

TELEDETECCIÓN LIDAR DE AEROSOLES TROPOSFÉRICOS EN LA CIUDAD DE MADRID

F. MOLERO, P. SALVADOR, L. NÚÑEZ, B. ARTIÑANO y M. PUJADAS

manuel.pujadas@ciemat.es

CIEMAT. Departamento de Impacto Ambiental de la Energía.
Ministerio de Ciencia y Tecnología. Avda. Complutense 22, 28040 Madrid.

RESUMEN: En este trabajo se estudia la distribución de aerosoles en la capa de mezcla empleando un sistema LIDAR. Este sistema emplea la retrodispersión elástica Mie producida en un haz láser para estudiar la distribución de los dispersores atmosféricos a lo largo de la dirección de medida. Se han realizado observaciones verticales periódicas para identificar la evolución de la capa. Los valores obtenidos se comparan con medidas en superficie de aerosoles, realizadas con un GRIMM, y de contaminación, realizadas con un DOAS, con el fin de validar las medidas lidar.

ABSTRACT: This work studies the aerosol's distribution in the mixed layer by means of a LIDAR system. This system uses the Mie elastic backscattering produced in a laser beam to study the distribution of the atmospheric scatterers along the measurement direction. Periodic vertical measurements were made in order to identify the layer evolution. The data obtained were compared with aerosols measurements, provide by a GRIMM, and pollution measurement, provide by a DOAS, in order to verify the lidar profiles.

Palabras Clave: Teledetección, LIDAR, aerosoles, capa de mezcla.

INTRODUCCIÓN

Los aerosoles, material particulado atmosférico con un tiempo de residencia en el aire no despreciable, juegan un papel relevante en el balance energético natural de la Tierra (Charlson, 1992) y lo hacen tanto de un modo directo, reflejando y absorbiendo eficazmente la radiación solar (Hansen, 1990), como indirecto, relacionado con las propiedades higroscópicas de las partículas que favorecen el aumento de la condensación y la formación nubosa, lo que conduce a la modificación del albedo. Junto a estos fenómenos físicos, los aerosoles desempeñan un importante papel químico ya que su presencia facilita el desarrollo de gran variedad de reacciones químicas atmosféricas en fase heterogénea (Finlayson-Pitts, 1986). Por último, las partículas troposféricas en zonas pobladas constituyen un importante problema ambiental al tener notables efectos negativos sobre la salud de las personas (Schwartz, 1996; Seaton, 1995). En este sentido, los estudios epidemiológicos han aconsejado la modificación de la legislación aplicable al control ambiental del material particulado, tanto en lo referente a los tipos de partículas a vigilar como en lo relativo a las concentraciones ambientales admisibles (USEPA, 1995). De este modo,

la Directiva europea (99/30/CE) actualmente vigente abandona la anterior visión genérica de los aerosoles como PTS (Partículas Totales en Suspensión) y obliga a distinguir dos tipos de partículas, las denominadas PM_{10} y las $PM_{2,5}$, que son respectivamente las de tamaño inferior o igual a 10 y a 2.5 μm , por considerarlas potencialmente más peligrosas para la salud al poder quedar retenidas en el tracto respiratorio una vez inhaladas. Esta nueva Directiva fija también valores límite para las concentraciones promedio de PM_{10} diarias y anuales a la vez que solicita la puesta en marcha de proyectos de investigación centrados en el estudio de los niveles ambientales y fuentes de $PM_{2,5}$, debido a la falta de información que existe actualmente en todos los países de la Unión Europea sobre el tema.

Los datos existentes hasta ahora demuestran que una fracción variable pero muy importante del volumen total de las partículas presentes en la baja atmósfera es de carácter antropogénico. La baja visibilidad tan característica de las ciudades y zonas industrializadas es, por ejemplo, uno de los efectos típicos de la presencia de esos aerosoles antropogénicos que pueden ser tanto primarios (directamente emitidos) como secundarios (formados a partir de transformaciones físico-químicas de

ciertas sustancias precursoras). Estas partículas, principalmente sulfatos, nitratos, partículas orgánicas, etc., están relacionadas con los productos de las distintas combustiones que la actividad humana produce y el estudio de sus propiedades físico-químicas y de su distribución espacial son objetivos principales de numerosos programas de investigación. En ambos casos las técnicas de detección óptica brindan un potencial importante, aunque su aplicabilidad y rendimiento dependan muy directamente del propósito de la investigación y de la escala a la que se desarrolle. Para estos propósitos suelen emplearse los equipos basados en el muestreo y/o filtrado de aire que están distribuidos en las distintas redes oficiales de control ambiental. Sin embargo, estos sistemas proporcionan una visión esencialmente bidimensional de superficie, que para estudios en los que se busca profundizar en la conexión que existe entre los procesos atmosféricos locales o regionales y las concentraciones de aerosoles observadas en los distintos emplazamientos de medida, no resulta suficiente. Es en estas circunstancias cuando la teledetección óptica de aerosoles troposféricos con sistemas tipo LIDAR (Reagan, 1989; Freajon, 1998), constituye una opción muy interesante que permite caracterizar la distribución de centros de scattering en las capas más bajas de la atmósfera, es decir en aquellas cotas en donde las imágenes de satélite, como el instrumento EP-TOMS, NASA 1996, no aportan buena información.

DISEÑO EXPERIMENTAL E INSTRUMENTACIÓN

Los resultados que aquí se presentan son una muestra de cómo puede ser abordado desde el punto de vista experimental el estudio de la distribución vertical de aerosoles de origen urbano dentro y por encima de la capa de mezcla. Los experimentos se han realizado en la Ciudad Universitaria de Madrid, área semiurbana situada en el noreste de la ciudad y cercana a una amplia zona verde.

Las medidas se han realizado en un emplazamiento fijo en el que además del sistema LIDAR para la obtención de perfiles verticales de concentración de aerosoles se han empleado otros dos sistemas de medida, un equipo DOAS para la detección remota de contaminantes atmosféricos y un equipo GRIMM para la monitorización de aerosoles en superficie.

A continuación se describe la instrumentación utilizada:

—LIDAR (LIght Detection And Ranging): Sensor remoto de centros de scattering atmosférico basado en el empleo de radiación láser pulsada que es enviada a la atmósfera como elemento de sonda. Los principios del LIDAR son semejantes a los de un radar óptico y han sido ampliamente

difundidos en la literatura desde el inicio de su empleo en los 70 (Allen, 1972) por lo que aquí sólo se describirá sucintamente el equipo no comercial empleado en esta aplicación. Este sistema (Molero, 1999) consta de un láser de Nd:YAG que genera pulsos de 10 nanosegundos de anchura temporal y hasta 600 mJ a una longitud de onda de 532 nm y una frecuencia de disparo de 20 Hz. Dispone de un telescopio newtoniano de 40 cm de diámetro con el que se recoge la radiación retrodispersada por las partículas que es posteriormente detectada mediante un tubo fotomultiplicador (PMT), cuya señal de salida es digitalizada con un osciloscopio de 150 MHz de banda analógica y 200 Ms/s. Para evitar que la radiación de retorno de campo cercano saturate el bloque de amplificación de señal, el PMT es obturado electrónicamente imponiéndose un retardo a la detección con respecto al momento del disparo del láser. En este experimento este tiempo de retraso se fijó para que las señales detectadas correspondiesen a la retrodispersión atmosférica producida a partir de 150 m de distancia de la entrada al telescopio. Aunque la resolución nominal del sistema es de 1 punto/ 3 metros, en este experimento las señales de retorno fueron promediadas para obtener siempre una relación señal a ruido $SNR \geq 3$, lo que redujo la resolución máxima real a 15 m, es decir, un promedio espacial mínimo de 5 puntos. Las señales obtenidas son promedios de 1200 pulsos láser (1 minuto).

—DOAS (Differential Optical Absorption Spectrometry): Sistema para la teledetección de constituyentes atmosféricos basado en la medida espectrométrica de una cierta radiación policromática introducida por el sistema en la atmósfera de manera continua en un camino óptico cerrado definido por las posiciones del emisor y el receptor. El análisis de las absorciones específicas producidas sobre la radiación entre esos dos puntos permite la detección y cuantificación de los compuestos gaseosos de interés, de los que previamente se conoce su comportamiento como absorbentes, obteniéndose la concentración atmosférica promedio individual de esas especies a lo largo del camino explorado. El equipo DOAS empleado para este trabajo es un equipo comercial de la marca OPSIS modelo AR500 preparado para medir NO_2 y O_3 , entre otros compuestos gaseosos. El camino óptico elegido fue esencialmente horizontal con una longitud aproximada de 230m y con una altura media sobre la superficie de 10 m.

—Monitor de partículas GRIMM mod. 1108: Sistema portátil diseñado para la detección y monitorización de los aerosoles contenidos en el aire ambiente. El equipo muestrea continuamente el aire y determina el contenido de partículas aprovechando la dispersión angular que producen cuando la radiación de un diodo láser atraviesa la corriente de aire de muestra. El análisis del scattering producido en un ángulo de 90° sobre el eje del haz láser proporciona datos sobre la distribución de las concentraciones de aerosoles clasificados según sus tamaños. Concretamente en esta aplicación el instrumento fue programado para distinguir las siguientes categorías: PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 , obteniéndose promedios de concentración cada 5 minutos.

Por último, La información meteorológica complementaria la proporcionó la estación meteorológica del CIEMAT.

RESULTADOS

Con el fin de evaluar el potencial rendimiento de este sistema lidar en el estudio de aerosoles atmosféricos, se procedió a medir disparando verticalmente el haz láser y tomando un perfil cada 5 minutos. Las señales obtenidas se corrigieron por la distancia al cuadrado y normalizaron utilizando una fracción de la potencia láser extraída antes de expandir el haz. Sin entrar en análisis más complejos, los perfiles obtenidos sirven como una primera estimación de la distribución vertical de partículas sobre el punto de medida.

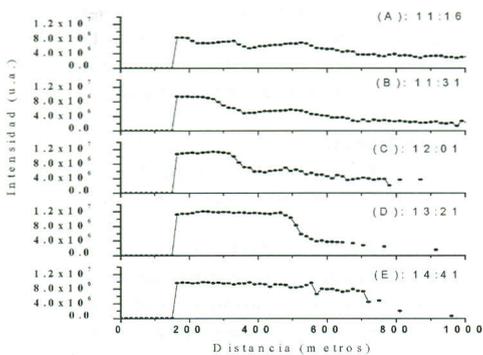


Figura 1. Perfiles verticales obtenidos con el lidar el día 12/02/2001 a diferentes horas.

Los resultados presentados corresponden al 12/02/2001, día elegido por sus condiciones meteorológicas

de estabilidad atmosférica, con altas presiones, cielos despejados y vientos débiles ($v \approx 2 \text{ms}^{-1}$). Cuando estas situaciones persisten durante varios días en una ciudad conducen al desarrollo de episodios de contaminación atmosférica urbana como los ampliamente descritos para el caso de Madrid, (Artiñano, 1994; Pujadas, 2000).

La figura 1 muestra diversos perfiles obtenidos con el lidar. En el de la figura 1a, correspondiente a las 11:16, se observa que la capa de mezcla está desarrollada hasta una altura de 200 metros. A partir de esta cota se produce un súbito descenso en la señal, asociado a un cambio en el coeficiente de retrodispersión, es decir, a un estrato de aire con menor contenido de aerosoles. Este estrato llega hasta los 325 metros y ahí se produce otro descenso y un incremento progresivo posterior que indica la presencia de una capa cuyo contenido de aerosoles aumenta con la altura hasta los 500 m. A partir de ese nivel, la retrodispersión desciende lentamente con la altura, indicando un aire cada vez más limpio de aerosoles. En la figura 1b, obtenida 15 minutos más tarde, se observa como la retrodispersión producida en los primeros metros, comenzando en 150 metros, ha aumentado ligeramente, indicando un progresivo aumento de aerosoles, alcanzando la capa de mezcla los 300 m. El estrato localizado entre 350 y 500 m permanece invariable. Media hora después, figura 1c, 12:01, el crecimiento de la capa de mezcla ha alcanzado la base de este estrato, observándose dos zonas claramente distinguibles, una que va desde la superficie hasta los 350 m, con una concentración alta de aerosoles, y otra que comienza a los 400 m claramente más limpia de aerosoles. La figura 1d muestra la mayor concentración de aerosoles obtenida a lo largo de esa mañana., con una distribución uniforme de partículas, probablemente aerosoles secundarios, hasta una altura de 500 m. La figura 1e, muestra que a las 14:41 el calentamiento solar había elevado la capa de mezcla hasta los 700 m y la concentración de aerosoles había disminuido ligeramente.

En la figura 2 se han representado todos los perfiles obtenidos entre las 11:16 y las 14:41. En el eje X se han situado los tiempos de medida de cada uno de los perfiles, cada 5 minutos. En el eje Y se representa la altura, comenzando a los 150 metros, hasta 1150 metros, altura a la cual la relación señal-ruido disminuía por debajo de 3. La escala de grises se ha obtenido interpolando los datos mediante el método Kriging y representa la carga de aerosoles estimada a partir de la retrodispersión obtenida, comenzando en el blanco, señal igual a la obtenida en un día limpio, sin aerosoles, y creciendo uniformemente según la magnitud de la señal lidar recibida. La descripción previa de la evolución de la capa de

mezcla puede observarse de manera inmediata a partir de los cambios de tono en esta figura.

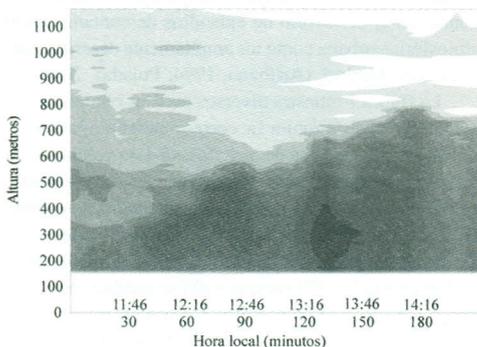


Figura 2. Evolución temporal de la señal recibida por el LIDAR en unidades arbitrarias.

En la figura se observa la estratificación presente en las primeras horas de la mañana, que va desapareciendo a medida que crece la capa de mezcla por el efecto de calentamiento de la superficie terrestre. Entre las 12:00 y las 13:00, se aprecia como la mencionada capa de mezcla alcanza los estratos superiores, presentándose una distribución de aerosoles creciente con la altura. Media hora más tarde, y tras una disminución en la carga de aerosoles que podría ser debida a movimientos de las masas de aire, se observa que se ha invertido la distribución de aerosoles, disminuyendo ahora estos con la altura. En las medidas realizadas en superficie con el equipo GRIMM se observa el incremento observado entre las 13:15 y las 13:40, que será detallado en el párrafo siguiente. Por último, después de este episodio de ligera contaminación de aerosoles, la capa de mezcla continuó creciendo hasta los 700 metros mientras que la concentración de aerosoles fue disminuyendo.

En los momentos en que la carga de aerosoles en los niveles más bajos varía, los valores pueden compararse con los medidos en superficie, correspondientes a la concentración ambiental de PM_{10} , $PM_{2.5}$ y PM_1 y de NO_2 y O_3 . A lo largo del día 12/02/01 se han observado fundamentalmente dos picos o máximos de concentración de partículas significativos. El primero, localizado entre las 07:50 y las 10:00 h coincide con un aumento de las concentraciones de NO_2 . Esta coincidencia junto a la hora en que se ha producido parece indicar el carácter antropogénico, principalmente emisiones primarias procedentes del tráfico. Dentro de este tipo de emisiones formarían parte aquellas partículas emitidas directamente junto a los gases de escape por efecto de combustiones incompletas, partículas procedentes de la

abrasión de los neumáticos y partículas terrestres que sufren procesos de resuspensión tras el paso de los automóviles.

El segundo máximo de concentración se produce aproximadamente entre las 13:00 y las 14:30 h, periodo en el que los valores de NO_2 secundario han alcanzado nivel elevados y superiores a los obtenidos durante la emisión matinal. Este hecho sugiere que gran parte de las partículas existentes tendrían un origen secundario, habiéndose formado a partir de reacciones de origen fotoquímico. Las partículas secundarias se encuentran en el rango de las partículas finas ($PM_{2.5}$) por efecto de las características físico-químicas inherentes a su formación, (Whitby, 1978). Este pico correlaciona con el incremento en la señal lidar detectada entre las 13:15 y las 14:15, lo que pone de manifiesto que el aumento de aerosoles observado en superficie tuvo lugar en toda la capa de mezcla. Esto podría significar la advección sobre el punto de medida de una masa de aire homogénea.

CONCLUSIONES:

En este trabajo se ha empleado un sistema de teledetección para estudiar la distribución de la concentración de aerosoles con la altura. Los resultados obtenidos se han correlacionado con medidas en superficie de aerosoles (Equipo GRIMM) y dióxido de nitrógeno y ozono (Equipo DOAS) para ayudar a interpretar adecuadamente las señales detectadas por el lidar.

Los resultados obtenidos han permitido observar la evolución de la capa de mezcla en un entorno urbano a partir del uso de los aerosoles como trazadores de oportunidad.

Queda pendiente profundizar en las características ópticas de los aerosoles a partir de un análisis más detallado de la señal de retorno detectada, aprovechando el potencial experimental de este sistema lidar.

BIBLIOGRAFÍA:

- ALLEN R. J. & EVANS W. E. (1972) "Laser Radar (LIDAR) for mapping aerosol structure" *Rev. Sci. Instr.* 43, 1422-1432.
- ARTIÑANO, B. *et alii* (1994), "Characterization of a pollution episode in stagnant conditions in the greater Madrid area" In *Physico-Chemical Behavior of Atmospheric Pollutants; Report EUR 15609/1 EN*; Commission of the European Communities.
- CHARLSON, R. J. *et alii* (1992), "Climate forcing by anthropogenic aerosols", *Science* 255, 423-430.
- FINLAYSON-PITTS B. J. and PITTS J. N. Jr. (1986). *Atmospheric Chemistry: Fundamentals and Experimental Techniques*. John Wiley and Sons, Inc. New York.

- FREJAFON, E. *et alii* (1998), "Laser applications for atmospheric pollution monitoring", *Eur.Phys.J. D* 4, 231-238.
- HANSEN, J. E. & LACIS, A. A. (1990), "Sun and dust versus greenhouse gases: An assessment of their relative roles in global climate change" *Nature* 346 713-719.
- MOLERO, F & JAQUE, F. (1999) "The laser as a tool in environmental problems" *Opt. Mat.* 13, 167-173.
- PUJADAS, M. *et alii* (2000) "Passive remote sensing of nitrogen dioxide as a tool for tracking air pollution in urban areas: The Madrid urban plume, a case of study" *Atm. Environ.* 34, 3041-3056.
- REAGAN, J. A. *et alii* (1989) "Lidar sensing of aerosols and clouds in the troposphere and estratosphere" *Proc IEEE* 77, 433-448.
- SCHWARTZ J., DOCKERY D. W. and NEAS L. M. (1996). Is Daily Mortality Associated Specifically with Fine Particles?. *J. Air & Waste Manage. Assoc.* 46: 927-939.
- SEATON, A. *et alii* (1995) "Particulate air pollution and acute helath effects" *Lancet* 345, 176-178.
- U.S. Environmental Protection Agency. Compi-lation of Air Pollutant Emission Factors, USEPA Report AP-42, Vol. 1 5th edition, 1995.
- WHITBY K. T. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmos. Environ.* 12, 135-159.