

# Lidar Raman para la medición de vapor de agua en el CEILAP

E. Wolfram<sup>1,3\*</sup>, J. Salvador<sup>2,3</sup>, J. Dwornizack<sup>3</sup>, P. D'Aulerio<sup>4</sup>, F. Congeduti<sup>4</sup>, J. Porteneuve<sup>5</sup> and E. Quel<sup>3</sup>.

1. BECARIO CONICET

2. BECARIO UTN FRBA

3. CEILAP (CITEFA-CONICET), VILLA MARTELLI, ARGENTINA

4. ISAC, ISTITUTO DI SCIENZE DELL'ATMOSFERA E DEL CLIMA -, ROMA, ITALIA

5. SA, SERVICE D'AERONOMIE, UNIVERSITÉ PIERRE ET MARIE CURIE, PARIS, FRANCIA.

[ewolfram@citefa.gov.ar](mailto:ewolfram@citefa.gov.ar)

Un nuevo lidar Raman de retrodifusión para la detección de vapor de agua atmosférico ha sido desarrollado en el Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones, CEILAP (CITEFA-CONICET) ubicado en Villa Martelli, Pcia. de Buenos Aires, Argentina. Este instrumento utiliza como emisor un láser de excímero (CIXe) con pulsos de 400 mJ en 308 nm y un rango de frecuencias de repetición entre 10-100 Hz. Los fotones dispersados inelásticamente por las moléculas de nitrógeno y de vapor de agua de la troposfera son recolectados simultáneamente por cuatro telescopios newtonianos f/2 de 50 cm de diámetro. Este sistema forma parte de un laboratorio móvil montado en un contenedor transportable que permitirá realizar mediciones en diferentes puntos geográficos del país y zonas adyacentes. Se presenta una descripción detallada del instrumento y una modelización de la señal de retrodifusión esperada para los contenidos de vapor de agua típicos en Buenos Aires. También se muestran las primeras mediciones de perfiles de vapor de agua en el CEILAP obtenidas con este lidar Raman de retrodifusión, comparándose con los valores de la relación de mezcla de vapor de agua medidos por la radiosonda de Ezeiza.

A new Raman backscatter Lidar for the detection of atmospheric water vapor was developed at CEILAP (Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones) in Buenos Aires, Argentina. This instrument uses an Excimer laser (XeCl), with pulse energy of 400 mJ @ 308 nm, and a repetition rate of 100 Hz. The backscatter photons of inelastic Raman scattering of nitrogen and water vapor molecules are simultaneously collected by four 50-cm Newtonian telescopes. All this system will be inside a mobile laboratory and will permit to make measurements in different sites. In this work we present a detailed description of the planned instrument, and the modeling of expected backscatter signal for typically water vapor contents at Buenos Aires city. Also the first measurements of water vapor profile at CEILAP are reported. The comparison between lidar profile and radiosonde water vapor mixing ratio at Ezeiza is presented.

## I. INTRODUCCIÓN

Mediciones detalladas de la distribución del vapor de agua en la atmósfera son requeridas por diferentes temas científicos, incluyendo el cambio global y tópicos relacionados con procesos radiativos (el vapor de agua es el gas de mayor efecto invernadero de la atmósfera<sup>1</sup>). Conocer el contenido de vapor de agua es de suma importancia en una variedad de procesos atmosféricos tales como la formación de nubes y la circulación atmosférica. El lidar Raman es un instrumento capaz de realizar mediciones detalladas con resolución espacio - temporal requeridas por estos y otros estudios<sup>2</sup>.

La relación de mezcla del vapor de agua, la cual se define como la masa de vapor de agua dividida por la masa de aire seco en un dado volumen, se conserva en procesos atmosféricos que no involucren condensación o evaporación. Así la relación de mezcla es útil como un trazador de parcelas de aire y en la comprensión del transporte de energía dentro de la atmósfera. Un mayor conocimiento en la concentración y movimiento del vapor de agua puede conducir a un mejor entendimiento de la formación de nubes, desarrollo de tormentas convectivas y en el ciclo hidrológico.

En el presente trabajo, se describe un lidar de retrodifusión Raman para la determinación de perfiles

de concentración de vapor de agua en la troposfera, diseñado y construido en el Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones, CEILAP (CITEFA-CONICET).

## II. TEORÍA

El *scattering* Raman es un proceso de dispersión molecular débil, caracterizado por un corrimiento en longitud de onda de la radiación dispersada con respecto a una incidente. Este corrimiento puede ser tanto hacia longitudes de onda más grandes o más pequeñas. El corrimiento Raman hacia longitudes de onda más grandes es más efectivo a temperaturas atmosféricas y es conocido como la componente de Stokes de la dispersión Raman. Este es el tipo de dispersión utilizada en el presente trabajo. Parte de la energía de los fotones incidentes es convertida en energía roto-vibracional dentro de la molécula que resulta en el corrimiento en longitud de onda de los fotones dispersados. El valor de este corrimiento depende de la estructura de los niveles de energía roto-vibracionales de la molécula particular estudiada, y es único a esta. Es decir que para un fotón de una cierta longitud de onda incidente, el corrimiento en longitud de onda del fotón dispersado es una identificación de la molécula que esta produciendo el proceso.

El espectro roto-vibracional de la molécula de N<sub>2</sub> correspondiente a la transición vibracional Raman  $\nu = 0-1$  esta desplazado en 2330.7 cm<sup>-1</sup> desde la frecuencia de excitación. Cuando esta es excitada con la emisión del láser de excímero (XeCl) en 308 nm, el centro del espectro desplazado esta en 331,8 nm. El espectro vibracional Raman del vapor de agua esta desplazado por aproximadamente 3652 cm<sup>-1</sup> desde la línea de excitación<sup>3,4</sup>. En respuesta a la radiación de 308 nm, el centro del espectro Raman para el vapor de agua se encuentra en 347 nm.

Las señales de retrodispersión correspondiente a los canales de N<sub>2</sub> en 332 nm y H<sub>2</sub>O en 347 nm están dadas por las siguientes ecuaciones.

$$S_N = \frac{k_N}{z^2} \sigma_N(\pi) n_N(z) q(\lambda_0, z_0, z) q(\lambda_N, z_0, z) \quad (1)$$

$$S_H = \frac{k_H}{z^2} \sigma_H(\pi) n_H(z) q(\lambda_0, z_0, z) q(\lambda_H, z_0, z) \quad (2)$$

donde

$S_x(z)$  es la señal de retorno en el canal  $x$

$\sigma_x(\pi)$  es la sección eficaz de retrodispersión Raman del componente  $x$

$n_x(z)$  es la densidad numérica de la especie  $x$  en función de la altura.

$q(\lambda_x, z_0, z)$  es la transmitancia atmosférica entre el lidar a la altura  $z_0$  y la altura  $z$  a la longitud de onda  $\lambda_x$ , y es igual a

$$q(\lambda_x, z_0, z) = \exp\left(-\int_{z_0}^z \alpha_{\lambda_x}(z') dz'\right) \quad (3)$$

en donde  $\alpha_{\lambda}$  es el coeficiente de extinción volumétrico a la longitud de onda  $\lambda_x$

$k_x$  es la constante de proporcionalidad del canal  $x$ , y que tiene en cuenta la eficiencia óptica del sistema, el área de recepción, la eficiencia espectral del fotomultiplicador y la energía de salida del láser.

El subíndice  $x$  representa parámetros de nitrógeno Raman cuando toma el valor N, y a parámetros del vapor de agua Raman cuando toma el valor H.

### Relación de mezcla del vapor de agua

La relación de mezcla (water vapor mixing ratio) se define como la masa de vapor de agua dividida la masa de aire seco en un dado volumen. Como una función de la altura puede ser expresado como:

$$w(z) = \frac{n_H(z) M_H}{n_d(z) M_d} \quad (4)$$

en donde M indica el peso molecular respectivo.

El nitrógeno se encuentra en proporcione constante con el aire seco dentro de la homósfera (0,~80 km), y principalmente dentro de la tropósfera, en donde se

realizaran las presentes mediciones, y así la señal de retorno Raman del N<sub>2</sub> se usa como una medida de la masa de aire seco.

La relación de mezcla entonces puede ser determinada desde los datos lidar usando las señales Raman del vapor de agua y del nitrógeno. Usando las ecuaciones 1 y 2, podemos expresar la relación de mezcla  $w$  como:

$$w(z) = C_w \Delta q(z, z_0) \frac{S_H(z)}{S_N(z)} \quad (5)$$

donde

$$C_w = \frac{k_N \sigma_N(\pi) M_H n_N}{k_H \sigma_H(\pi) M_d n_d} \quad (6)$$

el cual representa la constante de calibración del sistema para la medición de la relación de mezcla del vapor de agua y

$$\Delta q(z, z_0) = \frac{q(\lambda_N, z_0, z)}{q(\lambda_H, z_0, z)} \quad (7)$$

es la función de corrección en la transmisión en el calculo de  $w$ .

Las transmisividades  $q(\lambda_N, z_0, z)$  y  $q(\lambda_H, z_0, z)$  difieren principalmente en la dependencia de  $\lambda^{-4}$  de la dispersión Rayleigh de las moléculas de aire. La diferencia en la transmisión entre las longitudes de onda  $\lambda_N$  y  $\lambda_H$  como resultado de la dispersión Rayleigh es fácil de contabilizar y es de aproximadamente 5% entre 0 y 7 km. Una corrección adicional es necesaria para la dependencia en longitud de onda de la dispersión Mie de los aerosoles.

### III. MODELIZACIÓN DE LA SEÑAL LIDAR

Con el propósito de cuantificar la variabilidad de las diferentes señales a detectar, se realizó la modelización de la señal de retrodifusión lidar para las longitudes de onda involucradas en el calculo de la concentración de vapor de agua, es decir, 332 nm y 347 nm correspondientes a la dispersión Raman de N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O respectivamente. La señal óptica retrodispersada desde una altura  $z$ , expresada en término de fotoelectrones  $n_s(z)$  por unidad de tiempo<sup>5</sup>, está dada por:

$$n_s(z) = \frac{E_0 \lambda A}{2h z^2} Q_{\lambda} n_{\lambda} \beta_{\pi}(\lambda, z) q(\lambda_0, z) q(\lambda_R, z) \quad (8)$$

Los valores de estos parámetros que caracterizan a nuestro sistema están indicados en la tabla 1.

Tabla I

Longitud de onda $\lambda$ [nm]	Energía por pulso $E_p$ [Joule]	Eficiencia óptica $\eta_{optica}$	Eficiencia cuántica $\eta_{qtk}$	Área efectiva $A$ [m <sup>2</sup> ] (1 telesc)
308	0.200	40%	26%	0.19625
355	0.200	49%	28%	0.19695

Los perfiles de la concentración numérica de nitrógeno y vapor de agua fueron extraídos del radiosondeos de Ezeiza, para distintos meses del año (figura 1).

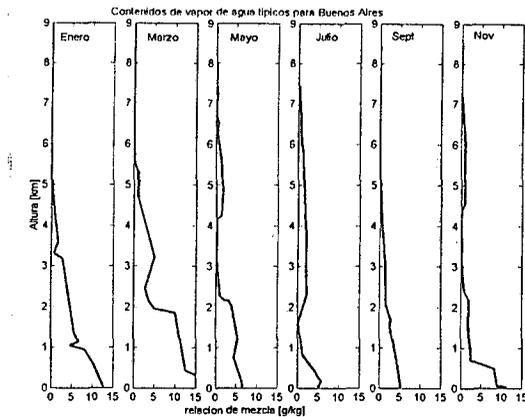


Figura 1. Relación de mezcla (w). Radiosondeos Ezeiza

Los resultados de la modelización de la señal de retrodispersión para las líneas de nitrógeno y vapor de agua se muestran en la figura 2.

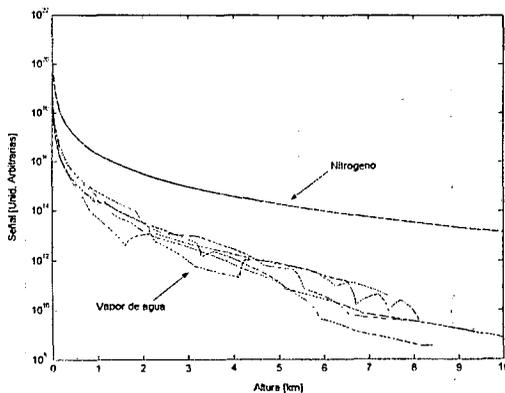


Figura 2. Modelización de la señal lidar

En la misma puede verse la variabilidad que tiene la señal del vapor de agua con respecto a la señal de nitrógeno, que decrece exponencialmente con la densidad del aire.

**Análisis de la relación señal-ruido**

Para mediciones de gran altura en el visible y ultravioleta es necesario utilizar técnicas de fotoconteo. El número medio de cuentas esta dado por:

$$N_s(z) = n_s(z) \cdot \Delta t \cdot f \cdot T_c \quad (9)$$

Donde f es la frecuencia de repetición del láser ,

$$\Delta t = \frac{2 \cdot \Delta z}{c}$$

es el intervalo de conteo correspondiente a una discriminación de altura  $\Delta Z$ , y  $T_c$  el tiempo total de adquisición de la señal.

El número total medio de cuentas adquiridos en estas condiciones será:

$$N_t(z) = (n_s(z) + n_b + n_d) \cdot \Delta t \cdot f \cdot T_c \quad (10)$$

Por tratarse de un proceso de Poisson la relación señal a ruido será:

$$\frac{S}{N} = \frac{n_s(z)}{\sqrt{n_s(z) + n_b + n_d}} \cdot \sqrt{\Delta t \cdot f \cdot T_c} \quad (11)$$

A modo de ejemplo de la utilización de esta ecuación, se simuló la señal en la línea de vapor de agua para una relación de mezcla real extraída de un radiosondeo en Ezeiza, y utilizando la ecuación (11), se determinó la relación señal-ruido correspondiente a un tiempo de integración de cincuenta minutos ( $T_c=50$  min) (figura 3). De la misma puede observarse que para el contenido de vapor de agua correspondiente a esta simulación, si el limite de discriminación entre señal y ruido se fija en un valor 10, en cincuenta minutos de adquisición se llegara a una altura máxima de 5,5 km para este contenido de vapor de agua

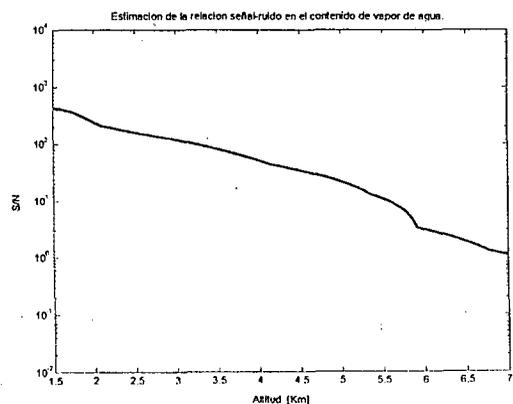


Figura 3. Relación señal a ruido

**IV. COMPARACIÓN CON RADIOSONDEO**

El perfil lidar de vapor de agua correspondiente al 11 de junio de 2003 se comparó con el perfil de humedad medido por la radiosonda

lanzada en Ezeiza para ese día. El mismo corresponde a 20 minutos de adquisición ( $T_c=20$  min) sin filtrado numérico de la señal y se muestra en la figura 4.

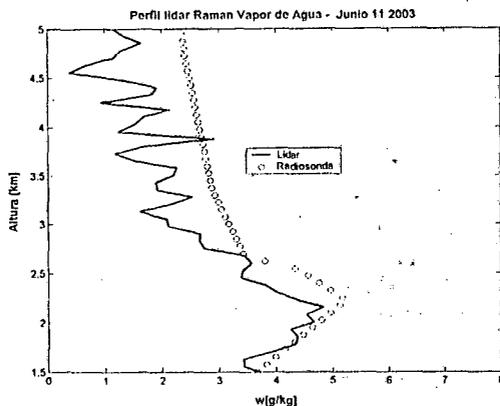


Figura 4. Comparación perfil lidar del contenido de vapor de agua con el medido por la radiosonda

Las señales de retrodispersión Raman de la molécula de nitrógeno y de la molécula de vapor de agua que produjeron el perfil anterior pueden verse en la figura 5. En la misma se aprecia que la señal del nitrógeno (curva superior) a baja altura se encuentra saturada, debido a lo intenso de la señal que llega al fotomultiplicador de las capas bajas de la atmósfera, provocando la pérdida de linealidad del detector. Se prevé solucionar este problema interponiendo un filtro neutro a la señal.

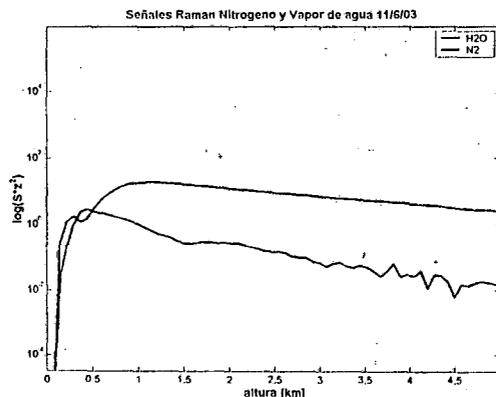


Figura 5. Señales lidar Raman del nitrógeno (curva superior) y del vapor de agua (curva inferior)

## V. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describe un nuevo

sistema lidar Raman montado en el CEILAP que mide perfiles de vapor de agua en la troposfera. Las características instrumentales, conjuntamente con la primera intercomparación con el perfil de humedad extraído de la radiosonda más cercana, son presentados.

El buen acuerdo entre ellas pone de manifiesto la factibilidad del sensado remoto del vapor de agua en función de la altura con la técnica Lidar Raman. Esto permitirá relevar perfiles de vapor de agua prácticamente en tiempo real dentro de los primeros kilómetros de la troposfera, y también del registro de las fluctuaciones, es decir de las funciones estructura del vapor de agua en la atmósfera baja.

Este instrumento comenzará en estos días mediciones rutinarias, sumándose así al conjunto de dispositivos de sensado remoto existentes en el CEILAP.

## Agradecimientos

El presente proyecto contó con el apoyo de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica a través del subsidio PICT 6760 y de la JICA (Japan International Cooperation Agency), a través de la Embajada de Japón en Argentina.

## Referencias

1. Twomy, S., 25 A, 2435-2442, 1991
2. Melfi, S. H. and D. Whiteman, Bull. Am. Meteorolog. Soc. 66, 1288-1292, 1988.
3. Bribes, J. L., et al., Appl. Phys. Lett. 28(6), 336-336, 1976
4. Penney C. M., et al., J. Opt. Soc. Am. 66, 422-425, 1976.
5. Hinckley, E. D., Laser monitoring of the atmosphere, Springer - Verlag Ed., 1976