

# Estudio del comportamiento de la capa de ozono y la radiación UV en la Patagonia Austral y su proyección hacia la comunidad\*

**Jacobo Salvador<sup>1</sup>, Elian Wolfram<sup>1,2</sup>, Eduardo Quel<sup>1,2</sup>**

1 Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones, CEILAP-UNIDEF (MINDEF-CONICET), UMI-IFAEICI-CNRS-3351, Villa Martelli, Argentina

2 Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de Ingeniería Electrónica, Medrano 951, (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

*jsalvador@citedef.gob.ar*

*Recibido el 02 de Febrero de 2012, aprobado el 02 de Marzo de 2012*

## Resumen

La implementación de este trabajo fue llevada a cabo en el Observatorio Atmosférico de la Patagonia Austral (OAPA), ubicado en la ciudad de Río Gallegos (Lat. 51,5° S; Lon. 69,3° O). Las actividades del mismo comenzaron en julio de 2005, y desde entonces se han realizado mediciones sistemáticas con instrumentos de sensado activo (LIDAR<sup>1</sup>) y pasivo (radiómetro) en el período 2005 – 2010, las cuales forman parte de este trabajo. Se presentan además una serie de metodologías en el procesamiento de señales provenientes de un sistema lidar que permite determinar según su configuración perfiles de ozono, aerosoles y temperatura en la estratosfera. Estas mediciones así como las de radiación UV juegan un rol fundamental en el conocimiento de nuestra atmósfera. Las correcciones en los perfiles debido a perfiles de aerosoles estratosféricos son aplicadas al canal elástico en 355 nm, siendo posible calcular perfiles de temperatura por debajo de 30 km y realizar así correcciones en los perfiles de ozono. Adicionalmente diferentes tipos de análisis y procesamientos de señales fueron llevados a cabo sobre un radiómetro solar, multicanal de banda angosta GUV – 541. Se calculan los valores de columna total de ozono, espesor óptico de nubes e índice UV diario.

**PALABRAS CLAVE:** PROCESAMIENTO DE SEÑALES LIDAR - OZONO - TEMPERATURA - RADIÓMETRO

\* El presente artículo forma parte del trabajo de tesis "Estudio del comportamiento de la capa de ozono y la radiación UV en la Patagonia Austral y su proyección hacia la comunidad" para optar al grado de Doctor de la Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, área Ingeniería, bajo la dirección de la Dr. Eduardo Quel y la codirección del Dr. Elian Wolfram.

<sup>1</sup>LIDAR (un acrónimo del inglés Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging)

## **Abstract**

This work was carried out at the Atmospheric Observatory of Southern Patagonia (OAPA) located in the city of Río Gallegos (Lat. 51.5° S; Lon. 69.3° W) since 2005, systematic measurements have been performed with active sensing (lidar) and passive (radiometer) instruments in the 2005 – 2010 period. Measurements of ozone, temperature profiles and solar UV radiation on surface plays a fundamental role in understanding our atmosphere. We present several methodologies, based on signals processing from a lidar system which in different configuration permits to retrieve ozone and stratospheric temperature profiles. Stratospheric aerosol profiles corrections are applied to the elastic channel at 355 nm to calculate temperature profiles below 30 km. Also these aerosol profiles are used in the corrections of the ozone profiles. Additionally different types of analysis and signal processing were performed on data measured with a solar radiometer, moderated narrow-band multi-channel GUV - 541. This data processing has permitted to calculate total ozone column and UV index daily.

**KEYWORDS::** LIDAR SIGNAL PROCESSING - OZONE - TEMPERATURE - RADIOMETER

## Introducción

Un hecho distintivo durante el siglo XX ha sido el reconocimiento de que las actividades humanas están cambiando la atmósfera de la Tierra. El dióxido de carbono, el metano y las concentraciones de clorofluocarbonos se han incrementado, produciendo que las personas en el mundo lleguen a una nueva realidad: la atmósfera es vasta pero finita. La ilustración más llamativa del desarrollo concurrente de teorías científicas, observaciones e implicaciones sociales del cambio de la atmósfera ha sido el adelgazamiento de la capa protectora de ozono de la Tierra. El primer lugar donde el impacto humano sobre la capa de ozono fue claramente distinguido fue quizás el más inesperado: la Antártica. En 1985 científicos británicos reportaron una disminución de la capa de ozono durante la primavera antártica del 50% comparada con las mediciones previas a 1970. Este cambio fue mucho más grande que cualquier variación natural en los promedios mensuales para este lugar. El ozono en la estratosfera es vital para la salud de los seres humanos, los animales y las plantas debido a que éste absorbe la mayor parte de la radiación ultravioleta emitida por el sol antes que ésta alcance la superficie de la tierra. La cantidad de ozono en la estratosfera en cualquier región depende del balance delicado entre los procesos de destrucción y producción fotoquímicas y el transporte ocasionado por la circulación. Es por ello que un estudio detallado del ozono en la atmósfera requiere de la sinergia entre distintas técnicas de sensado remoto capaces de registrar los diferentes elementos que hay relacionados en este balance.

El ozono estratosférico es un componente natural en la atmósfera terrestre, y su presencia es un factor determinante para la formación de la vida como la conocemos en la actualidad. Como es sabido, actúa como filtro de la radiación ultravioleta, de tal manera que las alteraciones en su contenido total pueden generar daños en todo el ecosistema terrestre.

Desde el descubrimiento del Agujero de Ozono Antártico (AOA), definido como la dramática disminución durante la primavera austral, del orden 40 al 50% en comparación con el periodo pre-AOA (WMO, 2003), y de la disminución global de la capa de ozono, 2% – 6% dependiendo de la latitud, se han intensificado

los estudios que tienen como objetivo analizar este grave problema ecológico. Las causas de esta anomalía provienen de la liberación hacia la atmósfera de componentes que contienen cloro y bromo, denominadas Substancias Agotadoras del Ozono (SAO, ODS en inglés), producidos por las actividades del hombre moderno y que han causado daños en el ecosistema global. Los acuerdos internacionales al respecto que se iniciaron con el Protocolo de Montreal en 1987 y sus enmiendas posteriores, han logrado la disminución en el consumo y liberación de las SAO.

## Desarrollo experimental

En el desarrollo de este trabajo se han involucrado diferentes tipos de instrumentos, como así también análisis y procesamiento de señales. Estos han permitido obtener diferentes productos relacionados con la geofísica atmosférica. En las siguientes secciones describiremos los instrumentos utilizados, su principio de funcionamiento, los datos que son capaces de producir y los resultados de los mismos para días de estudio específicos.

### 1. Sistema lidar de absorción diferencial

El sistema DIAL es un instrumento de sensado remoto activo, basado en la interacción de la luz láser con la atmósfera. De acuerdo a los parámetros a ser medidos, los sistemas lidar y en particular el DIAL (Differential Absorption Lidar) utilizan varios tipos de interacciones entre la atmósfera y la radiación láser, tales como dispersión Rayleigh, Mie, Raman y absorción o fluorescencia (Measures, 1984). El uso de fuentes de radiación láser posibilita en conjunto con una electrónica rápida, poder discriminar en altura la información proveniente desde la atmósfera, cuando un pulso láser es emitido. La técnica DIAL para la medición de ozono en la atmósfera, y utilizada en esta tesis fue originalmente propuesta por Schotland (Schotland, 1974).

La implementación de esta técnica requiere la emisión secuencial de dos pulsos láser. El rango espectral de ambas longitudes de onda es elegido dentro del ultravioleta (UV) donde la absorción debida al ozono es más fuerte. De esta manera de las dos longitudes de onda emitidas por el sistema, una es parcialmente absorbida por la molécula de ozono y la otra

longitud funciona como referencia, siendo esta no absorbida por el ozono.

Para la medición de ozono estratosférico donde las concentraciones son mayores que en la tropósfera, la técnica DIAL debe contar con láseres que tengan la suficiente potencia como para detectar radiación retrodispersada desde alturas superiores a los 30 km. Actualmente la mayoría de los grupos de investigación alrededor del mundo, que aplican la técnica DIAL para medición de perfiles de ozono estratosférico, utilizan láseres independientes para generar las longitudes de onda emitidas.

### **1.1 Sistema DIAL de 4 canales instalado en el Observatorio Atmosférico de la Patagonia Austral (OAPA)**

El sistema DIAL de cuatro canales representa la versión inicial para la medición de ozono estratosférico (Wolfram et al., 2008). El mismo tiene sus orígenes en un sistema inicial de dos canales que fue el primer prototipo de un DIAL en Latinoamérica y fue construido en el laboratorio de la División Lidar del CEILAP<sup>2</sup>, dependiente de CITEDEF<sup>3</sup>-CONICET<sup>4</sup> en Villa Martelli, Prov. de Bs. As. (Pazmiño et al., 2003).

El sistema en uso en el OAPA se basa en seis canales de adquisición, aunque es posible también medir con cuatro. Esta configuración representa una capacidad adicional, permitiendo corregir los perfiles de ozono, debido a la influencia de los aerosoles estratosféricos. En muchos casos detectar señales Raman, es difícil debido a la baja relación señal-ruido, y más en regiones como la estratosfera. Por ello dos metodologías fueron implementadas para la obtención de aerosoles estratosféricos utilizando el canal de 355 nm (Salvador et al., 2008).

En las siguientes secciones describiremos las partes fundamentales del DIAL de 4 canales utilizado actualmente en el OAPA.

#### **1.1.1. Emisión**

La radiación láser absorbida por la molécula de ozono se produce con un láser de excímero de

XeCl (cloruro de xenón) con una frecuencia de emisión en 308 nm. Su energía de salida máxima es de 300 mJ, con pulsos de 20 ns de duración y una frecuencia de repetición máxima de 100 Hz. Dado que es necesario disponer de la menor divergencia posible, el láser se opera con cavidad inestable, que permite obtener 0,4 mrad.

La línea de referencia se obtiene de la tercera armónica (355 nm) de un segundo láser ubicado al lado del láser excímero. Este segundo emisor es un láser sólido de Nd-YAG marca QUANTEL modelo 980. Este tipo de láseres por su construcción son básicamente láseres infrarrojos centrandos su emisión en 1064 nm, que por medio de dobladores y triplicadores pueden generar una segunda y tercer armónica en 532 y 355 nm. El mismo fue aportado por la JICA<sup>5</sup> dentro del proyecto Fortalecimiento de los Estudios de la Capa de Ozono en Argentina suscripto con el CEILAP. Este láser tiene una frecuencia de repetición máxima de 30 Hz, 130 mJ de energía por pulso en 355 nm, una divergencia del haz de 0,6 mrad y un ancho de pulso de 6 ns.

Los dos láseres se operan a 30 Hz, la mayor frecuencia en la que puede funcionar el láser de Nd:YAG. Esta situación redundante en una disminución del error estadístico de la medición para el mismo tiempo de adquisición, o equivalentemente una mejor resolución temporal.

Ambos haces láser son enviados a la atmósfera por un tubo colocado en el centro geométrico de la estructura de soporte donde se encuentran los cuatro telescopios. El perfil de tubo por donde salen ambos haces láseres puede ser visualizado en la Fig. 1.

#### **1.1.2. Recepción**

El sistema de recepción óptica consiste en cuatro telescopios parabólicos similares ( $f/2$ ) de 50 cm de diámetro y un metro de distancia focal (figura 2), de fabricación nacional, los cuales corresponden a un área equivalente de 1 metro de diámetro.

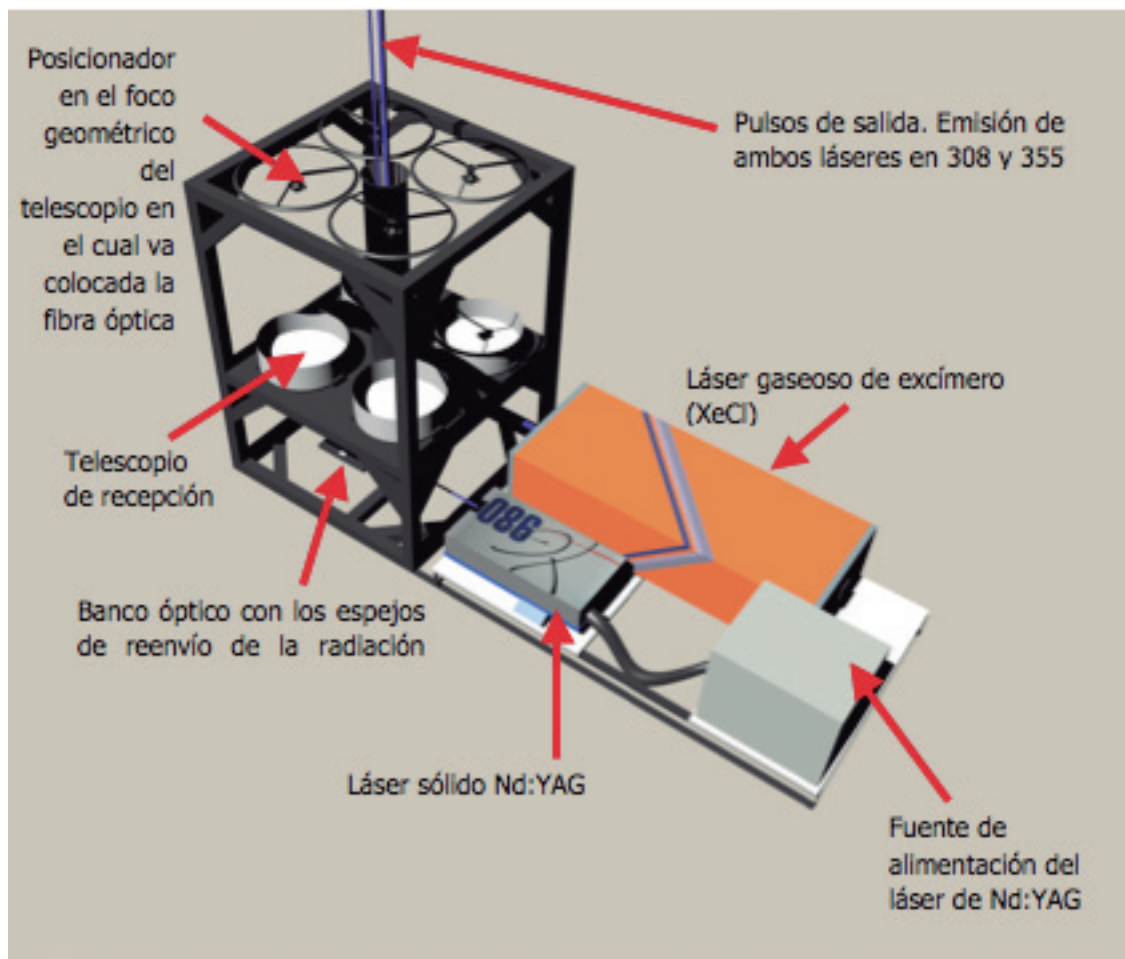
El aluminio de los telescopios fue realizado en CITEDEF por el laboratorio de microelectrónica y capa delgada. Ambos láseres son enviados

<sup>2</sup> CEILAP: Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones

<sup>3</sup> CITEDEF: Instituto de Investigaciones Científicas y Técnicas para la Defensa

<sup>4</sup> CONICET: Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas

<sup>5</sup> Agencia de Cooperación Internacional del Japón - Argentina



**Fig. 1. Esquema general de la emisión y recepción en el sistema DIAL. El sistema de emisión está compuesto por dos láseres de potencia que emiten en 308 y 355 nm. El sistema de recepción está formado por cuatro telescopios de 50 cm de diámetro.**

a la atmósfera por el centro del área de colección de tal forma que cada espejo actúa como el receptor de un lidar elemental, pero el sistema en conjunto es cuasi-coaxial.

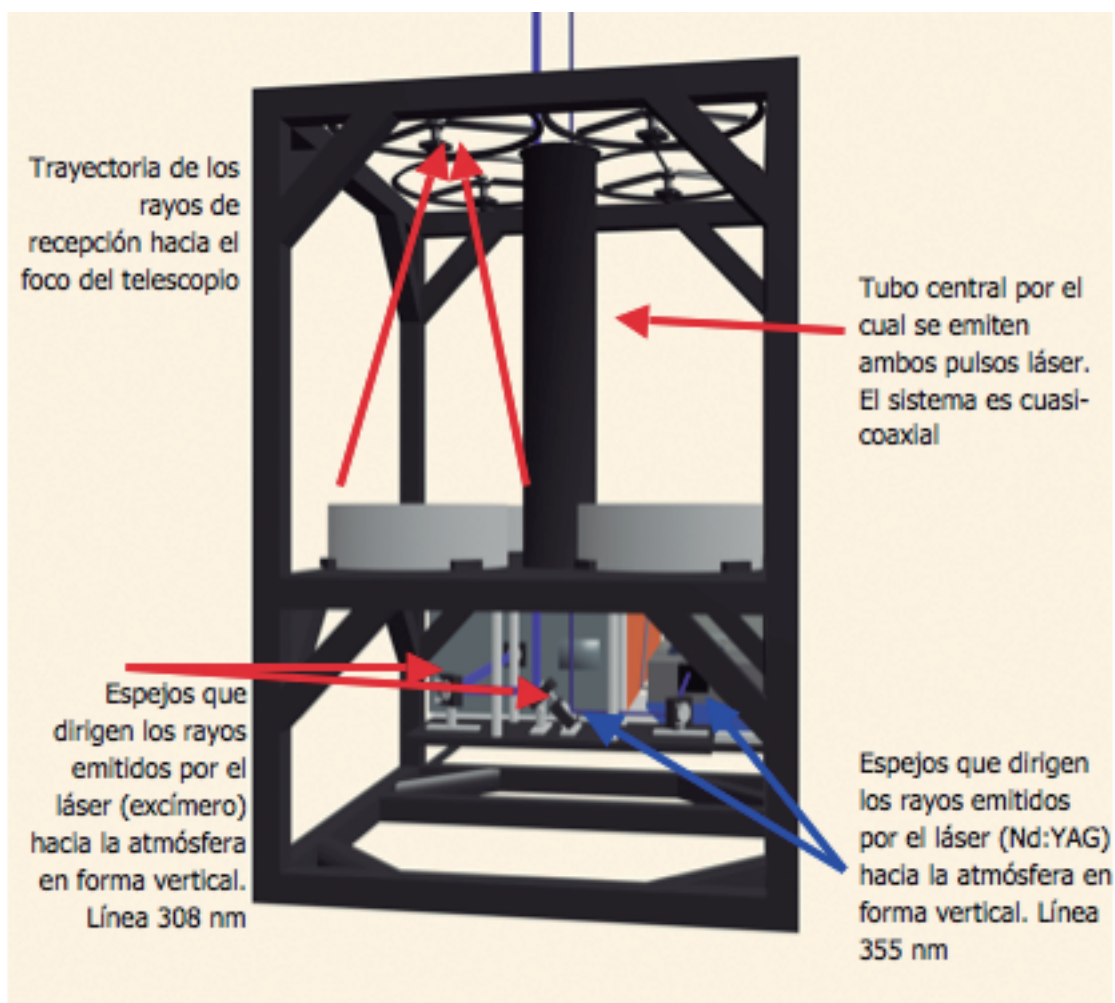
En el plano focal de cada telescopio hay una fibra óptica de cuarzo de un milímetro de diámetro montada sobre un posicionador X-Y-Z para realizar la focalización y ubicar la fibra óptica en la imagen de la luz recolectada por cada telescopio. Así la radiación colectada se suma analógicamente con el concepto multifibra diseñado en el CNRS<sup>6</sup> y aplicado en Argentina, permitiendo aumentar el área efectiva de colección. En la parte inferior de la estructura (Fig. 1) un banco óptico tiene adaptada la óptica de envío de pulsos de ambos láseres. Una descripción de su distribución y configuración puede observarse en la Fig. 2.

Las cuatro fibras ópticas se juntan en una boquilla que las alinea horizontalmente formando la ranura de entrada al espectrómetro. Las mismas transmiten la radiación retrodispersada por la atmósfera a un dispositivo denominado analizador óptico, el cual incluye la óptica para la recolección de pulsos luminosos, un obturador mecánico y un espectrómetro diseñado para separar las distintas longitudes de onda a detectar.

## 2. Lidar Rayleigh para obtener perfiles de temperatura en la estratosfera

La estratosfera media en el rango de 20 - 55 km ha estado recibiendo desde hace varias décadas mucho interés por parte de la comunidad científica, principalmente debido a la problemática ocasionada por el descubrimien-

<sup>6</sup> CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique, París - Francia



**Fig. 2. Distribución y configuración de los elementos del banco óptico ubicado debajo de la estructura rígida que contiene a los cuatro telescopios. Por cada línea de emisión hay dos espejos que reflejan el haz láser emitido en un ángulo de 45 grados.**

to del agujero de ozono antártico y el cambio climático. Los perfiles de temperatura han sido medidos en la estratosfera usando una amplia variedad de instrumentos satelitales, cohetes, globos sonda y algunos sistemas de sensado remoto desde Tierra.

Uno de los instrumentos más promisorios para el sensado atmosférico a largo plazo y de alta resolución vertical en sus mediciones es el lidar. Mediciones de la radiación láser detectadas por dispersión Rayleigh (Elterman, 1951) o dispersión Raman (Moskowitz et al., 1988) pueden ser utilizadas para detectar la concentración de moléculas de aire en la atmósfera, calculando el perfil de densidad atmosférica y luego obteniendo el perfil de temperatura, aplicando la ley de gases ideales. Esto siempre y cuando se asuma que la estratosfera se encuentra en

equilibrio hidrostático (Hauchecorne and Chanin, 1980).

Debido a su resolución en altura, el lidar ha sido ampliamente adoptado para estudiar diferentes fenómenos y procesos atmosféricos en la estratosfera como ondas de gravedad. En años recientes el lidar ha sido empleado para la validación de varias mediciones de temperatura desde plataformas satelitales, como el proyecto Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) (Dudhia et al., 1994).

En la red Network for the Detection of Atmospheric Composition Change (NDACC) el lidar ha formado el núcleo central para las observaciones de perfiles de temperatura en la estratosfera media-alta (Kurylo and Solomon, 1990). El Observatorio Atmosférico de la Patagonia

Austral (OAPA) en Río Gallegos forma parte del NDACC desde el año 2008, aportando datos de perfiles de ozono estratosférico y próximamente de temperatura y aerosoles.

### 3. Radiómetro multicanal GUV-541

La radiación UV proveniente del sol es causante de serios problemas a nivel global en particular efectos sobre la piel, ojos y el sistema inmunológico. Se estima en todo el mundo unas 60.000 muertes al año a causa de la radiación ultravioleta, siendo la mayoría atribuidos a melanomas malignos (Lucas et al., 2008).

Por otro lado la radiación UV es beneficiosa para la producción de vitamina D. También hay nuevas evidencias que sugieren una relación entre los niveles de vitamina D y el riesgo de salud (WHO, 2008), relacionado principalmente a algunos cánceres, enfermedades cardiovasculares y esclerosis múltiple.

Cuando la luz solar atraviesa la atmósfera, el ozono, el vapor de agua, el oxígeno y el dióxido de carbono absorben toda la radiación UV-C y aproximadamente el 90% de la radiación UV-B. La atmósfera absorbe la radiación UV-A en menor medida. En consecuencia, la radiación UV que alcanza la superficie terrestre se compone en su mayor parte de rayos UV-A y una pequeña parte de rayos UV-B. Esta pequeña porción de radiación solar de longitudes de onda corta, tiene extrema importancia en el desarrollo de la vida en la Tierra tal como la conocemos hoy y es aceptado hoy en día que el hombre ha modificado la composición de los gases atmosféricos que redundaron en incrementos del nivel de radiación solar que llega a la superficie terrestre. El impacto antropogénico de este desbalance es motivo de estudio en la actualidad, haciendo pertinente y necesario monitorear parámetros atmosféricos o componentes radiativos que han cambiado los patrones naturales y representan un peligro para la salud humana y los organismos vivos en general.

La radiación ultravioleta ambiental es altamente variable. Algunas de estas variaciones son fácilmente cuantificables, como la elevación solar en función de la latitud, la hora del día y la estación del año. Variaciones en la columna de ozono estratosférico son de importancia directa en la distribución de la radiación UV en

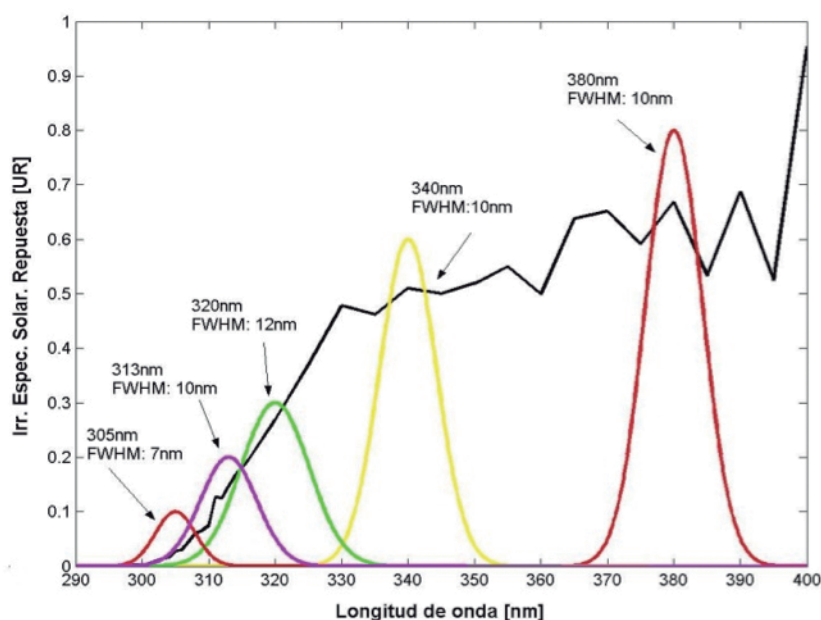
superficie. Observaciones continuas del ozono atmosférico están disponibles desde la década del '50 en estaciones de observación en tierra para ciertos lugares del planeta, y más recientemente con otros métodos de sensorio remoto como los satélites y los lidars. Otros factores tales como las nubes, son mucho menos predecibles, y sus distribuciones espacio – temporales son aún pobremente caracterizadas, especialmente a escala local y para fluctuaciones de períodos cortos. Adicionalmente, perturbaciones localizadas pueden provenir de elevaciones en la superficie, reflexiones y turbidez atmosférica, variable asociada con la contaminación del aire.

La medición de la radiación UV puede ser realizada con diversos instrumentos, que pueden ser clasificados en tres categorías, según su rango espectral de observación.

Los espectrorradiómetros pueden separar la radiación detectada en una banda cuya resolución puede ser de 1 nm o menor (Seckmeyer et al., 2001). Los radiómetros de banda ancha (broadband) se caracterizan por utilizar una amplia banda de longitudes de onda sobre bandas por ejemplo del UV (UV-A, UV-B) (Seckmeyer et al., 2005). Los radiómetros multicanales de banda angosta hacen mediciones en longitudes de onda discretizadas con anchos de banda generalmente de 10 nm de ancho (FWHM). Estos instrumentos han demostrado ser una solución aceptable para este tipo de mediciones, entre los espectrorradiómetros UV muy costosos y de gran mantenimiento y los radiómetros de banda ancha, que solo proveen información parcial debido a que no pueden distinguir entre variaciones de la radiación UV causadas por alteración en la cobertura nubosa y variaciones causadas por cambios en el contenido total de ozono.

Frederick y su equipo (Frederick et al., 1989) notaron que la variabilidad en la cobertura nubosa está entre las fuentes más grandes de variación en la irradiancia UV integrada en superficie. Por lo tanto para detectar tendencias en la radiación UV-B provocadas por cambios en el ozono total, se deben establecer redes de monitoreo capaces de medir radiación UV, ozono total y transmisión de nubes.

En nuestro país están operativas dos redes de monitoreo de la radiación UV solar en super-



**Fig. 3. Esquema de la ubicación y distribución espectral de los filtros de los cinco filtros centrados en 305, 313, 320, 340 y 380 nm del radiómetro GUV-541 de la compañía Biospherical Instrument. En línea negra un espectro solar es superpuesto a la respuesta de los filtros.**

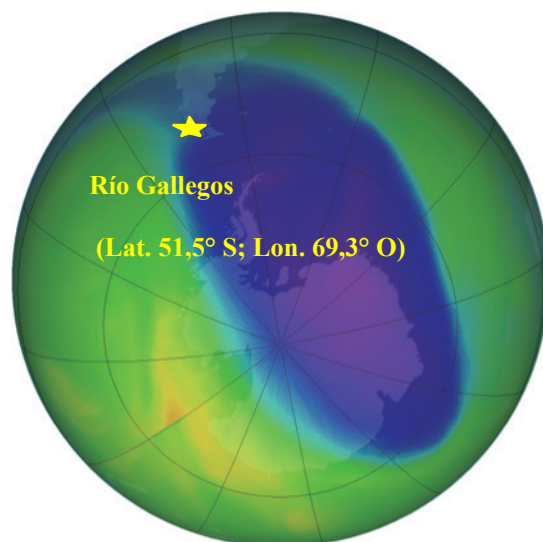
ficie. Una es la red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) que cuenta con radiómetros de banda ancha distribuidos en nuestro país (típicamente unos 30 equipos), incluso en la región antártica. Los mismos tienen incorporados filtros que simulan la respuesta espectral de la piel a la incidencia de este tipo de radiación, y normalmente son llamados Biómetros. Estos instrumentos miden en valores calibrados la irradiancia eritémica (enrojecimiento de la piel) que se convierte vía un factor multiplicativo, en el índice UV solar de distribución al público.

También existe la Red Latitudinal de Monitoreo Solar Argentina (<http://www.dna.uba.ar>), dotada de radiómetros GUV (ground-based UV) multicanales (Booth et al., 1994). Distribuidos en el territorio argentino, sensan la radiación UV-A y UV-B a través de canales que cubren esta porción del espectro solar, con un ancho de banda moderado para cada uno de sus filtros de ancho 10 nm (FWHM). La División Lidar del CEILAP tiene a su cargo en el OAPA un radiómetro GUV-541 s/n 29242, adquirido con financiamiento de JICA en el año 2002 y que se unió a esta red en 2004. Desde junio de 2005 se encuentra operativo en la ciudad de Río Gallegos como parte de la estación de sensado remoto pasivo que esta institución tiene en el OAPA ([www.division-lidar.com.ar](http://www.division-lidar.com.ar)).

### 3.1. Descripción del radiómetro GUV-541

El instrumento utilizado para realizar las mediciones de la radiación ultravioleta es un radiómetro con filtros multicanal de banda angosta GUV-541 fabricado por la compañía Biospherical Instruments Inc., en San Diego. Este tipo de instrumento es apto para la medición de la radiación UV en superficie y pertenece a la clase de instrumentos llamados "radiómetros multicanal", es decir radiómetros que responden a múltiples longitudes de onda, cuyas características son determinadas por la combinación de los diferentes filtros y propiedades del sensor. La parte óptica de este tipo de instrumentos consiste típicamente en un difusor de teflón o cuarzo, filtros interferenciales y detectores fotosensibles. El dispositivo está aislado del entorno por una caja de aluminio anodizado duro y recubrimiento especial. Un cabezal de teflón garantiza un mejor aislamiento de la temperatura exterior. El sistema está sellado por medio de juntas de goma que evitan la entrada de humedad. Un controlador de temperatura que la estabiliza a 40 °C o 50 °C, permite una mejor estabilidad eléctrica y previene también la acumulación de lluvia, nieve o hielo por encima del instrumento, evitando el deterioro del radiómetro.





**Fig. 4. Imagen satelital obtenida por medio del instrumento OMI de NASA, para el día 9 de octubre del 2005. La zona comprendida en color azul - violeta son bajos valores del contenido de ozono total, menores a 220 DU. El OAPA - Río Gallegos es marcado con una estrella amarilla.**

El *GUV-541* posee cinco canales de medición UV con longitudes de onda centrales en 305, 313, 320, 340 y 380 nm y un ancho de banda de 10 nm (FWHM) aproximadamente en cada filtro (Fig. 3). Los diferentes canales del instrumento miden en forma simultánea valores de voltajes una vez por minuto en cada canal. Estos valores adquiridos son luego afectados por una constante de calibración que permite determinar el valor de irradiancia solar espectral en superficie.

#### 4. Resultados

A partir de nuevas capacidades relacionadas con la implementación de nuevos algoritmos, en el OAPA se han podido derivar nuevos parámetros relacionados con la obtención de perfiles de temperatura a partir de las mediciones de señales lidar y valores de columna total de ozono e índice UV a partir de un radiómetro multicanal. En las siguientes secciones se visualizan los resultados de ambos instrumentos para casos reales de medición.

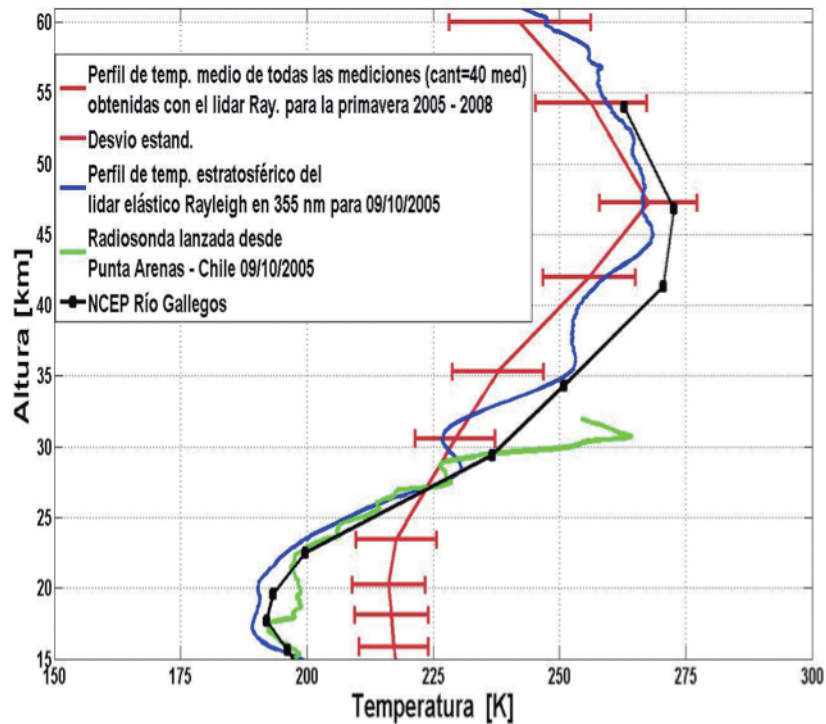
##### 4.1. Casos de estudio

Durante la primavera en el hemisferio sur, la región de la Patagonia Austral es afectada por el cruce del vórtice polar, condición meteorológica particular que contiene al denominado agujero de ozono antártico.

En más de cinco años continuos de mediciones en el OAPA - Río Gallegos, se ha podido establecer casos de estudio que constituyen mediciones en donde algún parámetro geofísico, en nuestro caso la temperatura, fue mayor o menor que el valor esperado, con respecto a una media climatológica. En nuestro estudio hemos derivado la media de los perfiles medidos durante la primavera, haciendo la promediación de todas las mediciones en el periodo, cubriendo un total de 40 mediciones lidar, para los años desde el 2005 a diciembre del 2007.

Tres casos de estudio diferentes, son descritos en esta sección. Los primeros dos casos están separados por tan solo 8 días de diferencia en el mes de octubre de 2005, demostrando la gran dinámica que presenta un fenómeno a escala global sobre un punto específico de medición. El tercer caso es referido a un evento particular de dilución del agujero de ozono ocurrido en diciembre del 2006.

El primer caso que se trata está asociado con un evento masivo de intrusión del agujero de ozono sobre la Patagonia Austral (Fig. 4) ocurrido el 9 de octubre de 2005 en donde el valor de la columna total de ozono estuvo en 190 DU, valor significativamente menor al umbral que usualmente se utiliza para determinar la condición de agujero (220 DU) (Wol-



**Fig. 5. Superposición de varios perfiles de temperatura estratosféricas para el día 9 de octubre del 2005. Línea azul: perfil de temperatura derivado con el lidar elástico Rayleigh; línea verde: medición de temperatura de un radiosondeo lanzado en coincidencia desde la ciudad de Punta Arenas; línea con rectángulos cuadrados negro: perfil extraído de la base de datos NCEP para el mismo día de estudio; línea continua roja con barra de error: media y un desvío estándar de todas las mediciones de temperatura obtenidas por el lidar elástico Rayleigh para el periodo de la primavera del 2005 a diciembre 2008, cubriendo un total de 40 mediciones.**

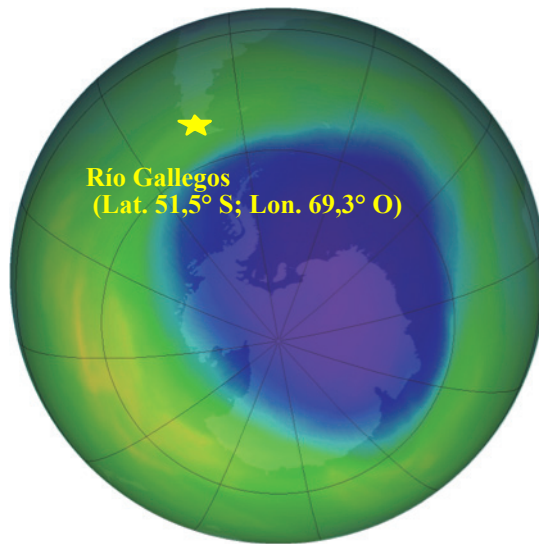
fram et al., 2006). Cabe destacar que en más de cinco años continuos de mediciones sobre Río Gallegos este evento ha sido el de mayor significancia en cuanto a niveles mínimos de columna total de ozono.

Con el lidar elástico Rayleigh se realizó una medición de 312 minutos comenzando a las 23:00 hora local de Río Gallegos. La medición fue hecha después del pasaje de un frente de baja presión, que causó una lluvia persistente durante la mañana y parte de la tarde.

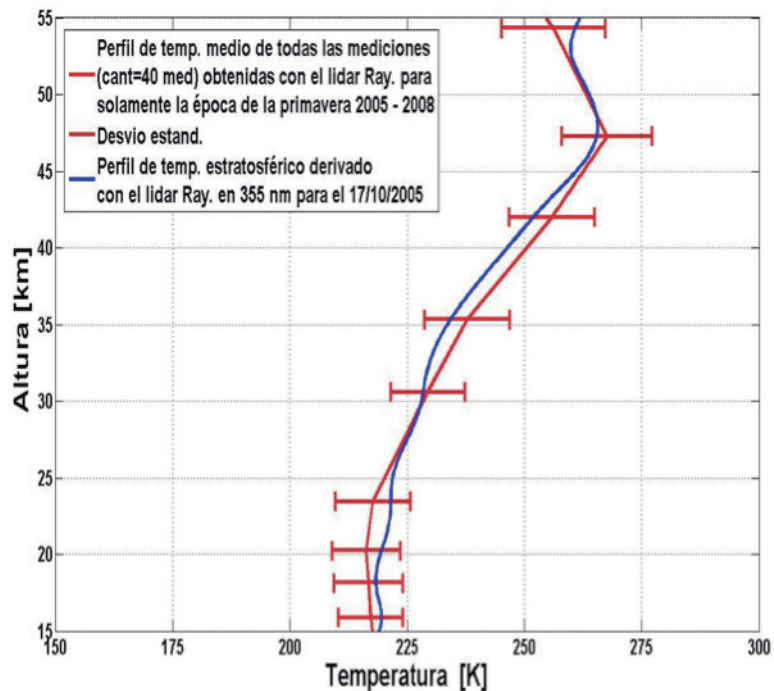
La medición lidar efectuada guarda coincidencia temporal con el cruce del agujero de ozono sobre Río Gallegos. En la Fig. 5, se muestran varios perfiles de temperatura asociados con el evento del 9 de octubre de 2005. Un perfil de temperatura en la estratósfera fue obtenido mediante el lidar elástico Rayleigh sin realizarle ningún tipo de corrección debida a

aerosoles. La medición puede visualizarse en color azul y es válida para la región que va desde los 15 hasta los 60 km de altura (Salvador et al., 2011).

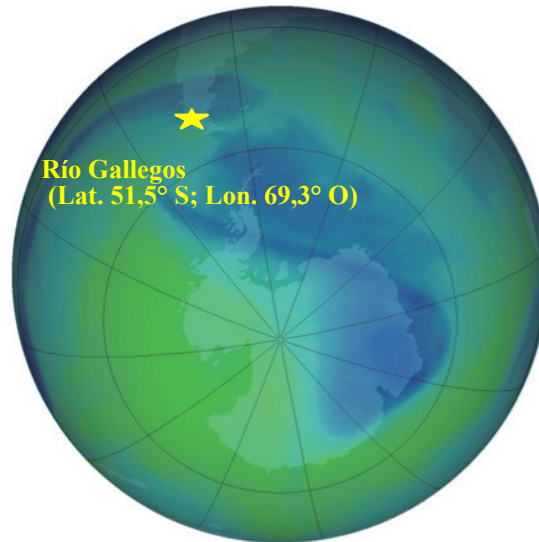
Para este caso particular se han utilizado además otras mediciones provenientes de un globo sonda lanzado desde la Universidad de Magallanes UMAG en la ciudad de Punta Arenas por el Laboratorio de Ozono y Radiación UV (LabO3RUV) en colaboración con el INPE de Brasil. El perfil se muestra en la figura de arriba en color verde, y presenta buen acuerdo entre 15 y 30 km de altura con la medición lidar. Por encima de los 30 km la temperatura del globo sonda tiene discrepancia con la medición lidar, tendiendo a valores más altos que los normales y luego teniendo una recuperación a valores más bajos. Se superpone además un perfil NCEP para el día de estudio y sin embargo cuando comparamos todo nuestro



**Fig. 6.** Imagen OMI para el 17 de Octubre del 2005. La imagen en color violeta muestra el agujero de ozono representando valores de columna total de ozono por debajo de 220 DU. La forma del agujero para ese día presentó gran simetría sobre la Antártida, sin posibilidad de afectar a la región Patagónica.



**Fig. 7.** Medición de un perfil de temperatura lidar para el 17 de octubre de 2005 (línea azul). En correspondencia se superpone a la medición anterior la media de todas las mediciones efectuadas en la primavera entre el 2005 y diciembre de 2008.



**Fig. 8. Dilución del agujero de ozono para el 10 de diciembre de 2006. Las masas de aire con bajo contenido de ozono no se centran en forma uniforme sobre la Antártida sino que se ven trasladadas hacia latitudes más bajas.**

juego de medidas se ve que tanto la medición lidar como el radiosondeo y NCEP muestran un excelente acuerdo en todo el rango de alturas. Sobre el impacto del evento, y como forma de cuantificarlo se calculó la media de todas las mediciones lidar más el desvío estándar medido en los periodos de primavera desde el año 2005 hasta diciembre del 2008, trabajando sobre un total de 40 mediciones.

Se muestra que la medición del 9 de octubre de 2005 representa un caso de estudio de mucho interés debido a que dicha medición está muy por debajo de la media menos el desvío estándar. La zona más fría es la región desde los 15 hasta aproximadamente los 24 km de altura. Dicho enfriamiento es causado por la incidencia del vórtice polar sobre Río Gallegos (Wolfram et al., 2006).

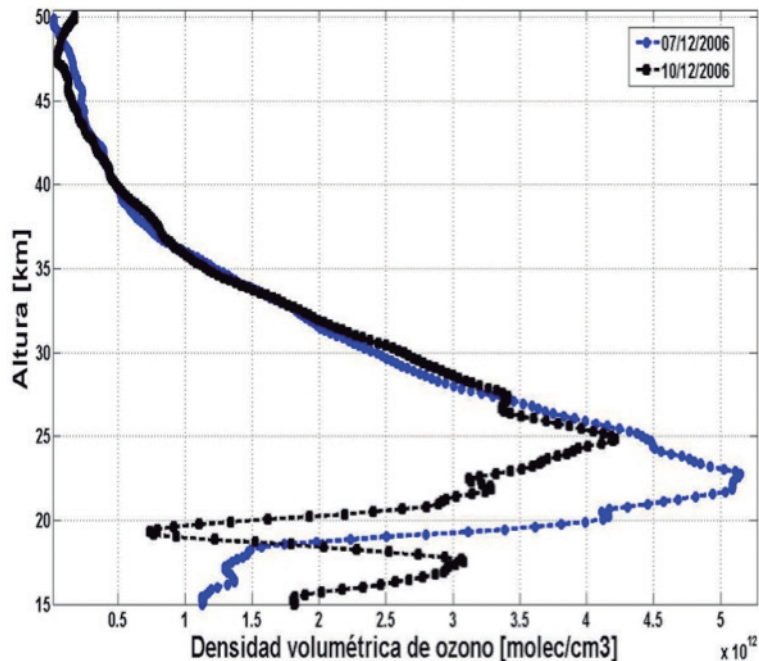
En nuestro segundo caso de estudio para el 17 de octubre del 2005, tan solo 8 días luego del primer caso, se evalúa la medición de un perfil de temperatura lidar para una condición normal, es decir una situación en la cual el agujero de ozono se encuentra alejado del sitio de mediciones y el valor de columna total fue de 357 DU.

En la Fig. 6, se ve la imagen satelital en donde la región que comprende el agujero de ozono antártico se encuentra más centrado sobre la región antártica teniendo una forma aproximadamente circular con poca deformación en comparación con la imagen de la Fig. 4.

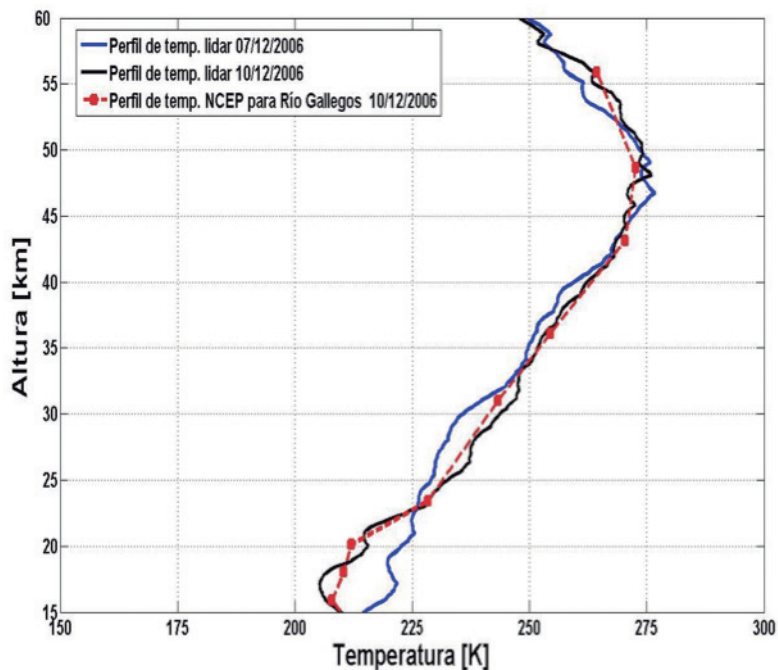
En la Fig. 7, se muestra el perfil de temperatura lidar para el mismo día de estudio. En la medición del 17 de octubre del 2005 se midió durante 238 minutos, comenzando la medición a las 23:42 hora local de Río Gallegos.

Cuando se compara la medición con la media y desvío estándar de todos los perfiles medidos en primavera desde el año 2005 a diciembre del 2008, se deduce que en todo el rango de alturas desde 15 hasta 55 km, el perfil medido estuvo dentro del desvío estándar de nuestra climatología, elaborada con datos del instrumento. Este resultado es importante y muestra claramente que el perfil de temperatura lidar del 17 de octubre del 2005 constituye una medición esperable y normal, guardando correspondencia con la climatología calculada.

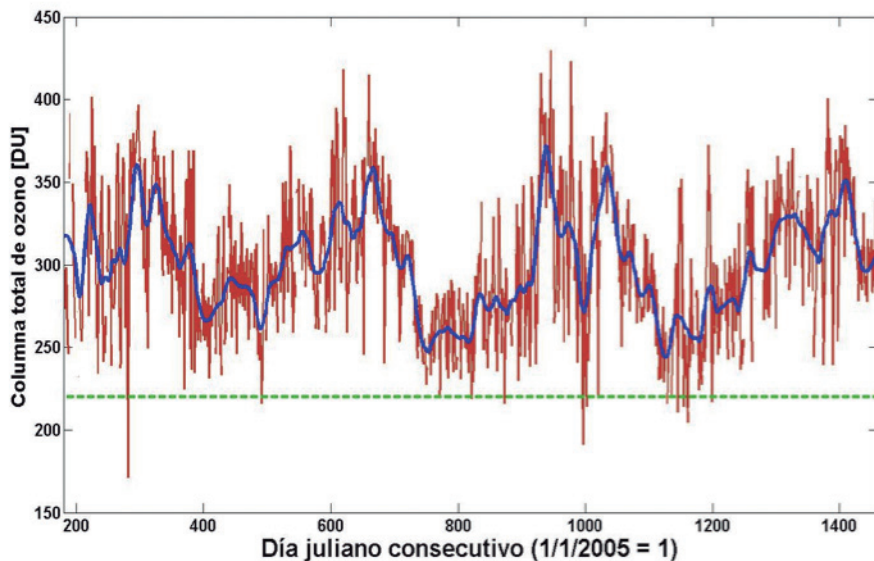
Por último se estudia la medición del 10 /12/ 2006. La medición corresponde a un efecto de dilución del agujero de ozono en donde masas de aire con poco ozono comienza un tránsito hacia latitudes más bajas (Wolfram et al., 2008). En la Fig. 8, se ve la imagen satelital OMI para el día 10 de diciembre de 2006. En ella se ve cómo masas de aire con bajo contenido de ozono, no se encuentran en forma homogénea y unidas como en los dos últimos casos presentados. El sistema DIAL siguiendo su cronograma de mediciones rutinarias fuera de la época de eventos extremos, detectó una masa de aire con una perturbación en la distribución del ozono en la altura.



**Fig. 9. Dos mediciones de perfiles de ozono estratosférico por el sistema DIAL; (perfil negro) medición DIAL del 10/12/2006: se visualiza una reducción en el perfil de ozono entre 15 y 20 km; (perfil azul) medición del sistema DIAL tres días previo al anterior para el 07/12/2006.**



**Fig. 10. Perfiles de temperatura derivados por el sistema DIAL: para el día 07/12/2006 (línea azul); para 10/12/2006 (línea negra). Se superpone además el perfil de temp. NCEP para el 10/12/2006 sobre Río Gallegos (línea rayada roja, con cuadros).**



**Fig. 11. Evolución de la columna total de ozono calculada por medio del radiómetro GUV-541 para Río Gallegos en el periodo junio 2005 a diciembre 2008, (línea azul) media móvil.**

Particularmente la Fig. 9 muestra dos mediciones de perfiles de ozono estratosférico muy cercanas en días realizadas con el sistema DIAL para el 7 y 10 de diciembre del 2010. En la primera medición del 7 de diciembre el perfil de ozono presenta una distribución del ozono con la altura dentro de los valores esperados. En cambio la medición del día 10 de diciembre el perfil de ozono estratosférico presenta una disminución en el rango de alturas que va desde los 15 hasta los 25 km de altura.

La imagen satelital que se muestra en la Fig. 8. permite ver una masa de aire con bajo contenido de ozono visualizada (en color más azulado) sobre la región patagónica. Esta imagen no permite cuantificar en qué región de la estratosfera se produjo la disminución. La medición complementaria realizada por el DIAL permite observar y caracterizar este evento en forma muy precisa.

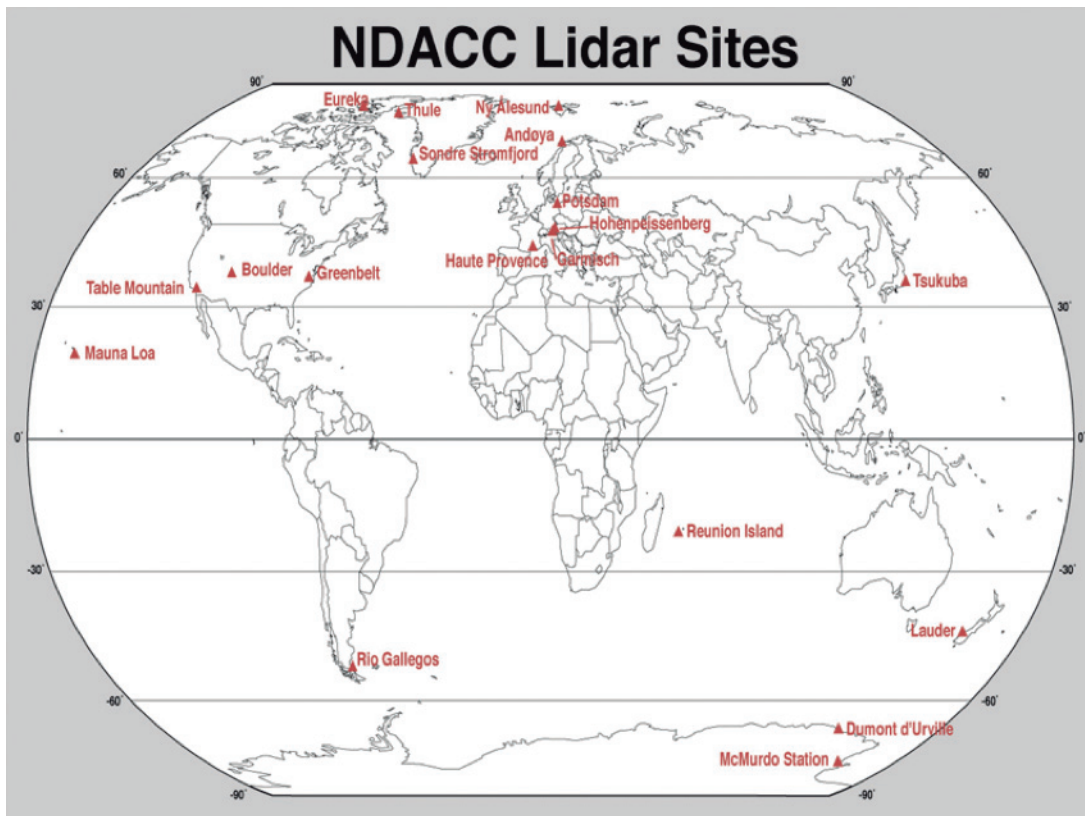
El perfil de temperatura lidar obtenido para el 7 y 10 de diciembre de 2006 es mostrado en la Fig. 10. Ambos perfiles se muestran superpuestos, y en color azul la medición para el 7 de diciembre muestra un perfil de temperatura uniforme. En cambio en la medición del día 10 de diciembre, el perfil de temperatura en color negro presenta una tendencia a valores más bajos en la parte inferior entre 15 y 24 km, exactamente la misma región en donde

el perfil de ozono estratosférico de la figura 4.14 presenta una disminución. Además se coloca en la Fig. 10, el perfil de temperatura NCEP, extraído para Río Gallegos el día 10 de diciembre de 2006. De este modo se puede establecer una relación directa entre la influencia del ozono y la temperatura en la estratosfera baja, para este caso de estudio. Se valida la medición obtenida con el lidar para ese día, con el perfil de temperatura NCEP, el cual muestra la misma tendencia que el perfil de temperatura derivado con el lidar elástico Rayleigh.

#### **4.2. Columna total de ozono, calculada mediante el radiómetro solar GUV-541**

Un método para inferir el valor de columna total de ozono ha sido implementado en este capítulo a partir de las mediciones de irradiancia espectral realizadas con un radiómetro multicanal de banda angosta GUV-541, tomando específicamente los valores de irradiancia en los canales de 340 y 305 nm.

Para derivar la columna total de ozono se implementó una rutina automática en Matlab con el objetivo de utilizar diariamente el archivo almacenado el día anterior y proveer de valores de ozono prácticamente en forma diaria. La versión inicial del programa, desarrollada a principios del año 2006, calculaba el cociente



**Aceptado oficialmente en diciembre de 2008 como parte de la red NDACC (Network for the Detection Atmospheric Composition Change)**

de los canales (340 – 305 nm) en el mediodía solar. Luego estos eran insertados en una tabla sintética construida con los cocientes de las irradiancias espectrales modelizadas también en 340 y 305 nm para una amplia variedad de valores de columna total de ozono desde 10 DU hasta 700 DU y para diferentes ángulos cenitales, utilizando el modelo de transferencia radiativa TUV (Stammes et al., 1991). Los cocientes de irradiancias espectrales modelizados con el modelo TUV, 340-305 nm en función del ángulo cenital y para diferentes valores de columna total de ozono se puede visualizar en la figura 11. En la misma se muestra a modo de ejemplo, el mes de octubre de 2005, superponiendo los cocientes de irradiancia 340-305 nm medidos por el radiómetro.

A partir de la interpolación lineal entre los cocientes obtenidos con los datos de irradiancia del radiómetro GUV-541, que es siempre posible si se considera que ambas longitudes de onda son atenuadas de la misma manera por las nubes, se infiere el valor de la columna total de ozono a partir del dato medido por el instrumento.

**Conclusiones**

En el desarrollo de este trabajo se involucraron tareas de mejoras sustanciales en el sistema lidar basado en la técnica DIAL para la medición del contenido de ozono estratosférico instalado en junio de 2005 en el OAPA, dentro de la Base Aérea Militar de Río Gallegos. Los cambios fundamentales estuvieron centrados en el sistema de adquisición de mediciones, análisis y sistematización de los datos, programación y evaluación de nuevos algoritmos para el procesamiento de las señales. Desde su instalación y hasta el presente se realizaron 250 mediciones durante noches con cielo despejado a parcialmente nublado y tomando un promedio de entre tres y cuatro horas continuas de medición.

Desde el punto de vista instrumental se realizaron cambios en la detección del sistema DIAL del OAPA, como la incorporación de un nuevo sistema de obturación más veloz y estable, que hizo que el sistema pasara de medir con un obturador mecánico funcionando a 9000 rpm a otro de 18000 rpm.

Con respecto al análisis y procesamiento de señales, una gran variedad de datos geofísicos pudieron ser obtenidos del procesamiento de las señales lidar (densidad, temperatura del aire, aerosoles estratosféricos y altura de la estratopausa).

Al comienzo de este trabajo en el año 2005 el sistema DIAL de cuatro canales instalado en el OAPA solo tenía la capacidad de poder medir el contenido de ozono estratosférico. En el transcurso de la misma, en base a diferentes algoritmos basados en técnicas y en el procesamiento de señales lidar provistas por cada canal del instrumento (cuatro canales elásticos y dos inelásticos) se pudieron mejorar los perfiles de ozono estratosféricos.

Mediante el procesamiento de las señales lidar adquiridas para el canal elástico en 355 nm, se obtuvo la distribución de perfiles de temperatura en la alta estratosfera (30-60 km). Conociendo además la distribución de los aerosoles, fue posible descontaminar la señal lidar de 355 nm por debajo de 30 km, afectada por los aerosoles estratosféricos. Con esta corrección se pudo obtener perfiles completos de temperatura estratosférica entre 15 a 60 km de altura.

Comparaciones con base de datos de re-análisis NCEP e instrumentos satelitales como el High Resolution Dynamics Limb Sounder (HIRDLS) y Microwave Limb Sounder (MLS) ambos a bordo del satélite AURA de NASA han permitido validar y comparar la metodología de obtención de perfiles de temperatura en la estratosfera entre los 15 y 60 km.

Para obtener estas conclusiones fueron realizadas comparaciones de medias y desvíos con los instrumentos satelitales HIRDLS y la base de datos NCEP. Más de 90 mediciones lidar en el período 2005 – 2007 fueron utilizadas siguiendo un criterio de coincidencia espacial, lográndose estudiar y publicar el impacto del agujero de ozono sobre los perfiles de temperatura, analizándose casos totalmente fuera del agujero de ozono, sobre su borde y totalmente dentro del mismo. Desde el punto de vista geofísico este ha sido un resultado significativo ya que por primera vez fue posible obtener perfiles de temperatura estratosférica hasta 60 km de altura para la latitud 52° sur, desde tierra.

Por otro lado se destaca la relación existente entre el contenido de ozono en la atmósfera y la cantidad de radiación ultravioleta (UV) que llega a la superficie. En el OAPA funcionan en forma continua una serie de instrumentos de sensado pasivo de la radiación solar. Por tal motivo se han llevado a cabo también, el procesamiento de las señales obtenidas por medio de un radiómetro multicanal de banda angosta GUV-541. Tres diferentes algoritmos combinados con modelos de transferencia radiativa han permitido obtener la columna total de ozono, el espesor óptico de nubes, y por último el índice UV en forma diaria.

La serie de datos desde junio de 2005 a diciembre de 2008 de la columna total de ozono y del índice UV han sido comparadas con instrumentos satelitales como el Ozone Monitoring Instrument (OMI) de NASA y un biómetro calibrado marca Yankee Environmental Systems (YES), instalado en el OAPA.

## Agradecimientos

Un especial agradecimiento a la Agencia de Cooperación Internacional del Japón en Argentina (JICA), cuyo aporte financiero a través de los dos proyectos otorgados han posibilitado la realización de la campaña SOLAR (2005 - 2007) y del proyecto binacional Argentina - Chile, denominado UVO3Patagonia (2008 - 2011). Al LATMOS (Laboratoire Atmosphères, Milieux, Observations Spatiales), perteneciente al Institut Pierre Simon Laplace (CNRS-Francia) por el constante apoyo científico y tecnológico. A las siguientes instituciones que han permitido la realización de esta tesis: Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones, Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Universidad Nacional de San Martín, Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Bs. As., Servicio Meteorológico Nacional, National Aeronautics and Space Administration-USA, National Institute for Environmental Studies-Japón.



## Referencias

- BOOTH, C. R., MESTECHKINA, T. y MORROW, J. H., (1994), Ocean Optics XII, J.S. Jaffe, ed. Proc. SPIE 2258, 654-663.
- DUDHIA, A., LIVESEY, N. J. y TAYLOR, F. W., (1994), Validation of ISAMS Retrievals of atmospheric temperature and pressure, *Adv. Space Res.*, 14, 237-241.
- ELTERMAN, L. B., (1951), The measurement of stratospheric density distribution with the searchlight technique, *J. Geophys. Res.*, 56, 509-520.
- FREDERICK, J. E.; SNELL, H. E. y HAYWOOD, E. K. (1989), Solar ultraviolet radiation at the earth's surface *Photobiol.* 50, 443-450.
- HAUCHECORNE, A. y CHANIN, M. L. (1980), Density and Temperature Profiles obtained by lidar between 35 and 70 km, *Geophys. Res. Lett.*, 8, 565-568.
- KURYLO, M. J., y SOLOMON, S. (1990), Implementation report NASA, Network for the Detection of Upper Atmosphere Research Stratospheric Change: Program mid NOAA a status and Climate and Global Change Program, NASA, Washington D. C.
- MEASURES, R. M., (1984), *Laser Remote Sensing*. New York, John Wiley & Sons, Inc.
- MOSKOWITZ, W. P., DAVIDSON, G., SIPKer, D., PHILBRICK, C. R. y DAO, P. (1988), Raman augmentation for Rayleigh lidar, 14th ILRC, Conference Abstracts, 284-286.
- SCHOTLAND, R. M., (1974), Errors in the lidar measurement of atmospheric gases by differential absorption, *J. Appl. Meteorol.*, 13, 71-77.
- WOLFRAM, A. E., SALVADOR, J., D'ELIA, R., CASICCIA, C., PAES LEME, N., PAZMIÑO, A., PORTENEUVE, J., GODIN-BEEKMAN, S., NAKANE, H. y Quel, E. J., (2008), New Differential absorption lidar for stratospheric ozone monitoring in Patagonia, south Argentina, *J. Opt. A: Pure Appl. Opt.* 10, 104021 (7pp). oi:10.1088/1464-4258/10/10/104021.
- PAZMIÑO, A., GODIN, S., WOLFRAM, E., LAVORATO, M., PORTENEUVE, J., QUEL, E., MEGIE, G., (2003), Intercomparison of ozone profiles measurements by a differential absorption lidar system and satellite instruments at Buenos Aires, Argentina, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 40, ISSN 0143- 8166, Págs. 55-65.
- LUCAS, R.M., MCMICHAEL, A.J., ARMSTRONG, B.K., SMITH, W.I., (2008), Estimating the global disease burden due to ultraviolet radiation exposure. *International Journal of Epidemiology*; 37 (3): 654-667.
- SALVADOR, J., WOLFRAM, E., PALLOTTA, J., OTERO, L., D'ELIA, R., QUEL, E., (2008), Correction of stratospheric ozone profile using stratospheric aerosols backscatter in Río Gallegos, Argentina. A Case Study, *Óptica Pura y Aplicada* 165-170, 41, Sociedad Española de Óptica.
- SALVADOR, J., WOLFRAM, E., D'ELIA, R., QUEL, E., (2011), Temperature lidar retrieval using Rayleigh lidar in Río Gallegos, Argentina, *Opt. Pura y Apl.* 44(2) pp. 381-386.
- SALVADOR, J., WOLFRAM, E., PALLOTTA, J., OTERO, L., D'ELIA, R., QUEL, E., (2008), Correction of stratospheric ozone profile using stratospheric aerosols backscatter in Río Gallegos, Argentina. A Case Study, *Óptica Pura y Aplicada* 165-170, 41, Sociedad Española de Óptica.
- SECKMEYER, G., BAIS, A., BERNHARD, G., BLUMTHALER, M., BOOTH, C. R., DISTERHOFT, P., MCKENZIE, R. L., MIYAUCHI, M., Y ROY, C., (2001), Instruments to measure radiation. Part 1: Spectral instruments, World Meteorological Organization, Atmosphere Watch Publication No. 125, WMO TD No. 1066, Geneva, Switzerland.
- SECKMEYER, G., BAIS, A., BERNHARD, G., BLUMTHALER, M., BOOTH, C. R., LANTZ, K., (2005), Instruments to measure solar ultraviolet radiation. Part 2: Broadband measuring erythemally weighted solar irradiance, World Meteorological Global Atmosphere Watch Publication No. 164, WMO TD No. 1289, Geneva. Disponible: <http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw-reports.html>.
- STAMNES, K., SLUSSER, J. Y BOWEN, M., (1991), Derivation of total ozone abundance and cloud effects from spectral irradiance measurements. *Appl. Optics/ Vol 30, No 30/ 20 octubre*.

WMO (World Meteorological Organization), (2003), Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002. Global Ozone Research and Monitoring Project report no. 47, World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 498 pp.

WOLFRAM, E., SALVADOR, J., PALLOTTA, J., D'ELIA, R., OTERO, L., GODIN-BEECKMANN, S., NAKANE, H. Y QUEL, E., (2006b), Solar campaign: First results of ozone profile measurements at Río Gallegos, Argentina, Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference Editors Chikao Nagasawa, Nobuo Sugimoto, ISBN 4-9902916-0-3, Part 2, 365-368.

WOLFRAM, E., SALVADOR, J., D'ELIA, R., GODIN-BEECKMANN, S., PAZMIÑO, A., NAKANE, H., QUEL, E., (2008), Monitoring Ozone Hole Dilution Process In Río Gallegos, Argentina Using Dial Measurements, Reviewed and Revised Papers Presented at the 23rd International Laser Radar Conference 24th ILRC, p. 798, Boulder, Colorado.

World Health Organization, (2008), International Agency for Research on Cancer. Vitamin D and cancer. IARC Working Group Reports, WHO Press, 5, 148.