

Nuevo sistema lidar de seis longitudes de onda en el CEILAP

New Lidar System of six wavelengths at CEILAP

L. Otero^{1,3}, P. Ristori², J. Dworniczak¹, O. Vilar¹, E. Quel¹

1. CEILAP (CITEFA-CONICET) - Juan B. de La Salle 4397 - B1603ALO Villa Martelli, Argentina. Email: quel@citefa.gov.ar

2. Laboratoire de Pollution de l'Air et du Sol, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse. Email: pablo.ristori@epfl.ch

3. CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) Av. Paseo Colón 751 - C1063ACH Capital Federal, Argentina.
Email: lotero@citefa.gov.ar

Un nuevo sistema LIDAR de retrodifusión de seis longitudes de onda fue diseñado y construido en el Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones, CEILAP (CITEFA-CONICET), (34.5° S, 58.5° W). Este sistema puede medir simultáneamente seis longitudes de onda, tres elásticas 1064, 532 y 355 nm, correspondiendo a la línea fundamental del sistema emisor láser y a la primera y segunda armónica respectivamente y tres longitudes de onda Raman, 387 y 607 nm correspondientes a la línea de nitrógeno y 408 nm de vapor de agua. El sistema emisor está constituido por un láser de Nd:YAG Continuum Surelite III P-IV (650 mJ @ 1064 nm 10 Hz). La recepción está constituida por un telescopio newtoniano de 50 cm de diámetro, f/2. El detector para 1064 nm es un fotodiodo de avalancha Licel (Si-APD). Los detectores de las otras cinco longitudes de onda son fotomultiplicadores Hamamatsu 6780-03. El objetivo fundamental de este nuevo sistema es estudiar las propiedades ópticas de los aerosoles discriminadas en altura, la evolución de la capa límite atmosférica y vapor de agua.

Palabras claves: aerosoles, lidar, tropósfera, capa límite, vapor de agua.

A new 6 wavelength backscatter LIDAR system was designed and developed at Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones, CEILAP (CITEFA-CONICET), (34.5° S, 58.5° W). This system can measure simultaneously six wavelength, three elastic 1064, 532 and 355 nm, corresponding to the fundamental laser line of the emission system, and the first and second harmonic respectively and three Raman, 387 and 607 nm corresponding to nitrogen and 408 nm corresponding to the 408 nm water vapor line. The emission system is a Nd:YAG laser Continuum Surelite III P-IV (650 mJ @ 1064 nm 10 Hz). The reception is a 50 cm f/2 Newtonian telescope. The 1064 nm detector is an avalanche photodiode Licel (Si-APD). The detectors for the other wavelengths are photomultipliers Hamamatsu 6780-03. The main objective of this system is to study the height dependent aerosol optical properties, the boundary layer evolution and the water vapour profiles.

Key words: aerosols, lidar, troposphere, boundary layer, water vapor.

I. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se presenta un nuevo sistema lidar multilongitud de onda para el sensado remoto de las propiedades intensivas y extensivas de los aerosoles y vapor de agua en la troposfera. La incorporación de tres canales Raman procedentes de la excitación láser de gases atmosféricos, dos procedentes nitrógeno atmosférico y la tercera correspondiente al vapor de agua, implican una mejora importante frente al sistema anterior multilongitud de onda puramente elástico⁽¹⁾. Las señales Raman procedentes de la excitación del nitrógeno nos permiten un estudio de la extinción y retrodifusión atmosférica libre de las hipótesis de Klett^(2,3) y Fernald⁽⁴⁾ que relacionan la extinción a la retrodifusión atmosférica. El estudio de las propiedades ópticas de los perfiles de aerosoles nos permitirán realizar importantes avances para el estudio de la química de la atmósfera y para el monitoreo de la polución atmosférica.

II. EL SISTEMA DE MEDICIÓN

El objetivo propuesto consiste en el en diseño, desarrollo y construcción de un sistema lidar

multilongitud de onda Raman en el CEILAP (CITEFA - CONICET) permite el estudio de la tropósfera comenzando a los 300 m y alcanzando la tropopausa. En este dominio espacial nuestro interés consiste en la obtención de perfiles de extinción y retrodifusión de aerosoles locales y de transporte, el sensado del ciclo diurno y nocturno de la capa límite atmosférica y el vapor de agua, la interacción del vapor de agua con los aerosoles higroscópicos y finalmente el sensado de cirrus. El sistema emisor está basado en un láser sólido Nd:YAG (Continuum Surelite III P-IV) de 10 Hz de repetición. La longitud de onda fundamental es 1064 nm con una energía de 600 mJ. El láser genera además la primera y segunda armónica, 532 nm y 355 nm respectivamente. El sistema receptor está formado por un telescopio newtoniano de 1 m de distancia focal y 50 cm de diámetro que concentra la luz en una fibra óptica de 1 mm de diámetro y apertura numérica de 0,23. La señal óptica es transmitida a una caja espectrométrica o policromador que separa las tres longitudes de onda elásticas (1064, 532 y 355 nm) y las tres longitudes de onda Raman que son parte del espectro vibro rotacional espontáneo en la atmósfera al ser excitada con la emisión láser elástica. Las longitudes de onda así estudiadas corresponden a la excitación de las

moléculas de nitrógeno con 355 nm y 532 nm (retrodifusión en 607 nm y 387 nm respectivamente) y de las moléculas de vapor de agua con 355 nm (retrodifusión en 408 nm). Cinco fotomultiplicadores Hamamatsu 6780 – 03 (355 nm, 387 nm, 408 nm, 532 nm y 607 nm) y un fotodiodo de avalancha Licel (Si-APD) (1064 nm) convierten la señal luminosa en una señal eléctrica que es digitalizada en modo analógico para las señales elásticas por un sistema combinado de osciloscopio – placa GPIB y de fotoconteo para las señales inelásticas (sistema Licel). En la Figura 1 se muestra un esquema del sistema y en la Figura 2 una foto del mismo. A la derecha se ve el sistema emisor, luego el telescopio; a la izquierda de la foto se puede ver el sistema de adquisición, un monitor donde se muestra en tiempo real la señal medida y la caja espectrométrica.

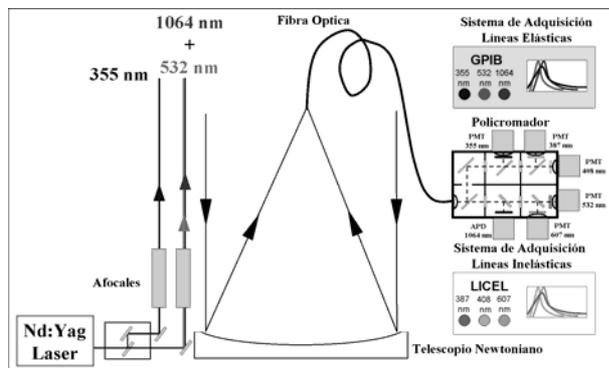


Figura 1. Esquema del sistema lidar



Figura 2. Foto del sistema lidar

III. ECUACIONES LIDAR EMPLEADAS

La ecuación 1 corresponde a la señal lidar de retrodifusión elástica o Rayleigh y la 2 a la señal de retrodifusión inelástica o Raman.

$$P_{\lambda}(z) = K_{\lambda} \frac{O(z)}{z^2} [\beta_{\lambda}^{\text{aer}}(z) + \beta_{\lambda}^{\text{mol}}(z)] \times \exp \left\{ -2 \int_0^z [\alpha_{\lambda}^{\text{aer}}(\xi) + \alpha_{\lambda}^{\text{mol}}(\xi)] d\xi \right\} \quad (1)$$

$$P_{\lambda_R}^X(z) = K_{\lambda_R} \frac{O(z)}{z^2} N^X(z) \frac{d\sigma_{\lambda_R}^X(\pi)}{d\Omega} \times \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha_{\lambda}^{\text{aer}}(\xi) + \alpha_{\lambda}^{\text{mol}}(\xi)] d\xi - \int_0^z [\alpha_{\lambda_R}^{\text{aer}}(\xi) + \alpha_{\lambda_R}^{\text{mol}}(\xi)] d\xi \right\} \quad (2)$$

donde $P_{\lambda}(z)$ y $P_{\lambda}^X(z)$ son las señales lidar elástica medida en la longitud de onda del láser λ e inelástica medidas en la longitud de onda λ_R procedente de la excitación vibro rotacional del gas X con la longitud de onda del láser en función de la altura z; K corresponde a las constantes de los sistemas; O(z) es la función de overlap del sistema; β y α son los coeficientes de retrodifusión y extinción para moléculas (mol) y aerosoles (aer); N es el número de moléculas del gas X excitado de sección eficaz Raman de retrodifusión $d\sigma_{\lambda_R}^X(\pi)/d\Omega$

Como la señal lidar Raman se encuentra solo afectada por el número de moléculas del gas medido es posible calcular la extinción de los aerosoles usando el perfil molecular de la atmósfera calculado a partir del radiosondeo y aplicando la Ley de Ångström (ecuación 3).

$$\frac{\alpha_{\lambda}^{\text{aer}}(z)}{\alpha_{\lambda_R}^{\text{aer}}(z)} = \left(\frac{\lambda_R}{\lambda} \right)^{-\hat{A}(z)} \quad (3)$$

donde \hat{A} es el Coeficiente de Ångström en función de la altura que puede variar entre 0 y 4.

Combinando las ecuaciones 2 y 3 se obtiene el coeficiente de extinción de aerosoles para una región lo suficientemente distante para que O(z) sea igual a 1.

$$\alpha_{\lambda}^{\text{aer}}(z) = \frac{\frac{d}{dz} \left\{ \ln \left(\frac{N_R(z)}{P_{\lambda_R}^X(z) z^2} \right) \right\} - \alpha_{\lambda}^{\text{mol}}(z) - \alpha_{\lambda_R}^{\text{mol}}(z)}{1 + \left(\frac{\lambda}{\lambda_R} \right)^{\hat{A}(z)}} \quad (4)$$

De las ecuaciones 1, 2 y 4 se puede calcular el coeficiente de retrodifusión de la siguiente forma:

$$\beta_{\lambda}^{\text{aer}}(z) = \left\{ \left[\beta_{\lambda}^{\text{mol}}(z_0) + \beta_{\lambda}^{\text{aer}}(z_0) \right] \times \frac{P_{\lambda}(z) N_{\text{R}}^{\text{x}}(z)}{P_{\lambda}^{\text{x}}(z)} \times \frac{P_{\lambda}^{\text{x}}(z_0)}{P_{\lambda}(z_0) N_{\text{R}}^{\text{x}}(z_0)} \right. \\ \left. \times \frac{\exp \left\{ - \int_0^z \left[\alpha_{\lambda}^{\text{aer}}(\xi) + \alpha_{\lambda}^{\text{mol}}(\xi) \right] d\xi \right\}}{\exp \left\{ - \int_0^z \left[\alpha_{\lambda}^{\text{aer}}(\xi) + \alpha_{\lambda}^{\text{mol}}(\xi) \right] d\xi \right\}} \right\} - \beta_{\lambda}^{\text{mol}}(z) \quad (5)$$

donde z_0 es una altura de referencia que normalmente se elige de manera que se cumpla que $\beta_{\lambda}^{\text{mol}}(z_0) + \beta_{\lambda}^{\text{aer}}(z_0) \square \beta_{\lambda}^{\text{mol}}(z_0)$.

Finalmente, conociendo los coeficientes de extinción y de retrodifusión de aerosoles es posible determinar la relación entre ambos.

$$k_p = \frac{\alpha_{\lambda}^{\text{aer}}(z)}{\beta_{\lambda}^{\text{aer}}(z)} \quad (6)$$

IV. RESULTADOS

El día estudiado fue el 21 de junio de 2006. Aplicando la ecuación 4 se calculó el coeficiente de extinción de aerosoles para 355 y 532 nm el cual se presenta en la Figura 3

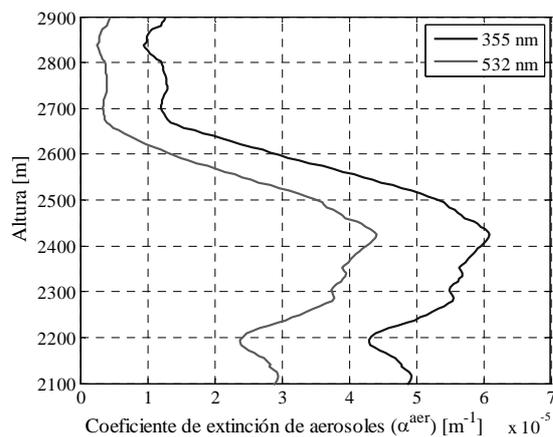


Figura 3. Extinción de aerosoles en función de la longitud de onda y de la altura.

Para esto se derivó el coeficiente de Ångström de forma iterativa, comenzando con un valor arbitrario de uno, según lo propuesto por los trabajos de Ansmann^(5,6) y recalculando el mismo a partir de los valores obtenidos para el coeficiente de extinción para las dos longitudes de onda. El resultado final del proceso de iteración para el cálculo del coeficiente de Ångström se presenta en la Figura 4.

Entre 2700 y 2900 m la extinción de aerosoles se reduce mientras que el coeficiente de Ångström alcanza un valor de tres. Esto implica la presencia de partículas de diámetro de valor reducido frente a las longitudes de onda empleadas tal como lo predice la teoría de Mie. Recordemos que el valor del coeficiente de Ångström en el caso de partículas muy pequeñas tiende asintóticamente a cuatro, igual valor que tiene el comportamiento espectral de la extinción molecular.

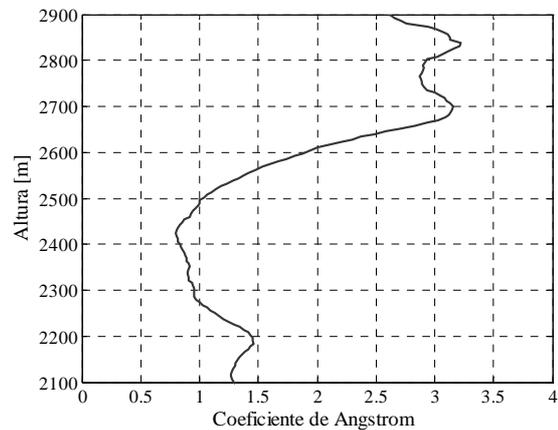


Figura 4. Variación del coeficiente de Ångström en función de la altura.

Aplicando sucesivamente la ecuación 5 y 6 se calculó el valor de k_p , presentado en la Figura 5. Nótese que para partículas pequeñas este valor coincide con el k_p correspondiente a moléculas, $8\pi/3$, señalado en la figura como “mol”.

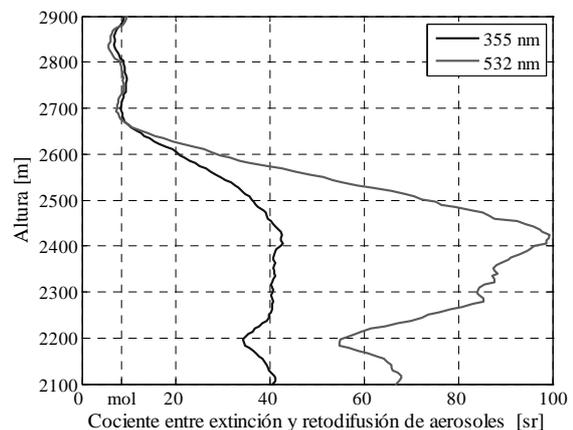


Figura 5. Relación entre la extinción y la retrodifusión en función de la longitud de onda y la altura.

V. CONCLUSIONES

Este trabajo resume el diseño, desarrollo instrumental, construcción, medición, análisis matemático e interpretación de resultados de las primeras señales

Raman medidas en dos dominios espectrales en nuestro laboratorio.

Frente al estudio de señales lidar provenientes de la retrodifusión elástica de moléculas y partículas, las señales Raman tienen la ventaja de no requerir estimación a priori de la relación entre los coeficientes de retrodifusión y extinción de partículas.

El inconveniente de no poseer la relación entre la extinción medida en la longitud elástica y la Raman retrodifundida se resolvió sensando la atmósfera con dos longitudes de onda distintas. En este caso se asumió solamente que en el intervalo de longitudes de onda utilizadas no hay dependencia espectral significativa del coeficiente de Ångström.

Cabe destacar que la medición de dos canales Raman en combinación con el método utilizado para el análisis de los resultados permitió calcular la distribución vertical del coeficiente de Ångström el cual en conjunto con el k_p es un invaluable indicador de las propiedades intensivas de los aerosoles atmosféricos⁽⁷⁾.

VI. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a: la red AERONET, JICA, CONICET, ANPCyT, CONAE y especialmente al Dr. Marcos Machado por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo.

VII. REFERENCIAS

1. Otero L. A., P. Ristori, J. Fochesatto, E. Wolfram, J. Porteneuve, P. H. Flamant, E. Quel. First aerosol measurements with a multiwavelength lidar system at Buenos Aires, Argentina. 22nd International Laser Radar Conference, Matera, Italia, ESA SP 561, Vol II, ISBN 92-9092 // ISSN 0379-6566, 769- 772, June 2004.
2. Klett, J. D., "Lidar calibration and extinction coefficients", *App. Opt.*, 22, 514 – 518, 1983.
3. Klett, J. D., "Lidar inversion with variable backscatter / extinction ratios", *App. Opt.*, 24, 1638 –1643, 1985.
4. Fernald, F. "Analysis of Atmospheric Lidar Observations: Some Comments", *App. Opt.*, 23, 652 - 653, 1984.
5. Ansmann, A., M. Riesbesell and C. Weitkamp, "Measurement of atmospheric aerosol extinction profiles with a Raman lidar", *Opt. Lett.*, 15, 746-748, 1990.
6. Ansmann, A., M. Riesbesell, U. Wandinger, C. Weitkamp, E. Voss, W. Lahmann and W. Michaelis, "Combined Raman elastic-backscatter Lidar for vertical profiling of moisture, aerosol extinction, backscatter and lidar ratio", *Appl. Phys. B55*, 18-28, 1992.
7. Ackermann, J., "The extinction-to-backscatter ratio of tropospheric aerosol: a numerical study", *J. Atm. Oceanic Tech.*, 15, 1043 – 1050 1998.