

Monitoreo de perfiles de ozono estratosféricos con técnica DIAL en Río Gallegos

Stratospheric ozone profiles monitoring with DIAL technique in Río Gallegos

**E.A Wolfram^{1*}, J. Salvador², J. Pallotta³, D'Elia R.¹, A. Pazmiño⁴
Godin-Beeckmann S.⁴, Quel E¹**

1. CEILAP(CITEFA-CONICET), Villa Martelli, Argentina

2. BECARIO UNSAM, ESCUELA DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

3. BECARIO AUGER

4. SERVICE D'AERONOMIE (IPSL), PARIS, FRANCE

El adelgazamiento de la capa de ozono sobre el polo sur de nuestro planeta es un fenómeno estacional que desde la década de los '80 se desarrolla cada año durante la primavera. El mismo tiene su máxima expresión sobre la región Antártica, en donde el área de la región con adelgazamiento ha llegado a tener 30 millones de kilómetros cuadrados aproximadamente, alcanzando así en sus bordes la parte sur de nuestro país. Durante la primavera austral de 2005, en la ciudad de Río Gallegos, se desarrolló la primera campaña de mediciones intensivas de parámetros atmosféricos denominada SOLAR (Stratospheric Ozone Lidar of Argentina) realizada por la División Lidar del CEILAP. En la misma se midieron perfiles de ozono utilizando la técnica lidar de absorción diferencial (DIAL), pudiéndose registrar un total de 29 mediciones durante el periodo agosto – noviembre de 2005, cinco de ellas coincidentes con reducción significativa del contenido total de ozono. En el presente trabajo, se presenta un análisis cualitativo de las mismas que permite visualizar las zonas de la estratosfera que más fueron afectadas por el paso del vórtice polar. La utilización de un sistema de coordenadas cuasi-conservativo (latitud equivalente, nivel isentrópico) permitió realizar la selección de los días dentro de esta campaña de medición que estuvieron afectados por el paso del vórtice polar Antártico que contiene al agujero de ozono.

Palabras Clave: lidar, perfiles de ozono, agujero de ozono, sensado remoto

The thinning of the ozone layer over the South Pole of our planet is a seasonal phenomenon that from the decade of the 80's is developed every year during spring time. The same one has its Maxima expression on the Antarctica region, in where the area of the region with ozone depletion has gotten to have 30 million of square kilometers approximately, thus reaching in its edges the South part of our country. During the austral spring of 2005, in the Río Gallegos city, the first campaign of intensive measurements of atmospheric parameters was developed. The same is named SOLAR (Stratospheric Ozone Lidar of Argentina) and is held by the Lidar Division of the CEILAP. We measured ozone profiles using the differential absorption lidar technique (DIAL), being able to register a total of 29 measurements during the period August - November of 2005, five of them coincident with significant reduction of the total ozone content. In the present work, a qualitative analysis of the same ones appears that allows to visualize the zones of the stratosphere which they were more affected by the passage of the polar vortex. The use of a quasi-conservative system of coordinates (equivalent latitude, isentropic level) allowed to make the selection of the days within this campaign of measurement that were affected by the passage of the Antarctic polar vortex that contains to the ozone hole.

Keyword: lidar, ozone profiles, ozone hole, remote sensing;

I. INTRODUCCIÓN

El estudio del ozono estratosférico ha sido el objeto de una atención particular desde el descubrimiento del agujero de ozono antártico a principios de los años 1980¹. El vínculo directo causa-efecto entre los componentes clorados de origen antropogénico (CFC) y la destrucción del ozono ha sido demostrado experimentalmente desde 1987 cuando se realizó una campaña de mediciones aéreas organizada por la NASA². Actualmente, es científicamente admitido que la destrucción masiva de ozono durante la primavera en la Antártida está relacionada a las condiciones meteorológicas particularmente frías de la estratosfera polar en invierno y al aumento de los constituyentes halogenados (clorados y bromados) bajo el efecto de

las actividades humanas. El importante enfriamiento de la estratosfera en invierno conlleva a la formación de nubes estratosféricas polares. Las reacciones químicas se producen en la superficie de estas nubes transformando la mayor parte de los componentes halogenados en componentes activos susceptibles de destruir el ozono por los ciclos catalíticos muy rápidos desde la reaparición del sol por encima del polo. En la Antártida, estos procesos químicos conducen a una disminución de alrededor del 60 % del contenido integral de ozono en el mes de octubre, con una desaparición casi completa entre 12 y 20 km. La superficie ocupada por el agujero de ozono antártico ha aumentado regularmente en los años 1990, llegando a 29,7 106 km² en el 2000. Por otra parte, las mediciones satelitales han mostrado que

* Elian Wolfram. CEILAP, ewolfram@citefa.gov.ar

durante la primavera polar, la acción de las ondas planetarias desplazan el agujero de ozono hacia las regiones pobladas del hemisferio sur (América del Sur, Nueva Zelanda) aumentando puntualmente la radiación solar UV durante estos episodios en estas regiones.

Con el objetivo de contribuir a los esfuerzos internacionales por seguir de cerca la evolución de este fenómeno, se han desarrollado en el CEILAP sistemas de sensado remoto activo utilizando como emisores a distintas fuentes de radiación láser. Uno de ellos es un instrumento capaz de medir perfiles de la concentración de ozono en la estratosfera. Este sistema utiliza la técnica Lidar (LIght Detection and Ranging)³ de absorción diferencial que consiste en enviar pulsos de radiación láser a la atmósfera y detectar la radiación retrodispersada por las distintas moléculas, en especial por las moléculas de ozono en la estratosfera.

En el año 2004, el CEILAP programó la campaña SOLAR (Stratospheric Ozone Lidar of Argentina) con el objetivo de medir parámetros atmosféricos en la ciudad patagónica de Río Gallegos⁴. En el presente trabajo se presentarán algunos de los primeros resultados de esta experiencia de campo relacionada a la medición de perfiles de ozono con técnica lidar.

II. DESCRIPCIÓN DEL SITIO EXPERIMENTAL

El 10 de junio de 2005 se trasladó a la ciudad de Río Gallegos desde la sede del CEILAP en Villa Martelli, un contenedor-laboratorio con una serie de instrumentos de sensado remoto que permiten medir distintos parámetros atmosféricos. Un corte transversal del mismo puede verse en la figura 1. Esta ciudad patagónica se encuentra ubicada a la latitud 51° 36' S y una longitud de 69° 19' O, posicionándola dentro de la región sub-polar en

donde el efecto estacional del agujero de ozono tiene influencia en el contenido total de ozono sobre esta ciudad.

Los principales objetivos de esta campaña son: 1) Medir perfiles de ozono estratosféricos utilizando un sistema lidar de absorción diferencial (DIAL) y analizar el paso de vórtice polar antártico sobre el sur de la Patagonia, 2) Medir perfiles troposféricos de aerosoles, usando un sistema lidar de retrodifusión multilongitud de onda, 3) Medir perfiles troposféricos de vapor de agua usando un lidar Raman, 4) Obtener mediciones de radiación UV en superficie con diferentes radiómetros. Todos estos instrumentos están instalados dentro de un laboratorio móvil que se desarrolló en el CEILAP y que en estos momentos está ubicado dentro de la Base Aérea Militar de Río Gallegos.

Uno de los instrumentos más completos que alberga este laboratorio es un lidar de absorción diferencial capaz de medir concentraciones de ozono estratosféricos entre 15 y 45 km de altura aproximadamente. Este instrumento fue desarrollado dentro por la División Lidar del CEILAP, y descripciones detalladas del mismo pueden encontrarse en las referencias 5 y 6. La técnica DIAL requiere de la emisión de dos pulsos láser a diferentes longitudes de onda. La radiación absorbida por el ozono es emitida por un láser de excímero de XeCl en 308 nm y la longitud de onda de referencia en emitida por un láser sólido de Nd-YAG en 355 nm (tercera armónica).

Los fotones retrodispersados por las moléculas en la atmósfera son recolectados por cuatro telescopios newtonianos de 50 cm de diámetro cada uno y esta información es transportada hasta un espectrómetro por cuatro fibras ópticas. Allí son separadas las distintas longitudes de onda necesarias para la inversión de la señal y poder obtener los perfiles de concentración de ozono en la estratosfera.



Figura 1. Corte transversal del contenedor-laboratorio ubicado en Río Gallegos y que alberga los distintos lidars y radiómetros.

El sistema DIAL es un instrumento poderoso para el monitoreo de perfiles de ozono en la estratosfera⁷. Es una técnica autocalibrada ya que en los cálculos de inversión de las señales no intervienen constantes instrumentales.

III. MÉTODO DE CLASIFICACIÓN

Los trazadores dinámicos consisten de variables de campos cuasi-conservativos derivadas de análisis meteorológicos convencionales. Dos de estos trazadores son la temperatura potencial y la vorticidad potencial.

La vorticidad potencial (PV) es una cantidad dinámica derivada del vector de vorticidad que es una medida local de la rotación de un fluido. Esta variable es materialmente conservada en movimientos atmosféricos adiabáticos y sin fricción.

La conservación de la PV es la generalización en dinámica de fluidos de la conservación del momento angular en la mecánica newtoniana. Para flujos adiabáticos, una buena aproximación para escalas temporales de varias semanas en la estratosfera baja, los contornos de vorticidad potencial se vuelven como líneas materiales y permiten el trazado del movimiento de los fluidos.

El vórtice polar en invierno está asociado con fuertes gradientes de vorticidad potencial; el aire dentro del vórtice (a latitudes polares) tiene valores de PV mucho más grandes que el aire fuera del vórtice, significando masas de aires distintas. La región de mayor gradiente está asociada con el borde del vórtice polar y está cerca del lugar donde ocurren los vientos zonales máximos. El borde del vórtice

puede ser objetivamente definido con la localización del máximo gradiente de PV⁸.

Las posición del sitio experimental en la ciudad de Río Gallegos fue clasificada con respecto al vórtice polar utilizando un sistema de coordenadas cuasi-conservativo (latitud equivalente-nivel isentrópico). La latitud equivalente es una variable modificada de la PV, definida como la latitud que encierra la misma área que el contorno de PV correspondiente⁹. Los datos meteorológicos utilizados para calcular la latitud equivalente y la temperatura potencial fueron extraídos de los análisis del ECMWF (European Centre for Medium-Range Forecast) con una resolución de 2,5° x 2,5°.

En el presente trabajo se ha calculado la latitud equivalente para la ciudad de Río Gallegos en 4 niveles isentrópicos (475, 550, 650 y 850K). En la figura 2 se ha graficado el vórtice polar (línea negra) con el borde interno y el externo (área sombreada). Los círculos representan los días de medición lidar. De esta forma es posible clasificar a diferentes alturas la posición relativa de la ciudad de Río Gallegos con respecto al agujero de ozono que está contenido por el vórtice polar.

La tabla 1 muestra un resumen de la clasificación de las mediciones con respecto al vórtice polar antártico para los 4 niveles isentrópicos mencionados. De la misma se desprende que la mayoría de las mediciones se realizaron fuera del agujero dentro la estratosfera baja (19 km aprox.). El borde al agujero tuvo su máxima influencia en el nivel isentrópico de 650 K (26 km aprox.), mientras que las capas más allá de los 30 km fueron las que quedaron con mayor frecuencia dentro del vórtice polar, comprobando la forma cónica ascendente del mismo.

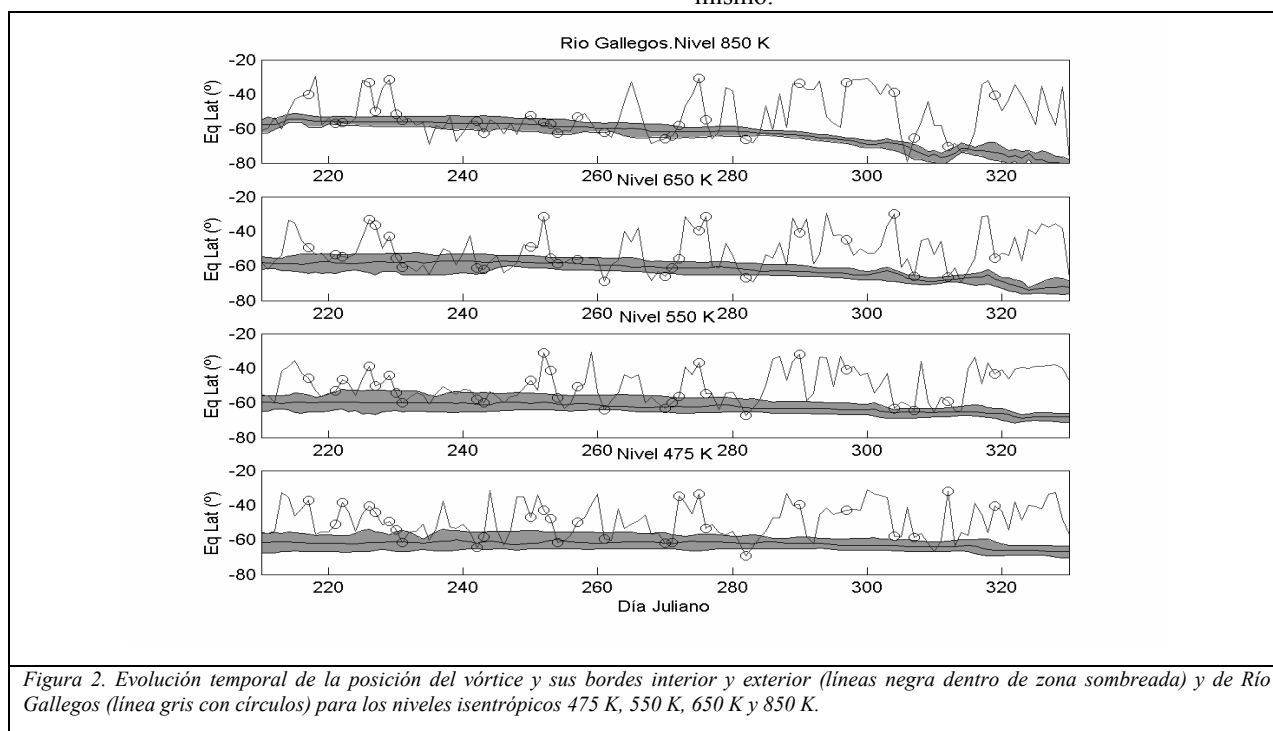


Figura 2. Evolución temporal de la posición del vórtice y sus bordes interior y exterior (líneas negra dentro de zona sombreada) y de Río Gallegos (línea gris con círculos) para los niveles isentrópicos 475 K, 550 K, 650 K y 850 K.

Tabla 1.

Nivel Isentrópico	Altura media (km)	Nro. de mediciones		
		Fuera	Borde	Adentro
850 K	31	17	8	4
650 K	26	14	12	3
550 K	22,5	19	8	2
475 K	19	21	7	1

Clasificación de las mediciones con respecto a la posición del vórtice Polar Antártico (sobre un total de 29 mediciones)

IV. MEDICIONES DIAL DE OZONO

La campaña SOLAR tiene programados dos periodos intensivos de mediciones de perfiles de ozono estratosféricos coincidentes con el desarrollo del agujero de ozono entre los meses de agosto a noviembre de 2005 y 2006.

En el presente trabajo se presentaran los resultados de las mediciones de la densidad numérica de ozono medidas con lidar correspondientes al primer periodo intensivo de mediciones entre agosto-noviembre de 2005. Durante este periodo se realizaron un total de 29 mediciones de la concentración de ozono, cada una de ella con una duración promedio de 4 horas de medición y unos 400.000 disparos láser por medición.

En la figura 3 se presenta una distribución de las mediciones lidar a lo largo de este periodo conjuntamente con la evolución del contenido total de ozono medido por el espectrofotómetro Brewer perteneciente al Laboratorio de Ozono y RUV de la Universidad de Magallanes, en Punta Arenas Chile, distante 200 km de la ciudad de Río Gallegos.

La columna total de ozono durante este período sufrió variaciones de más de 150 DU, con un valor medio de 340 DU y un valor mínimo de 170 DU el día 8 de octubre de 2005. Durante el mes de agosto se midieron 10 perfiles lidar, 9 en septiembre y otros 10 entre el periodo octubre – noviembre, meses en los cuales el incremento de la cobertura nubosa de las noche sobre Río Gallegos hizo disminuir las posibilidades de medir con lidar.

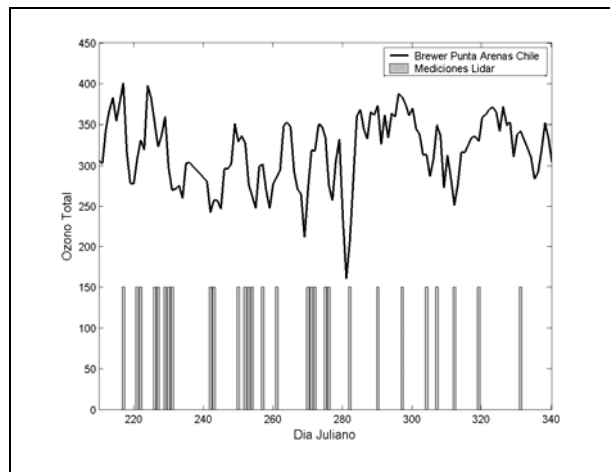


Figura 3. Estadística de mediciones lidar en función del día juliano (1 de agosto = 213). Barras verticales corresponden a una medición lidar. Evolución del ozono total medido por el espectrofotómetro Brewer en Punta Arenas.

Si bien el valor aceptado internacionalmente como límite superior de la columna total de ozono debajo del cual se considera condición de agujero es 220 DU, en este trabajo consideraremos como valores bajos a todos los valores de la columna total de ozono menor o iguales que 250 DU, debido a que el valor medio para los meses de septiembre y octubre en condiciones fuera del agujero sobre Río Gallegos es de 340 DU.

En el periodo comprendido entre el 1 de agosto al 30 de noviembre de 2005, se registraron ocho días con valores menores a 250 DU, dos de los cuales fueron menores que 220 DU, es decir condición de agujero de ozono.

Durante este periodo se midieron un total de 29 perfiles de ozono, 5 de ellos coincidentes con días de reducción de ozono. En la Figura 4 es posible observar el conjunto de los 10 perfiles lidar medidos para los meses de octubre-noviembre, conjuntamente con las diferencias relativas con el perfil lidar medio obtenido de este conjunto de mediciones. Durante los meses de octubre y noviembre de 2005 se midieron perfiles tanto dentro del agujero como fuera de él, permitiendo evaluar las zonas de destrucción de ozono para esta latitud por efecto del paso del vórtice polar.

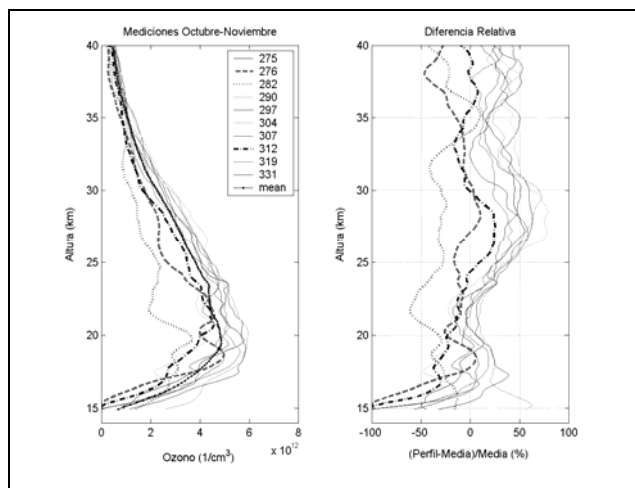


Figura 4. Perfiles lidar medidos en Río Gallegos durante los meses de octubre – noviembre de 2005. Perfil medio de este conjunto de mediciones (círculos). Perfil climatológico del satélite SAGE II (rombos). Diferencias relativas entre el perfil medio y las distintas mediciones.

En el mes de octubre, las condiciones meteorológicas permitieron medir seis perfiles lidar, dos de los cuales (3 y 9 de octubre, día juliano 276 y 282 resp.) mostraron reducciones del contenido de ozono. El día 3 de octubre el vórtice polar se ubicó sobre Río Gallegos afectando a las capas más altas de la estratosfera, como puede observarse de la evolución de la latitud equivalente para este día ($d_j=276$) (Fig.2). El perfil lidar medido para este día muestra un depresión de la densidad numérica de ozono entre los 24 y los 35 km, con una reducción promedio de alrededor del 25% con respecto al perfil medio alrededor de los 30 km de altura.

El día 9 de octubre, el vórtice polar cruzo sobre Río Gallegos produciendo que todos los niveles más allá de los 15 km de altura, quedaran dentro del agujero de ozono (Fig. 2). El perfil lidar de este día muestra reducciones de hasta 50 % con respecto al perfil lidar medio de este mes entre los 22 km y los 32 km de altura, y una disminución promedio de alrededor de 25 % entre los 18 y los 20 km.

Con la finalidad de evaluar las zonas de la estratosfera que más sufrieron la influencia del paso del vórtice polar sobre este sitio de medición para los meses de octubre y noviembre, se comparó el perfil medio lidar de las 10 mediciones de este período con el perfil climatológico medio del satélite SAGE II (Stratospheric Aerosols Gas Experiment)¹⁰. Éste último se obtuvo como el promedio de todos los perfiles medidos por este satélite entre 1995 y 2004, para el mes de octubre y en condiciones fuera del agujero de ozono.

El resultado de esta comparación claramente muestra dos zonas de reducción (Fig.5, derecha). Una zona en la baja estratosfera por debajo de los 20 km, con diferencias respecto al perfil medio satelital que

se incrementan hasta el 45 % a los 15 km, y una zona por arriba de los 20 km y hasta los 33 km, en la cual las diferencias relativas entre los dos perfiles medios alcanzan el 45 %.

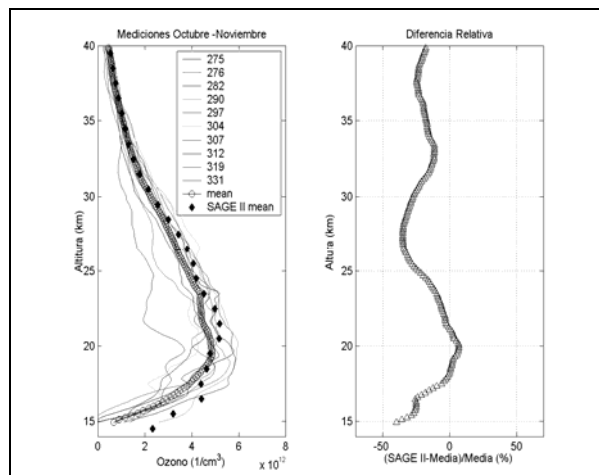


Figura 5. Perfil medio lidar y desviación estándar (izq.). Diferencia relativa con el perfil climatológico del SAGE II (der.)

Es importante destacar que por debajo de los 20 km de altura, los errores asociados a las mediciones satelitales para la baja estratosfera hacen que las diferencias observadas con los perfiles lidar tengan un menor peso relativo. En cambio por sobre los 20 km se pone en evidencia la principal zona de impacto del paso del agujero de ozono por sobre este sitio experimental.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el análisis de las mediciones de perfiles DIAL de ozono estratosférico realizadas como parte de la campaña SOLAR. La misma se está desarrollando en la ciudad santacruceña de Río Gallegos, ciudad afectada por el paso del agujero de ozono.

A través del uso de un sistema cuasi conservativo (latitud equivalente- vorticidad potencial) se determino la posición de Río Gallegos con respecto al vórtice polar antártico, en cuatro niveles isentrópicos. Los resultados muestran que las partes de los perfiles de ozono dentro de la baja estratosfera se encuentran con más frecuencia fuera del vórtice, incrementándose el número de casos en el borde y dentro del mismo en los niveles isentrópicos más altos.

El primer período intensivo de mediciones de perfiles de ozono con técnica lidar de Argentina se desarrolló con éxito, registrándose un total de 29 mediciones entre agosto y noviembre de 2005.

Durante la campaña 2005, Río Gallegos estuvo solo dos días completamente dentro del agujero de ozono. Uno de ellos fue el día 9 de octubre para el cual el perfil de ozono medido con lidar mostró reducciones en todos los niveles entre los 15 a los 34 km.

Las comparaciones del perfil medio lidar para este conjunto de mediciones con el perfil climatológico del SAGE II muestran que el mayor impacto del paso del vórtice polar sobre esta ciudad se encuentra por encima de los 20 km de altura, produciendo una disminución de hasta un 45% para estas alturas.

La campaña SOLAR producirá un nuevo período intensivo de mediciones en la primavera de 2006, permitiendo así relevar dos años de perfiles de ozono a esta latitud y aportar a la comunidad internacional un sitio de medición desde tierra de importancia fundamental para la validación de instrumentos satelitales.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la JICA (Japan International Cooperation Agency) por el financiamiento de la campaña SOLAR. Al CNRS por la donación del container y parte de la electrónica, y a la UTN y la UNSAM por las becas de algunos de los integrantes del grupo Lidar del CEILAP, que intervienen en la campaña. Al Dr. Claudio Cassicia de la UMAG por facilitarnos gentilmente los datos del Brewer de Punta Arenas.

Referencias

1. Farman, J. C., B. G. Gardiner, J. D. Shanklin, Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature*, 315, 207-210, 1985
World Meteorological Organization, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring project, Report N 44, Genova 1999
2. Anderson J.G., W.H. Brune M.H. Proffitt, Ozone destruction by chlorine radicals within the Antarctic vortex: The spatial and temporal evolution of ClO-O₃ anticorrelation based on in situ ER-2 data, *J. Geophys. Res.*, 94, 11465-11479, 1989
3. Megie, G., Menzies, R. T. Complementary of UV and IR Differential Absorption Lidar for global measurements of atmospheric species. *Appl. Opt.*, 19, 1173 (1980).
4. Wolfram, E., B. Milicic, A. Pazmiño, O. Bonfili, J. Salvador, J. Pallotta, H. Nakane, S. Godin-Beekmann, E. Quel, "Estudio de la factibilidad de la campaña solar para la medición de ozono estratosférico utilizando láser en Río Gallegos", CONGREGMET IX, Octubre 3-7, 2005, Buenos Aires, Argentina.
5. Wolfram, E., Pazmiño, A., Otero, L., Salvador, J., Piacentini, R., Porteneuve, J., Godin-Beekmann, S., Quel, E. Stratospheric ozone lidar mobile system at Buenos Aires, Argentina. Reviewed and Revised Papers Presented at the 22nd International Laser Radar Conference (ILRC 2004), ESA, SP-561 Vol. II. Matera - Italia. ISBN 92-9092- Julio 2004. Pags. 589-592
6. Wolfram Elian, Jacobo Salvador, Lidia Otero, Andrea Pazmiño, Jacques Porteneuve, Sophie Godin-Beekmann, Hideaki Nakane, Eduardo Quel. SOLAR CAMPAIGN: STRATOSPHERIC OZONE LIDAR OF ARGENTINA. *Proceeding SPIE Vol. 5887*, p.251-256, Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring VI San Diego, Upendra N. Singh; Ed. (August 2005)
7. Godin, S. Etude expérimentale par télédétection laser et modélisation de la distribution verticale d'ozone dans la Haute Province, Thèse d'Etat, Paris (1987).
8. Nash, E. R., Newman P. Rosenfield J. Schoerberl M., An objective determination of the polar vortex using Ertel's potential vorticity. *J.G.R.*, 101, 9471-9478, 1996.
9. McIntyre, M., T. Palmer, The 'surf zone' in the stratosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 46, 825-849, 1984.
10. Cunnold, D. M.; Chu, W. P.; McCormick, M. P.; Veiga, R. E.; Barnes, R. A. Validation of SAGE II ozone measurements. *Journal of Geophysical Research* (ISSN 0148-0227), vol. 94, June 20, 1989, p. 8447-8460