

La radiación láser. Parte II: LIDAR, una aplicación del láser

Eduardo J. Quel y Pablo Ristori

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

equel@frba.utn.edu.ar

Recibido el 10 de enero de 2023, aprobado el 14 de febrero de 2023

Resumen

Una aplicación de los láseres que resultó ser de gran interés, han sido los sistemas lidar (Light Detection And Ranging). Se da la introducción al significado del acrónimo así como la definición del mismo. Posteriormente se introduce la ecuación del lidar, con una descripción del sistema lidar en su forma más general. Se describen los principales tipos de lidares, sus objetivos y posibilidades de medición. En particular esta descripción abarca también los instrumentos que permiten las mediciones de las dispersiones de Rayleigh-Mie y Raman; el de alta resolución espectral (HSRL) y el lidar de absorción diferencial para la detección lejana de gases (ozono por ejemplo). Se concluye con el lidar de fluorescencia y el de tipo Doppler. Luego se describen a título de ejemplo, sistemas desarrollados en nuestro país como el correspondiente al lidar de retrodifusión y al de absorción diferencial. En todos ellos se hace notar la importancia de los láseres y de las propiedades de la radiación que emiten. Son objetos de descripción también las colaboraciones internacionales que se lograron, así como los objetivos académicos que permitieron la realización de tesis doctorales en Ingeniería.

PALABRAS CLAVE: LIDAR - DISPERSIÓN RAYLEIGH-MIES - DISPERSIÓN RAMAN - ALTA RESOLUCIÓN ESPECTRAL - ABSORCIÓN DIFERENCIAL - LIDAR FLUORESCENTE - LIDAR DOPPLER

Abstract

Systems involving Light Detection And Ranging (lidar) have demonstrated to be a very interesting laser's application. Meaning of this acronym and its definition is introduced. The lidar's equation and a general description of the system are presented too. Different lidar's systems, their goals and measurements capabilities are shown. Among them, these descriptions include the instruments required to allow measurement of Rayleigh-Mie and Raman dispersions, high spectral resolution (HSRL) and the differential absorption lidar applied to remote gas detection (like ozone). Furthermore, fluorescent and Doppler type lidars are both presented. In every case, the purpose of each lidar and their emitted radiation's properties is displayed. As practical examples, a retrodiffusion lidar and a differential absorption lidar were developed and operated in our country. These activities led to successful international cooperations and allow remarkable academic goals. For instance, several Engineering doctoral thesis based on these subjects were completed.

KEYWORDS: LIDAR - RAYLEIGH-MIES DISPERSION - RAMAN DISPERSION - SPECTRAL HIGH RESOLUTION (HSRL) - DIFFERENTIAL ABSORPTION - FLUORESCENT LIDAR - DOPPLER LIDAR

Introducción

Los láseres han tenido innumerables aplicaciones importantes que abarcan variados temas en el espectro de la tecnología y de la ciencia. Una de ellas ha sido el llamado sistema lidar, o simplemente lidar. Este acrónimo proviene de la frase en inglés “*light detection and ranging*”, es decir detección y medición de distancias con luz. La fuente de radiación luminosa más frecuentemente utilizada es la emitida por los láseres, que como es bien sabido tienen características sumamente interesantes.

El primer lidar a nivel internacional, fue construido y desarrollado en 1963, o sea muy poco tiempo después de que funcionara el primer láser en mayo de 1960, fueron sus autores G. Fiocco y L. Smullin (1963), y ello dio lugar a un trabajo que fue la piedra fundamental de esta línea de investigación y desarrollo. Fueron ellos quienes tuvieron la idea de estudiar los pulsos retrodispersados de la radiación láser, cuando era enviada a la atmósfera. Este tipo de instrumento, pronto comenzó a ser utilizado por otros investigadores para realizar mediciones de diversos parámetros atmosféricos, y el lidar fue haciéndose cada vez más popular para estas aplicaciones.

Se han desarrollado así, equipos muy sofisticados utilizando todo el poderío de los diferentes láseres y de sus enormes posibilidades para generar un conocimiento muy importante de diversos de esos parámetros atmosféricos. Este trabajo inicial, dio lugar a una línea de investigación de derivaciones sorprendentes y de gran aplicación e interés, multiplicándose los laboratorios a nivel mundial que encararon este tipo de estudios. Poco tiempo después, también comenzaron los primeros trabajos de las aplicaciones para medir solamente distancias, en cuyo caso el instrumento se lo designa simplemente telémetro láser, o la variante denominada altímetro láser. Por supuesto los trabajos vinculados al lidar dieron lugar a varios libros de texto en el tema y algunas aplicaciones tales como la química y la atmósfera. (Laser Remote Sensing, 1984; Laser Remote Chemical Analysis, 1988 y Elastic Lidar. Theory, Practice and Analysis Method, 2004).

La ecuación del lidar

La ecuación del lidar, a partir de la cual es posible hacer determinaciones de parámetros atmosféricos, en este caso, tiene una expresión simplificada y compacta que contiene los términos que se describen a continuación (Lidar, 2005 y Middleton y Spilhaus, 1955).

Comienza con el envío de pulsos láser al espacio, caracterizados por su potencia, longitud de onda, ancho de banda, ancho de pulso y área ocupada (divergencia del haz). A partir de la recepción de la retrodispersión de la radiación láser, que se va produciendo a medida que los pulsos atraviesan la atmósfera, es posible estudiar las características de la misma, utilizando fotodetectores adecuados, convenientemente seleccionados.

Es posible entonces determinar la potencia recibida $P(z)$ desde una distancia z que va entre el emisor y el punto de la atmósfera donde se detecta el fenómeno a estudiar. Dicha potencia es función de los factores que tienen en cuenta el fenómeno a analizar, el pulso láser y el sistema de detección. Estos factores serán entonces la fracción de luz colectada por el lidar en función de la altura observada, que llamaremos $G(z)$; la capacidad de la atmósfera de retrodispersar la radiación en la dirección de la cual proviene, que se denominará el coeficiente de retrodispersión de la atmósfera $\beta(z)$, y la transmisión atmosférica, es decir cuánta luz atraviesa la atmósfera hasta la distancia z y que vuelve a su punto de partida y que denominaremos $T^2(z)$. Finalmente será necesario tener en cuenta un factor llamado Q que tenga en cuenta la eficiencia de todas las componentes utilizadas en el sistema lidar para transmitir la luz recibida. Será posible entonces escribir la ecuación del lidar en una versión sintética:

$$P(z) = QG(z)\beta(z)T^2(z)$$

Los dos primeros factores Q y $G(z)$ dependen del instrumental usado en la emisión y de la recepción de la radiación láser. Los dos factores $\beta(z)$ y $T(z)$ son los que constituyen los objetivos de estudio e investigación, pues son los que se refieren a la atmósfera, siendo por lo tanto, los parámetros no conocidos de la ecuación. Obsérvese que esto quiere decir que en principio, se tiene una única ecuación con dos incógnitas. Esto generará un problema de cálculo importante que ha sido objeto de trabajos y propuestas de solución del mayor interés en lo que sigue sobre la descripción de los lidares. El desarrollo de estos términos es precisamente el objetivo fundamental, junto con las mediciones que se realicen con el equipo en cuestión. Esto da lugar a diferentes tipos de lidares, según la medición atmosférica que se desee realizar.

El sistema lidar

El sistema lidar básicamente estará constituido a) **por el emisor** láser, que debe ser elegido cuidadosamente en función de su longitud de onda, del ancho de pulso y de su potencia, para definir la altura máxima a la cual se podrán realizar mediciones. El emisor láser puede ser de una o varias longitudes de onda, según las posibilidades del láser y de las mediciones a realizar. Eventualmente pueden ser dos láseres. En segundo lugar, b) **por el receptor** de la radiación que ha sido dispersada, gracias al cual se pueden determinar, por ejemplo, procesos de absorción por parte de alguna componente atmosférica, como es el caso del ozono. Esto permitirá medir la concentración de ese gas, o eventualmente de otros gases, que puedan, por ejemplo, ser contaminantes (Lidar, 2005 y Middleton y Spilhaus, 1955).

Tipos de lidares

Para estudiar y realizar mediciones de los diversos parámetros atmosféricos de interés, es necesario disponer de sistemas lidar adecuados para poder realizar las determinaciones correspondientes. Los lidares deben ser diseñados especialmente. Se darán aquí una breve descripción de los más interesantes sistemas existentes, enumerándose los de mayor interés en aplicaciones atmosféricas (Laser Remote Sensing, 1984 y Middleton y Spilhaus, 1955. Son ellos:

- Lidar de dispersión elástica Rayleigh-Mie
- Lidar de alta resolución espectral (HSRL)
- Lidar de dispersión Raman
- Lidar de absorción diferencial (DIAL)
- Lidar de fluorescencia
- Lidar Doppler

a) Lidar de dispersión elástica Rayleigh-Mie

La dispersión elástica Rayleigh, es la que se produce cuando una radiación láser es dispersada elásticamente por átomos o moléculas y partículas cuyo diámetro es menor o igual a un décimo de la longitud de onda del láser utilizado, pero sin interactuar con los mismos. La dispersión elástica Mie se debe a partículas cuyo diámetro es mayor a un décimo de la longitud de onda de la radiación emitida por el láser utilizado.

Un esquema posible de un sistema lidar es el que se ve en la Figura 1. Un láser emite su radiación que se expande con el fin de reducir su divergencia. En las proximidades del mismo, se encuentra el sistema receptor, que dispone de un espejo de radio de curvatura de unas decenas de cm, con el fin de coleccionar la señal del láser que ha sido dispersada por la atmósfera y que viene con la información correspondiente, pudiéndose así detectar las dispersiones elásticas de Rayleigh y de Mie, o bien constituir los otros tipos de lidares mencionados. En el foco de la misma se coloca convenientemente el detector y el arreglo óptico correspondiente a lo que es necesario detectar.

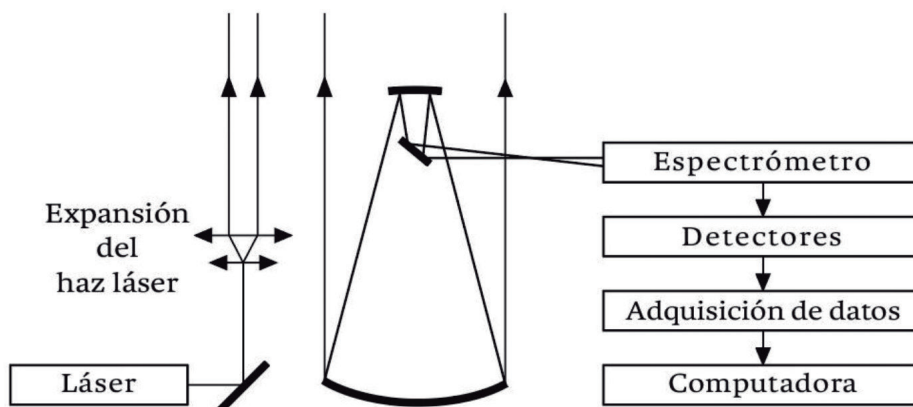


Fig. 1. Esquema de un sistema lidar para el estudio de la atmósfera mediante la utilización de las dispersiones elásticas de Rayleigh y de Mie

b) Lidar de dispersión Raman

La dispersión Raman es inelástica, lo cual significa que la radiación incidente interactúa con las moléculas produciendo un tipo de dispersión que se denomina Raman, que es unas 1000 veces menos intensa que las dispersiones anteriores, y cuyo corrimiento espectral es característico de las moléculas que las producen. El sistema lidar se debe construir teniendo en cuenta la intensidad de la señal y la longitud de onda resultante de esta interacción.

c) Lidar de alta resolución espectral o HSRL (por su nombre en inglés)

El lidar HSRL como se lo suele denominar habitualmente, viene a resolver el problema que se ha señalado en la ecuación del lidar, que es una sola ecuación con dos incógnitas que son los coeficientes involucrados en los términos $\beta(z)$ y $T(z)$ de la ecuación lidar. Alternativamente se aplicaba una técnica para resolver este problema, llamada de Klett-Fernald y que consistía en establecer una relación entre ambos coeficientes, y de ahí obtener la solución.

El lidar HSRL viene a presentar una segunda solución, midiendo la retrodispersión de moléculas y no de partículas y moléculas, como en el método anterior. Ello es posible lograrlo utilizando el efecto Doppler que se produce cuando los fotones de la radiación láser del sistema lidar son dispersados en la interacción con las moléculas que están en movimiento aleatorio térmico. Las velocidades de dicho movimiento son del orden de los 300 m/s, valores que producen significativos desplazamientos Doppler. En contraste, en su movimiento térmico las velocidades de las partículas como los aerosoles, vapor de agua, u otras, son del orden de 10 m/s y para la turbulencia (1m/s), produciéndose así desplazamientos Doppler del orden de 1000 veces menor que en el caso anterior. De esta forma bloqueando la luz en la longitud de onda del láser en la recepción, solo se medirá la luz correspondiente a longitudes de onda cercanas a la misma, correspondiente a la retrodispersión de moléculas.

d) Lidar de absorción diferencial o DIAL (por su nombre en inglés)

Este sistema lidar permite estudiar gases presentes en la atmósfera como son por ejemplo el ozono, el vapor de agua, el oxígeno y otros que pueden ser contaminantes. Para ello, lo que se hace es excitar el gas que se desea estudiar en su banda de absorción. Ello hace indispensable disponer de un láser como fuente de la radiación del lidar, que emita dos líneas (o bien, si ello no es posible, disponer de dos láseres que emitan las líneas adecuadas) y que serán, al menos una, líneas de absorción por parte de la molécula en estudio. Esas

líneas deben tener las siguientes características:

- 1) una que debe ser absorbida en forma bien determinada, pero no totalmente por el gas en estudio, y la segunda línea, que no sea absorbida, o bien que la absorción sea mucho menor que la primera.
- 2) la absorción sea lo suficientemente importante para ser detectada, pero no tanto como para que la señal se atenúe tanto que no quede radiación disponible para seguir midiendo.

Esto quiere decir que solo se podrán utilizar sistemas lidar que dispongan de emisores láser con dichas líneas. De esa forma es posible extraer la información de la concentración en función de la altura, a partir de la ecuación del lidar. Se obtienen así perfiles de concentración hasta la altura donde el gas esté presente y se pueda medir con el lidar.

e) Lidar de fluorescencia

El lidar de fluorescencia, es especial para medir en la alta atmósfera, entre 80 y 110 km, donde están presentes átomos de Na, K, Ca, Li y Fe, que al ser excitados por un láser adecuado, reemite radiación a longitudes de onda mayores. Cuando reemite la misma longitud de onda se denomina fluorescencia resonante. La fuerte reemisión permite la determinación de la concentración de átomos o de iones a distancias del orden de los 100 km. Además, el estudio del ensanche de las líneas por efecto Doppler y el desplazamiento de la línea del NaD2 puede ser usado para determinar temperatura y velocidades de viento. También se emplea para medir en la baja atmósfera compuestos orgánicos fluorescentes, como por ejemplo los que contienen los granos de polen.

f) Lidar Doppler

El denominado lidar Doppler permite básicamente la medición de velocidades del viento. En efecto, a lo largo de la línea de mira del sistema lidar, es posible observar el desplazamiento Doppler de la radiación retrodispersada a frecuencias más altas si las partículas se mueven hacia el lidar, y a frecuencias menores si lo hacen alejándose. Ese desplazamiento en frecuencias es proporcional a la relación entre la velocidad del viento y la velocidad de la luz. La medición de este desplazamiento es muy difícil por su pequeño valor. Si se utiliza como emisor láser, uno que tenga la propiedad de emitir un solo modo a una sola frecuencia, se tiene lo que se denomina un lidar Doppler Coherente. A todo lo dicho, es importante remarcar que se puede adicionar otro tipo de propiedad de la radiación del láser, cual es la polarización de la radiación y sus variaciones al interactuar con la atmósfera. De ello es posible obtener también información sobre diversos parámetros. Un interesante ejemplo es el estudio de cirrus donde se producen variaciones en la polarización de los pulsos del láser que dan importante información.

Descripción de un sistema lidar de retrodifusión Rayleigh y Mie desarrollado en nuestro país

En el Centro de Investigaciones en Láseres y Aplicaciones, CEILAP, que depende de CITEFA a través de la UNIDEF, Unidad de Investigación y Desarrollo para la Defensa, y también del CONICET, CEILAP (CITEFA-CONICET), se desarrollaron a partir de 1989 varios tipos de sistemas lidar en base a láseres de entre los arriba descritos, con diferentes propósitos de mediciones atmosféricas de interés para nuestro país. Se llegó a ello, luego de un exhaustivo estudio de posibles aplicaciones de los láseres que fueran de interés para nuestro país. Así surgió la posibilidad de estudiar la atmósfera aplicando básicamente tecnología láser, a través de la utilización de los sistemas lidar.

A título de ejemplo, se describirá con cierto detalle un sistema lidar de retrodifusión, para dispersión Rayleigh y Mie, como es el caso del dispositivo descrito en la Figura 2. Eventualmente también es posible detectar líneas Raman. Se construyó en el CEILAP, CITEDEF. Para ello, se utilizó un láser comercial de Nd:YAG bombeado con lámpara flash, que emite 3 longitudes de onda: 1064, 532 y 355 nm. En efecto, un láser *Continuum*

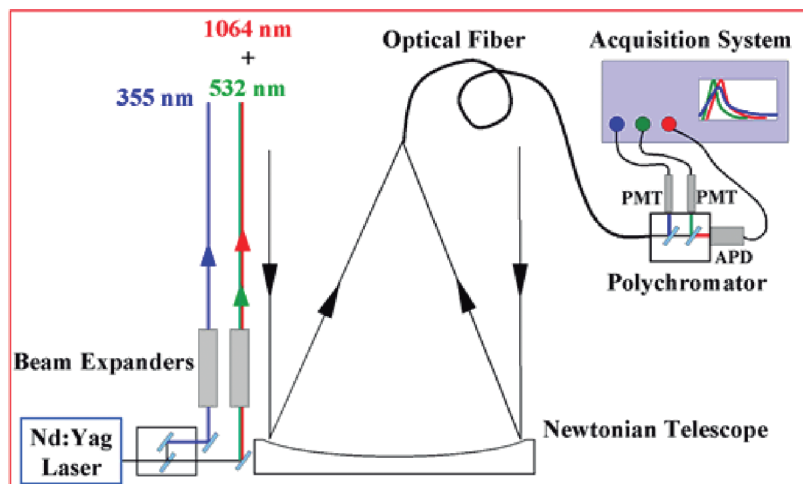


Fig. 2. Esquema del sistema lidar para el estudio de la atmósfera usando dispersiones elásticas de Rayleigh y de Mie

Fuente: Otero, 2007

Surelite III P-IV, de 10 Hz de repetición, emite la longitud de onda fundamental en 1064 nm con una energía de 600 mJ, generando además la primera y segunda armónica, 532 y 355 nm con 200 mJ y 20 mJ por pulso respectivamente, lo que permite obtener información en las tres longitudes de onda simultáneamente con una resolución temporal de 10 s y espacial de 6 m. Tal como se indica, los pulsos son enviados a través de expansores de haz que permiten aumentar el grado de paralelismo de la radiación, y así estar dentro del campo de visión del telescopio a mayor altura. A su lado un telescopio newtoniano que consta de un espejo de fabricación nacional, de $f = 1$ m. Una fibra óptica colocada en su foco, permite transportar la radiación de los pulsos detectados a una caja espectrométrica, que separa las tres longitudes de onda que se detectan con 2 fotomultiplicadores (PMT por su nombre en inglés) (355 y 532 nm) y un fotodiodo de avalancha, (1064 nm) (APD por su nombre en inglés). Toda la caja espectrométrica, se diseñó y construyó en el CEILAP de CITEDEF. En la Figura 2 se pueden observar detalles del montaje de este sistema lidar. Estos trabajos formaron parte de la tesis doctoral de la Ing. Lidia A. Otero, defendida en la Facultad de Ingeniería de la UBA.

Lidar para el monitoreo de Ozono estratosférico: el sistema DIAL

Es interesante remarcar que, por otra parte, desde algunos años anteriores, se habían comenzado a realizar en el CEILAP trabajos relacionados con la molécula de ozono. Se obtenía en el laboratorio a partir de oxígeno de alta pureza, con el fin de excitarla mediante láser, y estudiar sus niveles infrarrojos mediante la absorción de la radiación de las líneas emitidas específicamente por un láser de CO₂ desarrollado en dicho laboratorio. Este trabajo fue realizado en colaboración con el CNRS de Francia, en particular con el Profesor Lucien Doyenette de la Université Paris VI (Pierre y Marie Curie).

La más interesante consecuencia de los resultados que se iban obteniendo, llevaron al estudio de la capa de ozono y la medición de la misma con sistemas láser. Para ello se tuvo que desarrollar y construir por completo un sistema lidar de absorción diferencial (DIAL, por su sigla en inglés). En este aspecto, es muy importante señalar que la colaboración con Francia tomó una importante envergadura, pues fue de la mayor importancia la gran experiencia que tenían en la Université Paris VI, hoy Paris Sorbonne. En efecto, uno de sus investigadores, de gran renombre internacional era el entonces Presidente de la Comisión Internacional del Ozono, Prof. Dr. Gérard Megie, de dicha Université de Paris, y algunos de sus colaboradores más destacados, la Dra. Sophie Godin y el Ing. Jacques Porteneuve. Tenían una gran experiencia en las mediciones de la capa de ozono con láser, la cual fue de gran apoyo para la construcción de los sistemas lidar mencionados, así como las

mediciones y las interpretaciones de ellas. Fueron sin duda alguna las primeras realizadas en nuestro país sobre el espesor de la capa de ozono del sur del continente (Salvador, 2011).

El concepto esencial de este sistema lidar consiste, tal como se mencionó anteriormente, en disponer de dos líneas láser que pueden estar generadas por dos láseres diferentes, como era este caso. Una línea era fuertemente absorbida por el ozono, en tanto que la otra línea no era absorbida por el ozono. La relación entre ambos pulsos, en función de la altura de la cual provenían los pulsos, permitía determinar el contenido de ozono en función de la altura, lo cual permitía vigilar la situación de la capa de ozono en el sur de la Patagonia, más precisamente en Río Gallegos, en lo que hacía a su eventual debilitamiento. Hoy este problema está siendo razonablemente superado, atento al control de los gases que destruyen la capa de ozono (Ibidem).

El instrumento lidar diferencial fue enteramente construido en el CEILAP de CITEFA (hoy CITEDEF) y luego de una serie de mediciones exitosas del espesor de la capa de ozono en la sede del CEILAP en Villa Martelli, Prov. de Buenos Aires, fue trasladado e instalado en la Base Aérea Río Gallegos, a 14 km de distancia de la ciudad de Río Gallegos, Provincia de Santa Cruz, en el sur de la Patagonia argentina. Allí se realizaron mediciones sistemáticas de la capa de ozono a partir de mediados del año 2004 y durante varios años. En ese mismo año, en base al instrumental descrito, se inauguró el Observatorio Atmosférico de la Patagonia Austral, que funcionó dentro mismo de la base Aérea de Río Gallegos también durante varios años (Ibidem).

Otros lidares desarrollados en Argentina para estudios atmosféricos: Sistemas Raman y HSRL

En el CEILAP, también se analizó la posibilidad de incorporar otro nuevo sistema lidar que podía funcionar como de tipo Rayleigh y también Raman, para poder sumar los estudios y las mediciones de partículas en suspensión en el aire, productos que podían tener orígenes diversos, para ser instalado en los laboratorios del CEILAP en Villa Martelli y en la Patagonia Argentina, o sea en el OAPA, vecino a la ciudad de Río Gallegos. Estos sistemas permitieron medir perfiles de retrodispersión Raman de la molécula de nitrógeno (a fin de medir la transmisión y la retrodispersión atmosférica de forma independiente) y el vapor de agua. Estos equipos funcionan únicamente de noche dado que la claridad diurna impide la medición en otro momento.

Posteriormente se desarrollaron otros equipos para la observación de aerosoles troposféricos y estratosféricos que contaron con alta resolución espectral (HSRL) y dotados de canales que permitieron medir la despolarización generada por ciertos aerosoles. Estas dos técnicas, a diferencia de la primera, permiten medir tanto durante el día como durante la noche.

Colaboraciones internacionales

El desarrollo de estos equipos fue producto de una sostenida colaboración internacional y de capacitaciones tanto en el país como en el exterior. Primeramente, en el año 1991 en el CEILAP, mediante un subsidio del CONICET, se comenzó a desarrollar dicho sistema lidar en base a láser para el estudio de aerosoles. A través de una colaboración con el Prof. F. Congedutt investigador del Istituto di Fisica dell'Atmosfera, CNRS, Italia, se comenzó el diseño y la construcción de un sistema lidar que fue el primero en Argentina, en dependencias del CEILAP, con la colaboración de varios colegas. Durante 1994 se dispuso de las primeras mediciones.

Tiempo después se inició una colaboración con el prof. Pierre Flamant de la Ecole Polytechnique (CNRS, Francia). El Ing. Javier Fochesatto perteneciente a nuestro grupo de investigadores, mediante un proyecto ECOS de colaboración entre Francia y Argentina que solicitamos con el Prof. G. Megie del CNRS y de la Université Paris VI,

realizó trabajos sobre la Capa Límite con mediciones realizadas con nuestro sistema lidar en Buenos Aires, así como las primeras detecciones de quemadas de biomasa y de cirrus. Estos trabajos le permitieron doctorarse en la Université Paris VI (Pierre et Marie Curie) en 2000. El Ing. Pablo Ristori, se doctoró en la École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suiza, en 2007, con trabajos relacionados con el desarrollo de un sistema lidar Raman de alta resolución espacial y temporal para detectar vapor de agua en observaciones turbulentas, bajo la dirección del Prof. Hubert Van den Bergh. Todos estos trabajos se realizaron al mismo tiempo que se trabajaba con el sistema DIAL arriba descripto (Ristori, 2007).

Otra colaboración que resultó muy activa y de amplia repercusión en el CEILAP, fue la realizada con Japón, a partir del año 2013, cuando fue aprobado un proyecto trinacional (Argentina, Chile, Japón) por la asociación para la investigación científica y tecnológica para un desarrollo sostenible (SATREPS), que es una colaboración entre la agencia japonesa de ciencia y tecnología (JST) y la agencia de cooperación internacional del Japón (JICA). El Prof. Hideaki Nakane fue el responsable por Japón y el Dr. Eduardo Quel por el CEILAP. El propósito fundamental era incorporar más instrumentos a la estación terrena Villa Martelli y de Río Gallegos junto con la participación científica del Japón.

En este caso, se obtuvo un subsidio en colaboración con la Universidad de Nagoya de Japón, el Instituto nacional para estudios medioambientales del Japón (NIES) y también con la Universidad de Magallanes sita en Punta Arenas, Chile, ciudad muy próxima a Río Gallegos. Dicha colaboración fue muy exitosa, en particular por la participación de la Universidad Nacional de la Patagonia Austral, junto con el CEILAP, y por la cercanía de la Universidad de Magallanes. Un importante instrumento Brewer fue incorporado, clave para la medición del ozono total por ser complementario del sistema lidar DIAL en base a láser que ya estaba en funcionamiento en el Observatorio Atmosférico de la Patagonia Austral, en la ciudad de Río Gallegos, sede de la UNPA, con la cual se llevó una activa coparticipación. La colaboración con las instituciones japonesas mencionadas resultó un éxito muy significativo. (Pazmiño, et al, 2016 y Mizuno, *et al*, 2015).

También se desarrollaron tres estaciones lidar para el monitoreo de aerosoles, dos de las cuales incorporaron la tecnología HSRL. Sumadas a las estaciones desarrolladas en el país, la red terminó sumando ocho estaciones instrumentales con lidares de diversas características.

Objetivos académicos

Todos estos trabajos tuvieron también un importante objetivo académico para los investigadores involucrados, cual era realizar investigaciones de nivel académico que les permitiera alcanzar el más alto nivel en su formación, es decir realizar tesis doctorales, ya sea en las Facultades de Ciencias o bien de Ingeniería, lo cual garantizaba una formación académica de nivel internacional. Es de tener en cuenta que en los doctorados, se exigen trabajos avalados por publicaciones internacionales con jurados reconocidos.

Es así como además de las tesis ya mencionadas, se lograron realizar otras en temas vinculados con el estudio de la capa de ozono estratosférico. En tal sentido se menciona la tesis doctoral en Física, del Lic. Elian Wolfram cuya defensa se realizó en la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de La Plata, y la tesis doctoral en Ingeniería, realizada en cotutela entre la Université de Paris VI, Sorbonne, y la Facultad de Ingeniería de la UBA, de la Ing. Andrea Pazmiño. También el Ing. Jacobo Salvador defendió su tesis doctoral en Ingeniería en la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional, sobre temas vinculados con el lidar de ozono. En la misma Facultad, el Ing. Juan Pallota realizó su tesis doctoral en ingeniería sobre el estudio de aerosoles atmosféricos sobre Buenos Aires.

Las colaboraciones internacionales arriba mencionadas, fueron de una gran relevancia en la realización de los trabajos que condujeron a tesis doctorales mencionados, defendidas todas por jóvenes investigadores que actualmente prosiguen sus carreras científicas y que fueron calificadas en todos los casos con el grado más alto en cada Universidad.

Referencias

- FIOCCO, G. and SMULLIN, L. D., (1963). Detection of scattering layers in the upper atmosphere (60–140 km) by optical radar. *Nature* 199 (4900), 1275–1276.
- KOVALEV, V. y EICHINGER, W., (2004). *Elastic Lidar. Theory, Practice and Analysis Method..* Wiley. New York. USA.
- Laser Remote Chemical Analysis.* Edited by Raymond Measures. Wiley & Sons. New York. USA. 1988.
- Laser Remote Sensing. Fundamentals and Applications.* Edited by Raymond Measures. Krieger Pub. Co. Malabar. USA. 1984.
- Lidar. Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere.* Claus Weitkamp. Springer. Germany. 2005.
- MIDDLETON, W. y SPILHAUS, A., (1955). *Meteorological Instruments.* University of Toronto Press. Toronto.
- MIZUNO, A.; SUGIMOTO, N.; SUGITA, T.; AKIYOSHI, H.; NAGAHAMA, T.; OYAMA, H.; JIN, Y.; SHIMIZU, A.; NISHIZAWA, T.; NAKAJIMA, T.; OGAWA, I.; NAKANE, H.; WOLFRAM, E.; RISTORI, P.; SALVADOR, J.; OTERO, L.; ORTE, F.; RAPONI, M.; PAPANDREA, S.; ZAMORANO, F.; QUEL, E. y MISU, Y., (2015), "SAVER-Net: A Project to Construct an Observing Network and to Develop Pathways to Distribute the Risk Information of Atmospheric Ozone, UV Radiation, and Aerosols for the Southern Part of South America.". Presentado en el evento: "13th Atmospheric Sciences and Application to Air Quality (ASAAQ13)". Nov. 2015. Japón.
- OTERO, L. A., (2007). "Estudio de las propiedades ópticas de los aerosoles en Argentina con técnicas de sensado pasivo y activo de la atmósfera". Tesis de Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería (FIUBA), Universidad de Buenos Aires (UBA). Junio 2007.
- PAZMIÑO, A.; GODIN-BEEKMANN, S.; HAUCHECORNE, A.; FRANCK LEFÈVRE, CH. C.; KHAYKIN, S.; GOUTAIL, F.; POMMEREAU, J. P.; BOONNE, C.; WOLFRAM, E.; SALVADOR, J. y QUEL, E., (2016). "Evaluation of total ozone recovery inside the Antarctic vortex". Presentado en el evento: "Quadrennial Ozone Symposium 2016". Sep. 2016. Reino Unido.
- RISTORI, P. R., (2007). "Development of a high spatial and temporal resolution water vapor raman lidar for turbulent observations". Tesis de doctorado en Ciencias, Faculté Environnement Naturel, Architectural et Construit. École Polytechnique Fédérale de Lausanne. EPFL. Junio de 2007.
- SALVADOR, J. O., (2011). "Estudio del comportamiento de la capa de ozono y la radiación UV en la Patagonia Austral y su proyección hacia la comunidad". Tesis de Doctorado en Ingeniería Facultad Regional Buenos Aires (FRBA). Universidad Tecnológica Nacional (UTN). Junio de 2011.