhídrico. Desde principios de los '90 se ha encontrado que la concentración de HCl ha estado aumentando, favoreciendo la drástica disminución en la concentración de ozono estratosférico en primavera.

aviones supersónicos y los trasbordadores espaciales, ya que ellos vuelan en la zona estratosférica, liberándolos allí mismo.

Otros gases que participan en la destrucción del ozono son los que contienen bromo; los más importantes son los halones y el bromuro de metilo. Los halones se emplean principalmente en los extintores de incendios, siendo liberados directamente a la atmósfera. Producen un efecto aún más dañino, ya que el bromo puede reaccionar con el ozono entre 10 y 100 veces más que el cloro. Las concentraciones de halones, si bien son muy pequeñas, se duplican en la atmósfera cada cinco años.

El bromuro de metilo se utiliza como insecticida y se fumiga en cosechas de alto valor económico para la lucha contra las plagas y para el tratamiento en cuarentena de productos agrícolas básicos en espera de su exportación. El consumo anual mundial total asciende a unas 70.000 toneladas, en su mayor parte en los países industrializados. A diferencia de los CFC y los halones, el bromuro de metilo y el metil cloroformo también se forman en la naturaleza. Las fuentes naturales de estos

gases aportan alrededor del 27-42% del bromo y el 16% del cloro en la estratosfera.

Teorías propuestas para explicar el fenómeno conocido como “agujero de ozono”.

Los procesos de destrucción del ozono presentado en el apartado anterior no son lo suficientemente rápidos como para explicar el fenómeno del “agujero de ozono”. Desde un principio se pensó que sería el producto de alguna combinación de las temperaturas extremadamente bajas de la noche antártica y el aumento en los niveles de cloro, surgiendo diversas teorías respecto de esta rápida y drástica disminución estacional del ozono.

Una de ellas se basaba en la dinámica de la atmósfera y planteaba que había habido un cambio en la circulación atmosférica sobre la Antártida, en virtud del cual aire proveniente de la troposfera, pobre en ozono, sería llevado hacia la estratosfera, variando así la concentración del ozono.

Otra teoría se centraba en el óxido de nitrógeno; se proponía que el aumento en los niveles de NO_x producidos por efectos fotoquímicos debidos a tormentas solares durante 1979, era el responsable de la disminución del ozono, lo que estaba en consonancia con la aparición de las bajas concentraciones de ozono, observadas a partir de esa década.

Una tercer teoría, conocida como de la química heterogénea⁵ propuso que existen alteraciones en la química de la estratosfera polar debido a reacciones que ocurren en la superficie de las nubes estratosféricas polares, que se forman por las bajas temperaturas reinantes en la noche polar. La presencia de estas nubes es fundamental, ya que los compuestos no reactivos químicamente, que contienen cloro, al reaccionar con los constituyentes de estas nubes, los convierten en compuestos reactivos, liberando moléculas de cloro, bromo, etc. que actúan como agentes catalíticos en la destrucción del ozono.

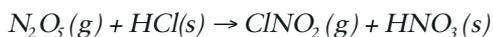
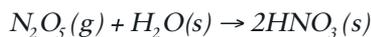
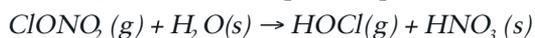
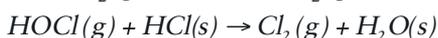
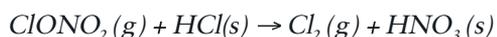
Las mediciones realizadas en la Antártida concuerdan muy bien con la teoría de la química heterogénea, considerándose que ésta sería la teoría que mejor describe el fenómeno.

Nubes estratosféricas polares

Las nubes estratosféricas polares se forman bajo condiciones extremadamente frías y secas, como las que se encuentran en las regiones de la noche polar estratosférica, ya que la temperatura máxima a la cual pueden formarse oscila entre los -78°C y -85°C, según el tipo de nubes. En el hemisferio sur, estas temperaturas se mantienen durante dos meses y medio, aproximadamente. Como en el hemisferio norte la temperatura en el ártico es mayor, existe una menor cantidad de dichas nubes y su duración es sólo de algunos días.

Las mediciones realizadas desde aviones y satélites muestran que están compuestas por ácido nítrico, vapor de agua y ácido sulfúrico. Estas nubes sedimentan lentamente y, al hacerlo, transportan el nitrógeno reactivo y el agua, que se encuentra sobre las partículas, fuera de la baja estratosfera. A estos procesos se los conoce como desnitrificación y deshidratación. Debido a esta pérdida de nitrógeno, no se encuentra el NO₂ necesario para reaccionar con el ClO de manera de formar un reservorio de ClONO₂, más estable. Por ello la desnitrificación conduce a un alto nivel de cloro activo que puede continuar destruyendo el ozono.

Las principales reacciones heterogéneas son las siguientes:



Evolución del agujero de ozono.

Entre los meses de marzo a diciembre, en la región de estratosfera que se encuentra rodeando a la Antártida se generan unos vientos muy fuertes conocidos como corriente de chorro de la noche polar antártica o vórtice polar antártico. Estos vientos aíslan la región de la estratosfera que encierran, impidiendo que el aire que se encuentra en su interior pueda abandonarla, y que el aire que se encuentra en su exterior pueda ingresar, que es aire cálido y rico en ozono que proviene de la zona ecuato-

rial. Gran parte de la Antártida, en este período del año, se encuentra a oscuras: es la denominada noche polar, lo que hace que allí las temperaturas sean muy bajas, no sólo por no recibir la radiación solar, sino además por no ingresar el aire cálido.

Estas temperaturas extremadamente frías permiten la formación de las nubes estratosféricas polares. Los compuestos clorados inactivos presentes en su superficie, mediante reacciones de química heterogénea, se transforman en otros químicamente activos. Hacia la mitad del invierno, la mayor parte del cloro que se encuentra dentro del vórtice de la baja estratosfera se presenta como cloro molecular.

Cuando los primeros rayos solares inciden sobre la estratosfera antártica, a comienzos de primavera, marca el fin de las bajas temperaturas, desaparecen las nubes estratosféricas polares y, al mismo tiempo, se fotoliza el HOCl, y se liberan átomos de cloro activo, que actúan como catalizadores en el proceso de destrucción del ozono: en un período de un mes, la concentración decrece aproximadamente en un 70%. Debido a que esta zona queda aislada mientras exista el vórtice polar, el ozono generado en los trópicos se acumula en el exterior del vórtice. Por su apariencia en las imágenes satelitales, esta alta concentración de ozono fuera del vórtice polar es conocida como “collar de ozono”.

Las menores concentraciones de ozono y el mayor área del “agujero” suceden durante los primeros días de octubre. A partir de ahí aumenta la radiación UV y comienza a generarse ozono, pero en cantidades que no son suficientes para contrarrestar su rápida disminución.

Cuando la temperatura es lo suficientemente alta, a mediados de diciembre, se rompe el vórtice polar y el aire rico en ozono penetra en la zona que estaba aislada, saliendo el aire pobre en ozono hacia las regiones de las latitudes medias. La concentración de ozono sobre la Antártida aumenta, reestableciéndose los valores normales durante el verano.

Una manera de indicar la severidad de la disminución en la concentración de ozono es midiendo su espesor mínimo de columna total y el área total que ocupa el “agujero”. Se defi-

ne como “agujero de ozono” a la región donde el espesor de columna total de ozono es inferior a 220 UD, el área total ha llegado en los últimos años a superar los 30 millones de kilómetros cuadrados, que es la superficie de América del Norte. En la última década se han medido espesores de ozono tan bajos como 80 UD, en lugares donde los valores normales oscilan entre 350 y 400 UD.

¿Existe un “agujero de ozono” en el Ártico?

Se realizaron campañas de medición para estudiar la posibilidad de que se produjera un “agujero de ozono” en el Ártico. Hasta 1994 se encontró una pequeña pérdida de ozono, si se la compara con la Antártida. Se midieron altas concentraciones de ClO dentro del vórtice ártico, por lo cual se pensó que, si se daban las condiciones, podría llegar a descender bruscamente la concentración de ozono, pero no se observa un proceso de deterioro tan intenso como en la Antártida.

Las diferencias observadas entre el Ártico y la Antártida se deben al clima de las regiones estratosféricas y están directamente relacionadas con las variaciones en los patrones de circulación de vientos en cada polo. En el hemisferio sur, dado que la Antártida está rodeada por océanos, el vórtice polar adopta una forma aproximadamente circular (este-oeste, debido a la rotación de la tierra). En el hemisferio norte, por el contrario, el Ártico se localiza en zonas continentales, además existen grandes cadenas montañosas en América del Norte y en Eurasia que poseen direcciones norte-sur, desviando los vientos del vórtice polar ártico. Debido a que el vórtice no es estático, sino que varía su forma permanentemente, los vientos provenientes de los trópicos, transportando el aire cálido y rico en ozono, pueden alcanzar regiones de altas latitudes.

Esta diferencia en los patrones de viento trae como consecuencia temperaturas más altas en el Ártico, que impiden la formación de las nubes estratosféricas polares, con lo cual existe una menor posibilidad de que ocurra el proceso químico heterogéneo. El que las

temperaturas sean más altas también trae como consecuencia que el vórtice se rompa al principio de la primavera ártica, y el cloro molecular sea liberado.

Efectos biológicos debidos a la disminución del ozono estratosférico.

En las regiones polares, el sol se mantiene a poca altura sobre el horizonte, los rayos solares están muy inclinados lo que hace que, al atravesar la región donde se encuentra la mayor concentración de ozono, recorran una distancia mayor que en el Ecuador, donde inciden en forma perpendicular a la superficie terrestre. De esta manera, en la regiones polares se aumenta la eficiencia de filtrado para un mismo espesor de ozono: una disminución de un 40 a 50 % en la concentración de ozono en la Antártida tiene como consecuencia un aumento en la radiación UVB⁶ incidente similar a la que ocurriría con una disminución de ozono menor a un 5 % para la primavera a 30° de latitud. Esto trae importantes consecuencias para los efectos biológicos producidos.

Como ya se mencionó en la introducción de este trabajo, los efectos biológicos de la radiación UV se derivan de su alta capacidad para ionizar moléculas y su gran poder de penetración en los organismos. En los seres humanos lo mínimo que ocasiona es eritema, que es el enrojecimiento de la piel. Debido a que el efecto de la radiación UV es acumulativo, si se realizan exposiciones prolongadas, puede ocasionar cáncer de piel, cataratas e inmunodeficiencias.

Los daños en la salud humana están bien estudiados, pero no sucede lo mismo con la biota no humana. Bioma y ecosistemas se han adaptado a una dosis UV que oscila dentro de un cierto rango, por lo tanto, cualquier cambio puede influir en su estabilidad, distribución geográfica y, posiblemente, su supervivencia.

En los ecosistemas marinos se han detectado impactos de la UVB en procesos microbiales, alteración en el crecimiento, la supervivencia y las actividades biogeoquímicas de microbios, plantas y animales marinos. Los

daños en el ADN influyen también en la orientación espacial, imprescindible para las migraciones. Hay alteraciones en el fitoplancton, el metabolismo del nitrógeno, la fotosíntesis, la mortalidad de las larvas, procesos virales y cambios en los huevos de los peces. Debido a que la intensidad de la radiación UV es más alta, puede alcanzar mayores profundidades en el mar, alterando biomas que eran inaccesibles.

En las plantas se han estudiado efectos inhibitorios de la fotosíntesis, de la superficie foliar y del alargamiento de los tallos, lo que incide en la competencia entre plantas vecinas. Las plantas reaccionan sintetizando y acumulando pigmentos fotoprotectores y reparando daños en el ADN, lo cual es efectivo hasta un determinado nivel de radiación incidente. En la agricultura, el daño se manifiesta en la disminución de la producción, de la fertilidad y de la calidad del producto, en la caída de semillas y de frutos y en cambios en la relación cultivo-maleza y en la mezcla de pasturas.

Acciones para contrarrestar la disminución del ozono estratosférico.

Cuando los políticos tomaron conciencia del impacto potencial de los CFC en la capa de ozono estratosférico, se reunieron en Viena en 1985, para tratar esta problemática. Si bien allí no se tomaron acciones formales, se estableció que se debería garantizar el financiamiento de investigaciones en dicha área y que, de ser necesario, se reunirían nuevamente para establecer políticas al respecto.

En 1987, veintisiete naciones firmaron el Protocolo de Montreal, comprometiéndose a reducir el empleo de los CFC en un 50 % para el año 1999. Al tener evidencias del daño producido en la capa de ozono, hubo una nueva reunión en Londres en 1990, donde 80 naciones se comprometieron a cesar completamente la producción de los CFC para el año 2000.

En 1992 hubo una nueva reunión en Copenhague, ante la gravedad de los hechos, en la cual se comprometieron a no permitir el uso de los CFC a partir de 1996 y a una reducción o al cese en el uso de los HCFC

(productos químicos menos destructivos que reemplazaron a los CFC) en el 2030.

La Enmienda de Montreal de 1997 ajustó los calendarios para eliminar el bromuro de metilo. La Enmienda de Beijing de 1999 incluyó el bromoclorometano para su eliminación inmediata ya que se trataba de una nueva sustancia que agota el ozono, que algunas empresas trataron de introducir en el mercado en 1998 a fin de impedir su utilización, e implantó medidas de control para la producción de los HCFC, así como para su comercio. Noventa y seis productos químicos están fiscalizados actualmente por el Protocolo de Montreal. Se continúa estudiando medidas para impedir la comercialización de nuevas sustancias que agotan el ozono y que hasta ahora no están incluidas en el Protocolo.

Investigaciones realizadas desde la Patagonia Austral

Las investigaciones que se realizan sobre ozono y UV incluyen: a) conocer la distribución espacial y temporal de la concentración de ozono estratosférico, b) la producción de modelos teóricos sobre su generación y destrucción, entre los que se incluyen los que tratan de explicar y predecir la evolución del “agujero de ozono”, c) los efectos producidos por el incremento de la radiación UV, tanto en los seres vivos como en los materiales, etc. Para realizar todas estas investigaciones, es esencial el monitoreo de la concentración de ozono, midiendo en distintos lugares del planeta, la evolución temporal de su concentración.

Para realizar el monitoreo, se utiliza instrumental colocado en tierra, en aviones, en globos aerostáticos y en el espacio. El conjunto de instrumentos colocados en cada uno de estos sitios se conoce como plataforma, cada una de ellas realiza mediciones que son únicas, que se complementan, para lograr un mejor entendimiento de la atmósfera terrestre.

Existen dos tipos de mediciones: in situ, que implica la obtención de muestras en el lugar para ser analizadas químicamente, y mediante sensores remotos, realizando mediciones indirectas y luego infiriendo los pará-

metros de interés. Por ejemplo, se calcula la cantidad de la columna total de ozono en función de la variación de la intensidad de la radiación UV que produce el mismo, en comparación con el que incide en el límite superior de la atmósfera. Una descripción más detallada de las distintas metodologías se encuentra en Misceláneas.

La Organización Meteorológica Mundial edita periódicamente informes sobre el estado de la concentración de ozono, en el que se sintetizan los resultados obtenidos por numerosos investigadores de todo el mundo, entre los que se incluyen científicos argentinos. El último informe es el Scientific Assessment Of Ozone Depletion: 2006, publicado en febrero del 2007, disponible en internet en la página http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/ozone_2006/ozone_asst_report.html.

Desde la década del '50 se realizan mediciones sistemáticas de perfiles de ozono y medición de columna total en las diversas bases antárticas, pero debido a que la Patagonia es la región continental más cercana a la Antártida, allí también se encuentran diversos grupos de investigación, dedicados especialmente al monitoreo de la concentración de ozono, los más significativos están Ushuaia (Argentina) y Punta Arenas (Chile).

Para aumentar el conocimiento relativo al “agujero de ozono” y comprender los mecanismos que lo generan, en la primavera del año 1987, con base en Punta Arenas, se realizó la “Campaña aerotransportada de ozono antártico” (Airborne Antarctic Ozone Campaign), coordinada por la NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio) y financiada por ésta y otras instituciones. Contó con la participación de científicos de universidades norteamericanas, argentinas y chilenas.

Se realizaron vuelos entre 12 y 18,7 km de altura en regiones en donde se encontraban el “agujero de ozono” y el vórtice polar. Los aviones estaban equipados para medir diversos parámetros atmosféricos y concentraciones de ozono y otros gases, los que luego se comparaban con mediciones realizadas desde tierra, globos sondas y satélites.

Los resultados obtenidos contribuyeron a

confirmar que la teoría de la química heterogénea es la que mejor explica el proceso de generación del “agujero de ozono” y que la región afectada por el mismo es la que se encuentra dentro del área delimitada por el vórtice polar. Para conocer en más detalle esta campaña, se puede visitar la página: <http://cloud1.arc.nasa.gov/aaoc/index.html>

Desde entonces se formaron grupos de investigación y de monitoreo de datos tanto en Ushuaia como en Punta Arenas. En Ushuaia se encuentra el Centro Austral de Investigaciones Científicas (CADIC), que depende del CONICET. En este centro, en 1988 se creó un grupo para medir radiación UV, a partir de la cual se puede inferir concentración total de columna de ozono. Las investigaciones se realizan por convenio con la Fundación Nacional de Ciencias de Estados Unidos (NSF), bajo la dirección de la Ing. Susana Díaz. Este laboratorio cuenta con un espectroradiómetro capaz de medir la radiación solar en forma espectral⁷, a partir del cual se infiere la concentración de ozono. Este equipo forma parte de la Red de monitoreo de la NSF, que originariamente estaba formada por tres estaciones en Antártida (Polo Sur, Mc Murdo y Palmer) y una en Ushuaia, todas ellas comenzaron sus actividades en 1988. Más tarde se agregó una en Alaska (1990) y otra en San Diego (1992). Debido a que estos instrumentos son calibrados anualmente con un mismo patrón, sus datos son consistentes, y por lo tanto pueden ser utilizados en estudios comparativos. El laboratorio de Ushuaia participa de otros convenios internacionales y varios proyectos de organismos nacionales e internacionales, entre los que figuran la investigación de los efectos de la radiación UV en plantas, marea roja, etc. En el Anexo 1 se observan mediciones máximas diarias históricas realizadas en Ushuaia comparadas con días despejados y nublados en Río de Janeiro, Buenos Aires y San Diego, que se encuentra en el hemisferio norte, aproximadamente a la misma latitud que Buenos Aires. En la curva correspondiente a Ushuaia se observa que los valores son más altos en los meses de septiembre y octubre que lo que debería ser, si se considera que la curva debería ser simétrica. Esto es debido a la disminución en la concen-

tración de ozono. Para obtener mayor información de este laboratorio se puede visitar la página: <http://www.cadic.gov.ar/2007webozono/inicio.html>

El programa Vigilancia Atmosférica Global (VAG) fue creado en 1989 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM), debido a la necesidad de vigilar e investigar el comportamiento de los gases con efectos de invernadero, el ozono atmosférico y otras variables ambientales que hacen a la física y química atmosférica. Desde septiembre de 1994, en el marco de un Convenio entre la Provincia de Tierra del Fuego y la Fuerza Aérea Argentina, Servicio Meteorológico Nacional, se encuentra en operaciones, en las cercanías de la ciudad de Ushuaia, una Estación Científica para la Vigilancia de la Atmósfera Global (VAG), que forma parte del Sistema Global de Observaciones de Ozono (GO3OS), la red BAP-MoN (Background Air Pollution Monitoring Network) y otras pequeñas redes.

El programa VAG provee de un marco para los standards, calibraciones, intercomparaciones y sistema de recolección y evaluación de los datos. Los programas de medición que involucra el proyecto VAG incluyen la determinación de a) gases de efecto invernadero: dióxido de carbono, clorofluorocarbonos, metano, óxido nitroso, ozono troposférico; b) ozono: superficial, columna total, perfiles verticales y gases precursores; c) radiación solar: incluyendo turbiedad, radiación solar en todas sus componentes, UV-B, distribución y cantidad de aerosoles, vapor agua y visibilidad; d) composición química de la precipitación, gases reactivos como el dióxido de sulfuro, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, concentración y características de la composición de los aerosoles, radionucleidos, incluyendo kriptón-85, radón, tritio y la composición isotópica de determinadas sustancias. Si bien la estación de Ushuaia está categorizada como de alcance global, de las que existen pocas en el mundo, en Argentina se encuentran otras estaciones que pertenecen a esta red, categorizadas como regionales en: La Quiaca (Jujuy); Pilar (Córdoba); Villa Ortúzar (Buenos Aires); Comodoro Rivadavia (Chubut); San Julián (Santa Cruz) y Marambio

(Península Antártica). Para obtener mayor información de esta red se puede visitar la página: <http://www.tierradelfuego.org.ar/vag/indexespa.htm#medicion>

En las ciudades chilenas de Punta Arenas, Puerto Williams y Puerto Natales, existe una red que depende de la Universidad de Magallanes, bajo la dirección del Dr. Claudio Cassiccia, cuya principal tarea es el monitoreo y toma de datos de ozono y radiación ultravioleta, para lo que cuenta con diversos equipos, entre ellos, un espectrómetro Brewer Modelo MK I, los primeros equipos se instalaron en Punta Arenas en 1988. Estos laboratorios proporcionan diariamente a la comunidad la intensidad de radiación UV, bajo la forma de “solmáforos”: si en el solmáforo está brillando la luz verde, el nivel de radiación es bajo, si brilla la roja, se deben extremar las medidas de protección. Este solmáforo está difundido como parte del pronóstico meteorológico, tanto en periódicos, como en radio y televisión, y está generalizado el hábito de su consulta diaria en la comunidad. Para obtener mayor información de estos laboratorios se puede visitar la página: <http://www.umag.cl/investigacion/ozono.php>

Desde 2005 se encuentra en la ciudad de Río Gallegos una estación de relevamiento de parámetros atmosféricos dependiente de la División LIDAR del Centro de Investigaciones de las Fuerzas Armadas (CITEFA) por un convenio con la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA), la Universidad de Magallanes (Chile) y la Universidad Nacional de la Patagonia Austral (UNPA). El proyecto, que se encuentra bajo la dirección del Dr. Eduardo Quel, se dedica a realizar diferentes monitoreos, entre ellos, medir perfiles de Ozono estratosférico, utilizando la técnica DIAL⁸ para monitorear el cruce del vórtice antártico sobre esta ciudad, obtener perfiles de retrodispersión de aerosoles y sus propiedades ópticas, medir el contenido de vapor de agua en la atmósfera patagónica y obtener mediciones de radiación en superficie.

Cuenta con un equipo LIDAR, del que en América del Sur sólo existe un equipo similar en Buenos Aires, perteneciente al mismo Laboratorio. En el Anexo 2 se observan dos

perfiles de ozono sobre Río Gallegos obtenidos por la técnica LIDAR, para un día con concentración normal de ozono 325-350 UD (12 de septiembre de 2006) y un día bajo el “agujero de ozono” con una concentración de ozono entre 200 y 225 UD (9 de octubre de 2005). Se adjuntan las imágenes satelitales OMI de falso color centradas en el Polo Sur, para dichos días, que indican la concentración de ozono en el hemisferio sur. Para obtener mayor información de este laboratorio se puede visitar la página: <http://www.division-lidar.com.ar/>

La Universidad Nacional de la Patagonia Austral ha desarrollado proyectos en el área, en Río Gallegos, a través de un convenio con el CADIC, entre los que se encuentran el diseño de un sistema de lámparas para simular el espectro solar bajo diferentes espesores de ozono, para emplear en el estudio de la influencia del aumento de radiación UV en plantas en laboratorio, el monitoreo de la concentración de aerosoles atmosféricos y, junto con investigadores de San Julián, el relevamiento de la concentración de ozono y de la energía eritémica sobre la provincia de Santa Cruz, a partir de datos obtenidos por el TOMS, para el período 1978-2006, bajo la dirección de la autora de este artículo. En el Anexo 3 se muestran histogramas de frecuencias anuales de espesores de ozono para cuatro localidades de la provincia de Santa Cruz. Se observa que las zonas sur y central de la provincia se encuentran más afectadas por la disminución en la concentración de ozono. Asimismo existe un aumento en la frecuencia de días con espesores de ozono inferiores al normal.

Además de las investigaciones realizadas por estos grupos estables, se han llevado a cabo diversas campañas de medición de ozono y gases y de radiación UV in situ, en el vórtice polar y en las regiones interiores y cercanas al “agujero de ozono”, empleando aviones y equipamiento desde tierra. Por ejemplo, la campaña italiana APE-GAIA, con base en Ushuaia, se llevó a cabo en la primavera de 1999, empleando un avión M55-Geophysica, que alcanzó la periferia del vórtice, exploró sus bordes y penetró en su interior, volando a 20 km de altura y ocasionalmente se efectua-

ron picadas hacia la troposfera para favorecer mediciones “in situ”. Contemporáneamente a los vuelos del Geophysica se llevaron a cabo una serie de mediciones en tierra y en globos, desde Ushuaia, Punta Arenas y varias Bases situadas en la región de la Península Antártica, a fin de convalidar las mediciones efectuadas durante la campaña. Para conocer en más detalle esta campaña, se puede visitar la página: <http://ape.ifac.cnr.it/ape-gaia/index.htm>

Reflexiones finales

El estudio del “agujero de ozono” es un claro ejemplo de cómo las observaciones, el

trabajo en el laboratorio y la teoría pueden interactuar para determinar las causas de un fenómeno. En la actualidad, las condiciones para su formación están bastante bien comprendidas.

La protección del ozono estratosférico se ha convertido en un importante reto en los últimos 30 años que afecta a las esferas científicas, políticas, industriales, comerciales, educativas y al desarrollo sustentable. Gracias a la concientización de la población y al trabajo mancomunado de científicos, industriales y políticos se ha logrado limitar y sustituir las sustancias destructoras del ozono a largo plazo, esperando que sus resultados sean observables hacia mediados de este siglo.

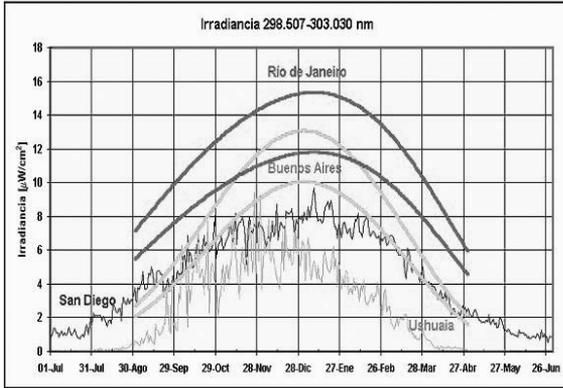
Notas

- 1 La estratosfera es la capa de la atmósfera que se encuentra entre los 12 y los 50 km de altura, se divide en la baja estratosfera (12 a 30 km de altura) y la alta estratosfera (30 a 50 km de altura). A la capa atmosférica que se encuentra entre la superficie terrestre y los 12 km de altura se la denomina troposfera.
- 2 La expresión hc/λ representa la energía de la radiación incidente. Esta energía es mayor cuanto menor sea la longitud de onda de la radiación incidente.
- 3 Un catalizador es una sustancia que facilita la reacción química, pero que no cambia durante el proceso o se vuelve a formar al finalizar el mismo.
- 4 Los aerosoles son partículas (sólidas o líquidas) suspendidas en la atmósfera, cuyos radios se encuentran entre 0,1 y 1 micrones.
- 5 Las reacciones químicas heterogéneas son aquellas que se producen cuando hay dos fases y tienen lugar sólo sobre superficies de partículas.
- 6 La radiación ultravioleta se clasifica en tres rangos de longitud de onda: la UVA posee longitudes de onda entre los 315 y 400 nm, es la que transporta menos energía y es la que es la menos absorbida por el ozono estratosférico, la UVB posee longitudes de onda entre los 280 y los 315 nm, transporta mayor energía, siendo absorbida en parte por el ozono estratosférico, es la que aumenta en mayor proporción debido a la disminución en la concentración del ozono estratosférico. La UVC posee longitudes de onda entre los 100 y 280 nm, es la más energética, siendo absorbida totalmente por el ozono. Hasta el momento no ha incidido sobre la superficie terrestre.
- 7 Grafica la irradiancia, que es la intensidad de la radiación solar incidente en función de la longitud de onda.
- 8 La técnica DIAL requiere de la emisión de dos pulsos láser a diferentes longitudes de onda, una que absorbe el ozono y la otra que actúa como referente. El láser se apunta a la atmósfera. Los fotones retrodispersados por las moléculas en la atmósfera son recolectados por cuatro telescopios newtonianos y esta información es transportada hasta un espectrómetro por cuatro fibras ópticas. Allí las señales son procesadas, obteniéndose los perfiles de concentración de ozono en la estratosfera. (ver Misceláneas para conocer el equipo en mayor detalle).

ANEXO 1: Comparación de irradiancias correspondientes a ciudades de distintas latitudes

En el gráfico correspondiente a Ushuaia se observa en los meses de septiembre y octubre valores más altos a lo que correspondería, si se considerara simétrica a la curva. Este incremento se debe a la disminución en el valor de la columna total de ozono debido al paso del “agujero de ozono” sobre la ciudad.

Fuente: <http://lwebs.advance.com.ar/ozonocadic/index2.htm>



REFERENCIAS

- Río de Janeiro, valores a mediodía, modelados con ozono normal (1979-1982). Línea inferior valores a cielo totalmente descubierto. Línea superior valores con cielo entrecortado por nubes.
- Buenos Aires, valores a mediodía, modelados con ozono normal (1979-1982). Línea inferior valores a cielo totalmente descubierto. Línea superior valores con cielo entrecortado por nubes.
- San Diego, EE.UU., Máximo diario histórico 1992-1997. Medido por BSI, como parte de la Red de Monitoreo de UV de la National Science Foundation (EE.UU). San Diego es una ciudad del Hemisferio Norte con características similares a Buenos Aires en cuanto de los niveles de radiación. Los valores están desfasados 6 meses para hacer coincidir veranos a invierno con Ushuaia.
- Ushuaia, Argentina, Máximo Diario histórico 1990-1997. Medido por el Laboratorio de UV y Ozono, CADIC, como parte de la Red de Monitoreo de UV de la National Science Foundation (EE.UU.), por convenio NSF-CONICET.

ANEXO 2: Perfiles de ozono sobre la ciudad de Río Gallegos

Se muestran dos perfiles de ozono sobre Río Gallegos obtenidos por la técnica LIDAR, para un día con concentración normal de ozono 325-350 UD (12 de septiembre de 2006 – Figura 2a) y un día bajo el “agujero de ozono” con una concentración entre 200 y 225 UD (9 de octubre de 2005 – Figura 2b) Se observa que los valores máximos en la figura 2a supera las 5×10^{12} moléculas/cm³, mientras que en la 2b no llega a las 4×10^{12} moléculas/cm³. Se adjuntan las imágenes satelitales de falso color obtenidas por el TOMS en ambas fechas, donde se observa la ubicación del “agujero de ozono”. Fuente: Campaña SOLAR, <http://www.division-lidar.com.ar/>

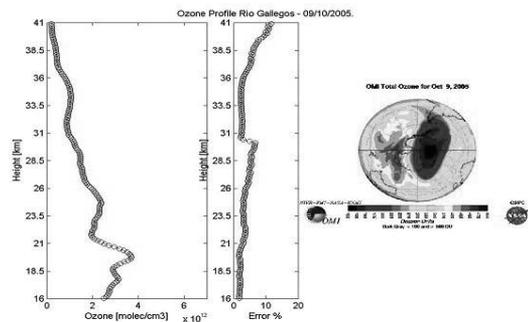
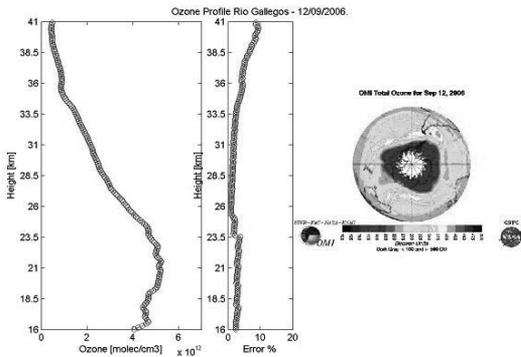
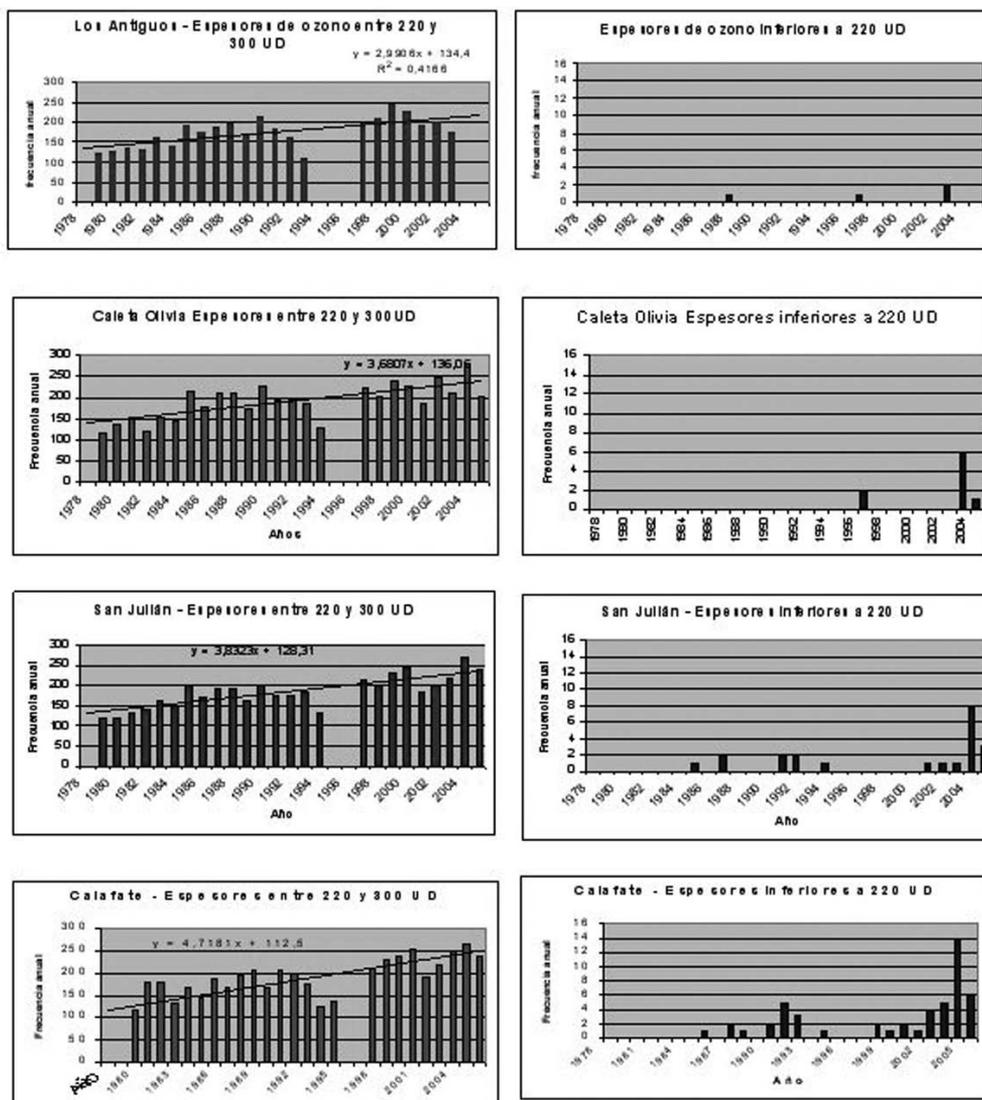


Figura 2 a: Perfil de ozono correspondiente a una concentración normal de ozono

Figura 2b: Perfil de ozono correspondiente a un día en el que la ciudad se encontraba bajo el “agujero de ozono”

ANEXO 3: Relevamiento del espesor de la columna total de ozono para distintas ciudades de la Provincia de Santa Cruz

En los gráficos se muestran la frecuencia diaria anual de espesores inferiores a lo normal para latitudes medias, pero no tan bajos como para ser considerados “agujero de ozono” (225 a 300 UD) y de espesores considerados como “agujero de ozono” (inferiores a 225 UD). (González, J., Encinas, J. C., Arenas G., Milicic B., Relevamiento del espesor de ozono estratosférico en la provincia de Santa Cruz a partir de imágenes satelitales, AVERMA, Vol 19, 2006, ISSN: 0329-5184, pp.11,63-11,69)



Las localidades de Caleta Olivia y Los Antiguos se encuentran en la zona norte de la provincia de Santa Cruz, cerca del límite con Chubut, mientras que Calafate y San Julián, en la zona central. Se observa que las zonas sur y central de la provincia se encuentran más afectadas por la disminución en la concentración de ozono y el aumento en la frecuencia de días con espesores de ozono inferiores al normal para estas latitudes.

Referencias

- APE GAIA (1999). *Campaña antártica 1999*. <http://ape.ifac.cnr.it/ape-gaia/index.htm>, visitado 24/11/2007
- CEILAP (2005). División LIDAR. <http://www.division-lidar.com.ar/>, visitado 24/11/2007.
- CONICET-CADIC (2007) *Laboratorio de UV y ozono*.
<http://www.cadic.gov.ar/2007web/ozono/inicio.html>, , visitado 24/11/2007
- Estación Vigilancia Atmosférica Global de Ushuaia (2007).
<http://www.tierradelfuego.org.ar/vag/indexespa.htm#medicion>, visitado 24/11/2007
- Organización Mundial de la Salud (2006), *Las directrices sobre la calidad del aire en la protección de la salud pública: actualización mundial*, Nota descriptiva N°313 Octubre de 2006, disponible en <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/index.html>, visitado el 20/12/2007
- Todaro RM (Ed) (2000) *Stratospheric Ozone. An Electronic Textbook*.
http://www.ccpo.odu.edu/SEES/ozone/oz_class.htm , visitado 24/11/2007
- UMAG (2004) *Laboratorio de ozono*. <http://www.umag.cl/investigacion/ozono.php>, visitado 24/11/2007