

SISTEMA DIAL PARA MEDICIÓN DEL PERFIL DE OZONO ESTRATOSFÉRICO.

A. F. Pazmiño⁽¹⁾, M. B. Lavorato, G. J. Fochesatto, P. R. Ristori⁽¹⁾, P. A. Cesarano, E. J. Quel, S. Godin⁽²⁾, G. Megie⁽²⁾

CEILAP (CITEFA-CONICET)- Zufriategui 4380-1603 Villa Martelli-Argentina.

⁽¹⁾Universidad de San Martín- Peatonal 52 3563-1650 San Martín-Argentina

⁽²⁾Institut Pierre Simon Laplace. Université Paris VI. Paris. France.

apazmin@citefa.gov.ar

Desde diciembre de 1998 está operativo un sistema DIAL (Differential Absorption Lidar) en el CEILAP (CITEFA-CONICET), sito en Villa Martelli (34° 33' S, 58° 30' O) para la medición del perfil de ozono estratosférico, habiéndose comenzado a realizar mediciones sistemáticas entre los 15 y 40 km. En el hemisferio sur existen otros tres sistemas operativos: uno en Nueva Zelanda y dos en la Antártida, en las bases Mc Murdo y Dumont D'Urville. Se describe además de las ecuaciones de la técnica DIAL y los errores (estadístico y sistemático), la influencia del perfil de temperatura en la sección eficaz de ozono. Para esto último se utilizaron los datos del radiosondeo del día de Ezeiza, suministrados por el SMN, que habitualmente llegan a los 25 km de altura, extrapolándose con el modelo CIRA hasta los 45 km. Los resultados obtenidos en las mediciones de los perfiles de ozono se comparan con los datos satelitales del SAGE II (Stratospheric Aerosol and Gas Experiment II). La implementación de esta técnica permitirá estudiar la evolución del perfil de la capa de ozono sobre Buenos Aires.

A new DIAL station is implemented at Buenos Aires (34° 33' S, 58° 30' W) since December 1998 for systematic ozone profile measurements in the bass stratosphere between 15 and 35 Km. The basic DIAL equations and its statistical and systematic errors are described. The influence of temperature in ozone cross section is taking in count considering the radiosounding data, which is extrapolated with standard model (CIRA) for high altitudes. The ozone profiles are compared with SAGE II satellite files.

1. INTRODUCCIÓN

Se desarrolló, construyó y se puso a punto un sistema lidar de absorción diferencial para la medición de perfiles de ozono entre 15 y 35 km.

El principio de funcionamiento de un sistema LIDAR (LIGth Detection and Ranging)^[1] es el mismo que el de un radar pero en vez de emplear ondas de radio se utiliza radiación luminosa. Para la medición de distintos gases que se encuentran en la atmósfera, se emplea la técnica DIAL que utiliza dos señales Lidar, una en el espectro de absorción del ozono, y otra fuera de él. Es una herramienta poderosa puesto que no depende de las constantes instrumentales

2. ECUACIÓN DIAL

Esta técnica emplea dos longitudes de onda láser para determinar la distribución espacial de los gases en la atmósfera. Una de las frecuencias corresponde a una línea de absorción fuerte de la especie a monitorear (O_3) llamada λ_{on} y la otra, se ubica muy cerca de la anterior pero en donde la especie no tiene absorción o es casi despreciable, denominada λ_{off} . Por un lado, ambas longitudes deben estar lo más cerca posible para minimizar la influencia por la dispersión Rayleigh y Mie (minimización del error sistemático). Por otro lado, λ_{on} y λ_{off} deben estar lejos de tal manera que la diferencia entre las secciones eficaces sea lo más grande posible (minimización del error estadístico). La elección de estas longitudes de onda se basó en el compromiso de minimizar ambos errores en la baja estratósfera^[2].

La ecuación Dial que determina la concentración de ozono en función de la altura está compuesta por dos términos^[3]:

$$n_{O_3} = n_{O_3}^{med} + \delta n_{O_3} \quad (1)$$

donde

$$n_{O_3}^{med}(z) = \frac{1}{2 \cdot \Delta\sigma_{O_3}} \cdot \frac{d}{dz} \ln \frac{N(\lambda_{off}, z)}{N(\lambda_{on}, z)} \quad (2)$$

$N(z, \lambda_i)$ número de fotones retrodispersados a la longitud de onda λ_i por una capa atmosférica Δz situada a una distancia z , durante el tiempo de integración Δt .

$\sigma_{O_3}(\lambda_i)$ sección eficaz del ozono para λ_i .

$$\delta n_{O_3} = (\varepsilon_{diff}(z) + \varepsilon_m(z) + \varepsilon_p(z) + \varepsilon_e(z)) \cdot n_{O_3} \quad (3)$$

$\varepsilon_{diff}(z)$, $\varepsilon_m(z)$, $\varepsilon_p(z)$, $\varepsilon_e(z)$ son los términos que involucran la difusión atmosférica, la atenuación por moléculas, por partículas y por otros constituyentes de la atmósfera (excluyendo el ozono)^[2].

3. ERRORES

El error relativo $\delta n_{O_3}/n_{O_3}$ en mediciones con la técnica DIAL se puede expresar como la suma de dos términos $\varepsilon_1 + \varepsilon_2$, que corresponden a los errores estadístico y sistemático respectivamente. Por un lado, el error estadístico proviene de la incertidumbre sobre la señal detectada y depende fuertemente del proceso aleatorio de detección adoptado para la medición.

Determina los límites de la medición DIAL puesto que está directamente comprometido con el intervalo de confianza del valor medido y con la resolución del sistema. Por otro lado, el error sistemático está ligado a la aproximación teórica sobre la concentración de ozono en la ecuación (1), al no considerar el término complementario (3), y a la incertidumbre sobre los distintos parámetros de la ecuación teórica que también influyen en el intervalo de confianza.

3.1. Error estadístico

La técnica DIAL para la medición de la capa de ozono estratosférica se basa en la técnica de fotoconteo o cuenta de fotones mediante un fotomultiplicador. La probabilidad de arribo de los fotones al sensor cumple con la estadística de Poisson (eventos discretos)^[4]. Tomando esto en cuenta y considerando despreciable el término complementario, el error estadístico ϵ_1 es definido como:

$$\epsilon_1 = \frac{\delta_{O_3}}{n_{O_3}} = \frac{\sqrt{\text{var}(n_{O_3})}}{n_{O_3}} \quad (4)$$

Si se limita el desarrollo del cálculo de la varianza de n_{O_3} a un segundo orden, y cumpliendo ciertas condiciones en la detección^[5]:

$$\epsilon_1 = \frac{1}{2 \cdot \Delta\sigma_{O_3} \cdot \Delta z} \cdot \sqrt{\sum_{i,j}^2 \frac{N_{T_{i,j}}}{t_{i,j} \cdot (N_{T_{i,j}} - N_{NL_i})^2}} \quad (5)$$

donde

- $N_{T_{i,j}}$ señal recibida a la longitud de onda λ_i , proveniente de la altura z_j .
- N_{NL_i} señal ligada al ruido de fondo de cielo y a la corriente de oscuridad, en la longitud de onda λ_i .

3.2. Error sistemático

Se han realizado distintos trabajos para determinar los valores de la sección eficaz de absorción del ozono, entre ellos los valores experimentales medidos por Bass et Paur^[6], cuya precisión es del 2 % en la región espectral de nuestro interés. En su trabajo incluyen los efectos de la temperatura que varía con la altitud. La incertidumbre en la sección eficaz se minimiza utilizando datos experimentales de perfil de temperaturas en el mismo lugar donde se realizan las mediciones de ozono (datos de radiosonda combinados con mediciones Lidar de temperatura o en su defecto, utilizar datos estándares estacionales como los dados por el CIRA).

Por otro lado, el término complementario de la ecuación Dial debido a la difusión y absorción del haz láser por moléculas y partículas de la atmósfera (a excepción de la absorción por el ozono) y otros constituyentes mayoritarios, puede interpretarse como una concentración de ozono equivalente.

El error relativo $\epsilon_m(z)$ de n_{O_3} debido a la

atenuación molecular (Rayleigh), se escribe como:

$$\epsilon_m(z) = - \frac{\alpha_m(\lambda_{on}, z) - \alpha_m(\lambda_{off}, z)}{n_{O_3}(z) [\sigma_{O_3}(\lambda_{on}) - \sigma_{O_3}(\lambda_{off})]} \quad (11)$$

con

$$\alpha_m(\lambda_i, z) = \sigma_m(\lambda_i) \cdot n_t \quad (12)$$

$$\sigma_m(\lambda) = 4,02 \cdot 10^{-28} \cdot (1/\lambda)^{4+Y} \text{ (cm}^2\text{)} \quad (13)$$

$$Y = 0,389 \cdot \lambda + 0,09426/\lambda - 0,3228 \lambda \text{ (}\mu\text{m)} \quad (14)$$

donde

$\sigma_m(\lambda)$ sección eficaz de atenuación por Rayleigh a la longitud de onda λ ,

$n_t(z)$ concentración molecular total a la altura z

El error relativo $\epsilon_p(z)$ de n_{O_3} debido a la atenuación por partículas, se escribe como:

$$\epsilon_p(z) = - \frac{\alpha_p(\lambda_{on}, z) - \alpha_p(\lambda_{off}, z)}{n_{O_3}(z) [\sigma_{O_3}(\lambda_{on}) - \sigma_{O_3}(\lambda_{off})]} \quad (15)$$

Para obtener el coeficiente $\alpha_p(\lambda_{on}, z)$, se debe conocer de forma precisa la naturaleza (tamaño y tipo) de las partículas^[7].

La ecuación del error relativo por dispersión atmosférica $\epsilon_{diff}(z)$ de n_{O_3} es la siguiente:

$$\epsilon_{diff}(z) = \frac{1}{2 \cdot \Delta\sigma_{O_3} \cdot n_{O_3}(z)} \left[\frac{d}{dz} \ln \frac{\beta(\lambda_1, z)}{\beta(\lambda_2, z)} \right] \quad (6)$$

donde $\beta(\lambda_j, z)$ es la suma de la contribución de partículas (p) y de moléculas (m)^[7]:

Los constituyentes de la atmósfera que presentan espectros de absorción con valores comparables al del ozono son el dióxido de azufre (SO₂) y el dióxido de nitrógeno (NO₂). La contribución de estos elementos al cálculo de la incertidumbre en la concentración del ozono es la siguiente:

$$\epsilon_e = \frac{\sum_{i=1}^2 [\sigma_{e_i}(\lambda_1) - \sigma_{e_i}(\lambda_2)] \cdot n_{e_i}(z)}{[\sigma_{O_3}(\lambda_1) - \sigma_{O_3}(\lambda_2)] \cdot n_{O_3}(z)} \quad (7)$$

donde

n_{e_i} concentración de SO₂ (1), NO₂ (2).

σ_{e_i} sección eficaz de SO₂ ó NO₂ a la longitud de onda λ .

Excepto en períodos volcánicos, la concentración de SO₂ disminuye muy rápidamente a altitudes superiores a la capa límite, no interfiriendo con las mediciones de ozono en la estratosfera. En cambio la contribución del NO₂ no es despreciable puesto que su sección eficaz es alrededor del doble de la del ozono a las longitudes de onda λ_1 y λ_2 .

4. INSTRUMENTAL

El dispositivo instrumental utilizado es representado en la figura 1. Está compuesto por tres subsistemas bien definidos e independientes entre sí: el emisor, el receptor y la detección y adquisición de las señales.

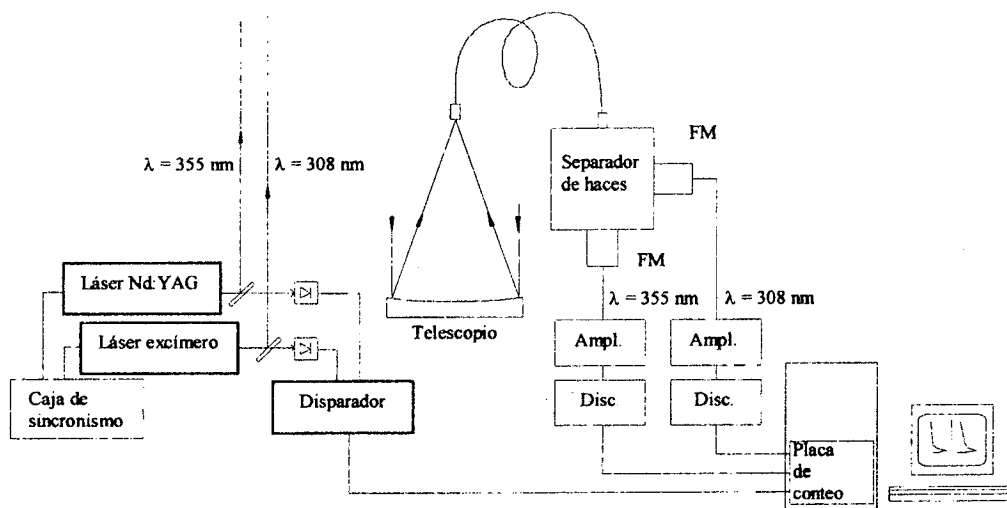


Figura 1. Esquema del sistema experimental implementado en el CEILAP.

4.1 Sistema emisor

El sistema emisor está comprendido por dos fuentes láser, una de excímero en 308 nm y la otra de Nd:YAG en 355 nm. Nuestro sistema utiliza los láseres de forma alternada mediante un generador de sincronismo externo.

El láser que emite en la longitud de onda de referencia está basado en la tercera armónica de un láser de Nd:YAG. La energía de salida máxima en 355 nm es de 225 mJ con pulsos de 5 ns de duración y una frecuencia de repetición máxima de 10 Hz. El segundo láser está basado en un excímero de XeCl. Su energía de salida máxima es de 300 mJ en 308 nm (cavidad inestable) y divergencia de 0,4 mrad, con pulsos de 20 ns de duración y una frecuencia de repetición máxima de 100 Hz y 40 Watt de potencia media.

4.2. Sistema receptor

El receptor está constituido por un telescopio de montaje de tipo newtoniano, con un espejo parabólico aluminizado de calidad astronómica, de 500 mm de diámetro y apertura $f/2$, en cuyo foco se encuentra una fibra óptica de 0,94 mm de diámetro efectivo, apertura numérica de $0,22 \pm 0,02$, atenuación en dB/m de 0,27 en 308 nm y de 0,2 en 355 nm. La pérdida de señal por utilizar una fibra con apertura numérica inferior a la del telescopio es de un 22 %. La señal a la salida de la fibra se encuentra en el foco de un lente de cuarzo dentro de la caja separadora de haces, de manera que la señal retrodifundida llegue colimada al microscopio que separará a 45° las longitudes de onda de 308 y de 355 nm, reflejando la primera con una eficiencia superior al 99 % y transmitiendo la segunda al 85 %. Luego, cada señal pasa por un filtro interferencial centrado en la onda correspondiente con un ancho espectral de 10 nm y con una eficiencia en la transmisión del 25 %.

4.3. Sistema de detección y adquisición de las señales

Las señales de 308 y 355 nm son detectadas cada una por un fotomultiplicador de baja corriente de oscuridad (ruido debido a la inserción de este sensor en el sistema)

y especializado para conteo de fotones. Cada fotón es transformado en una corriente de electrones con una eficiencia cuántica de 11,5 %. Luego cada señal es incrementada cinco veces mediante amplificadores para lograr señales más fuertes y que no se genere un doble pulso. Seguidamente, pasan por un discriminador para cada canal, mejorando la relación señal a ruido mediante un offset ajustable que determina el nivel de señal admitida. Posteriormente, cada señal es adquirida en forma alternada y mediante un sincronismo óptico externo, por una placa de conteo rápida de doble canal. El software de la placa nos permite determinar el perfil vertical de adquisición de las señales o grupo de bins, donde cada bin puede variar de 30 a 30.712 metros debido al tamaño de cada contador (12 bits).

5. RESULTADOS

Se hicieron estudios progresivos de las mediciones para lograr una mejor performance del sistema y así obtener un mejor resultado de la concentración de ozono. Si bien esta técnica es totalmente independiente de la constante instrumental para cada vía (308 y 355 nm), se deben ajustar ciertos parámetros del mismo (energía del pulso láser, tensión de los fotomultiplicadores, amplificación y nivel de discriminación) de manera de reducir el error estadístico y tener una mejor relación S/R para cada canal (fig. 2).

El número de fotones retrodispersados $N(\lambda, z)$ tanto para la longitud de onda de 308 como para la de 355 nm es almacenado separadamente en la placa de conteo para cada bin. Se les resta el ruido de fondo de cielo y la corriente de oscuridad respectivos a cada vía caracterizándolos mediante un polinomio de segundo orden en los últimos kilómetros medidos. Luego se le aplica el logaritmo neperiano a cada una de ellas potenciada en rango, quedando la ecuación (2) escrita como:

$$\frac{1}{2\Delta\sigma_0} \frac{d}{dz} \left[\ln \left((N(\lambda_{\text{off}}, z) - r_{\lambda_{\text{off}}}) z^2 \right) - \ln \left((N(\lambda_{\text{on}}, z) - r_{\lambda_{\text{on}}}) z^2 \right) \right] \quad (10)$$

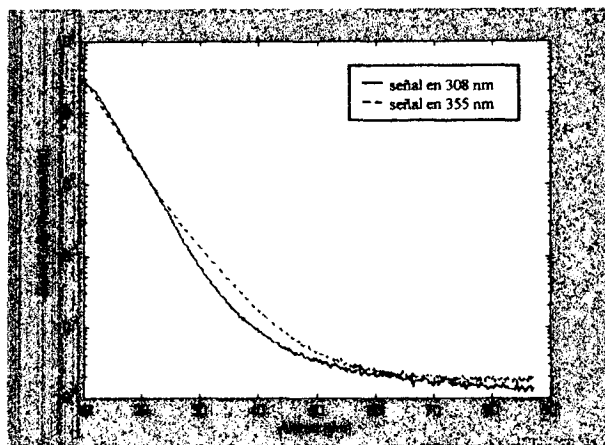


Figura 2. Perfil de fotones retrodispersados en 308 y 355 nm.

Para obtener la derivada de cada logaritmo, se utilizó el método de la pendiente aplicando una regresión lineal de primer orden para cada punto $f(z) = a + b z$, teniendo en cuenta la resolución vertical para lograr un error estadístico en todo el perfil de ozono menor al 5%. Se tomó como derivada el coeficiente b . El parámetro $\Delta\sigma_{O_3}$ es la diferencia entre las secciones eficaces de absorción $\sigma_{\lambda_{on}}$ y $\sigma_{\lambda_{off}}$. Para reducir la influencia de la temperatura en la sección eficaz de ozono en 308 nm y tomando el modelo de Bass et Paur^[2], se utilizaron los datos del radiosondeo de Ezeiza de las 0 UTC (9 de la noche de medición) ó de las 12 UTC (9 de la mañana siguiente) hasta la altura máxima del mismo. Para lograr llegar a 50 km, se prolongó la curva con los datos de temperatura dados por el CIRA^[8].

Se muestran los resultados de abril del corriente año de perfiles de ozono (fig. 3). El rango de los perfiles es de 15 a 35 km con una resolución vertical en la adquisición de 150 m. Una comparación de nuestros resultados con los datos obtenidos del SAGE II se muestra en la fig. 4.

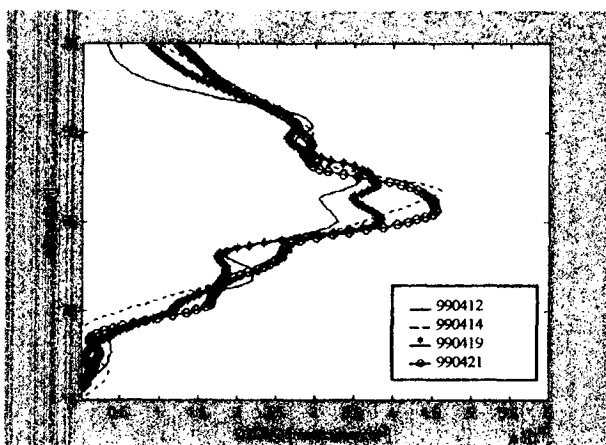


Figura 3. Perfiles de ozono en la baja estratosfera con una resolución vertical de 150 m.

6. CONCLUSIONES

Desde diciembre de 1998 está operativo un sistema DIAL para la medición del perfil de ozono estratosférico, realizándose mediciones en la baja estratosfera (entre 15 y 35 km) en forma sistemática con una resolución en la

adquisición de 150 metros. Se espera realizar algunos ozonosondeos mediante la radiosonda de Ezeiza para comparar y validar los resultados medidos por este sistema.

El método DIAL es efectivo en el caso de que la presencia de aerosoles estratosféricos sea despreciable. Para evitar este posible inconveniente, se implementará un sistema Lidar-Raman que adquiere las señales de 308 y 355 nm, y sus respectivas señales Raman del nitrógeno (332 y 387 nm). También se detectará la señal Raman proveniente del vapor de H_2O (347,1 nm).

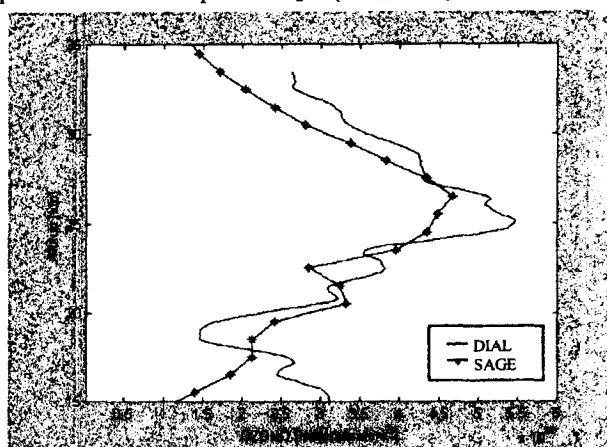


Figura 4. Comparación del perfil de ozono del día 30/3/99 obtenido por el sistema Dial (34°S, 58°O) con el resultado del SAGE II (36°S, 59°O)

7. REFERENCIAS

- [1] Megie, G., Menzies, R. T., Complementary of UV and IR Differential Absorption Lidar for Global Measurements of Atmospheric Species. Appl. Opt., vol 19, p. 1173, 1980.
- [2] Godin, S., Etude Expérimentale par Télédétection Laser et Modélisation de la Distribution Verticale d'Ozone dans la Haute Province, Thèse d'Etat, Paris, 1987.
- [3] Measures R. M., Laser Remote Sensing: Fundamentals and Applications, Wiley, Interscience, 1984.
- [4] Schockley W., Pierce J. R., A Theory of Noise for Electron Multipliers, Proc. I. R. E., vol 26, p. 321, 1938.
- [5] Pelon J., Distribution Verticale de l'Ozone dans la Troposphère et la Stratosphère: Etude Expérimentale par Télédétection Laser et Application aux Echanges Troposphère - Stratosphère, Thèse d'Etat, Paris, 1985.
- [6] Bass A. M., Paur, R. J., The Ultraviolet Cross-section of Ozone: I. The Measurements, Proc. of the Quad. Ozone Symposium, p. 606, Reidel, 1985.
- [7] Fochesatto, G. J., Lavorato, M. B., Peuriot, A. L., Quel, E. J., Rosito, C. A., Santiago, G. D., Simulación de señales de retrodispersión lidar. Anales AFA, vol. 16, p. 117, 1994.
- [8] Labitzke, K., Barnett, J. J., Edwards, B., Middle Atmosphere Program. Handbook for Map, vol 16. Julio 1985.