

**Desarrollo de un Lidar de Esparcimiento Elástico
y del Método para Procesar las Señales Lidar
Atmosféricas de Retorno**

Tesis que Presenta

Rafael Castrejón García

Para Obtener el Grado de
Doctor en Ciencias



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

**DESARROLLO DE UN LIDAR DE ESPARCIMIENTO
ELÁSTICO Y DEL MÉTODO PARA PROCESAR LAS SEÑALES
LIDAR ATMOSFÉRICAS DE RETORNO**

TESIS QUE PRESENTA EL

M. C. RAFAEL CASTREJÓN GARCÍA

**PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS**

18 DE DICIEMBRE DE 2008

ASESOR: DR. RUBÉN VARELA HAM

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA-IZTAPALAPA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

UNIDAD IZTAPALAPA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

SECRETARÍA ACADÉMICA

Av. Michoacán y La Purísima, Col. Vicentina, Iztapalapa, D. F., C. P. 09340

AGRADECIMIENTOS

De manera muy especial deseo expresar mi agradecimiento al Dr. Juan Rubén Varela Ham, quien por su interés, consejos, apoyo y confianza hicieron posible el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, agradezco el apoyo de los miembros del Jurado:

Dr. Manuel Fernández Guasti
Dr. Michel Grutter de la Mora
Dr. Francisco Guzmán López-Figueroa
Dr. José Inés Jiménez Aquino.

Quienes enriquecieron, sin duda alguna, el contenido de este trabajo con sus atinados comentarios, observaciones y sugerencias.

Quiero expresar mi sincero y cariñoso agradecimiento a la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, por haberme hecho sentir miembro de su comunidad intelectual. A su personal académico y administrativo, por todo el apoyo prestado durante mi estancia en la Universidad.

DEDICATORIAS

A mis amados hijos Alfonso Arturo y José Rafael.

A mi amada esposa Leonor

A la Memoria de mis padres Arturo y Sofía.

A mis hermanos Arturo, Alfredo y Javier

CONTENIDO

1. INTRODUCCION.

2. ANTECEDENTES.

- 2.1. Historia del Lidar.
- 2.2. Historia del Lidar en México.
- 2.3. Usos y Aplicaciones del Lidar.

3. FUNDAMENTOS TEORICOS.

- 3.1. Propagación y Esparcimiento de Luz en la Atmósfera.
- 3.2. Índice de Refracción.
- 3.3. Dispersión de Luz Rayleigh.
- 3.4. Dispersión de Luz Mie.

4. LAS ECUACIONES PARA ESPARCIMIENTO ATMOSFÉRICO DE LUZ LÁSER.

- 4.1. El Diagrama Espacio-tiempo.
- 4.2. La Ecuación General de Esparcimiento Atmosférico para Lidar.
- 4.3. La Ecuación para el Lidar Elástico.

5. MÉTODOS PARA PROCESAR LA SEÑAL LIDAR.

- 5.1. Promedio de las Señales Lidar.
- 5.2. Corrección de la Señal Lidar mediante el Cuadrado de la Distancia (R^2).

5.3. El Método de Absorción Diferencial (DIAL).

6. MÉTODO DEL COCIENTE DE COEFICIENTES DE BETA (β).

6.1. Desarrollo del Método del Cociente de Coeficientes de Retrodispersión (β).

6.2. Aplicación del Método.

7. DESARROLLO DEL LIDAR.

7.1. Transmisión de Luz de la Atmósfera.

7.2. El Detector.

7.3. La Etapa de Amplificación.

7.4. Evaluación del Ruido en la Señal Lidar.

7.4. La Óptica de Emisión y Recepción.

7.5. Etapa de Captura, Digitalización y Operación del Lidar.

8. RESULTADOS.

8.1. Evaluación y Validación del Método de Cocientes de β .

8.2. Determinación del Perfil Vertical de la Estructura Atmosférica con el Lidar.

8.3. Compensación de las Señales Lidar por la Altura en la Determinación del Perfil Vertical de la Atmósfera.

Conclusiones y Trabajos Futuros.

9. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO.

9.1. Conclusiones.

9.2. Trabajos Futuros.

10. BIBLIOGRAFIA.

11. ANEXOS.

11.A. Detalles de Construcción.

11.B. Fotografías del Sistema.

1

INTRODUCCIÓN

La atmósfera y el clima se han convertido en un tema de gran preocupación, no sólo para los científicos, sino para una gran parte la humanidad; términos como: efecto invernadero, agujero de ozono y cambio climático global, son palabras que ahora se usan cotidianamente como un reflejo de dicha preocupación. Por ello, en años recientes, la vigilancia de la estructura y la composición de la atmósfera ha adquirido especial relevancia.

Una actividad clave para entender el comportamiento de la atmósfera es la habilidad de conocer su estructura, lo que hace necesario contar con sistemas de medición efectivos y adecuados que puedan resolver la gran variación espacial y temporal de la estructura atmosférica y su composición.

Las técnicas y equipos tradicionales de medición de parámetros atmosféricos (como temperatura, velocidad de viento, presión, etc.), presentan resultados obtenidos en una determinada posición y acumulados en un determinado período de tiempo, lo cual proporciona información local en el punto de medición, mas no así su distribución a diferentes alturas y su impacto en los alrededores o zonas aledañas.

Las ventajas de un sistema de medición adecuado, además de proporcionar información útil para establecer bases de datos sobre estudios atmosféricos, también puede servir para establecer criterios sobre la eficacia de los procedimientos; evaluar el efecto de las estrategias implantadas en la disminución de la contaminación; saber si el establecimiento de alguna nueva industria o el aumento del tráfico de vehículos repercuten en los niveles de

contaminación ya existentes y planear el crecimiento urbano e industrial con base en el conocimiento de los niveles de contaminación.

Las tecnologías de detección remota con potencial de aplicación en la atmósfera comenzaron a desenvolverse en la primera mitad del siglo pasado. Durante la II Guerra Mundial se desarrollaron sistemas como el Radar (acrónimo para *Radio Detection and Ranging*) para detectar y localizar artefactos aéreos y el Sonar (*Sound Navigation and Ranging*), para auxiliar en la navegación y guiado de los submarinos y también, para localizarlos. Mientras que el radar se basa en la emisión de un pulso electromagnético (onda de radio) en la atmósfera y la detección de su "eco" o del pulso dispersado, el sonar se basa en la emisión y detección de un pulso acústico (onda de sonido) bajo la superficie del agua.

Posteriormente, como una evolución de la tecnología del sonar, en los años 1950 se encaminaron los esfuerzos para desarrollar un sistema con la capacidad para utilizarse en la atmósfera. De esta forma nace el Sodar (*Sonic Detection and Ranging*), cuyo principio de operación se basa en el esparcimiento de las ondas de sonido por estratos o zonas de diferente densidad o de turbulencia atmosférica. Se utiliza para medir la velocidad del viento y los perfiles de temperatura de la atmósfera a altitudes menores a los 1000 m. Esta tecnología sigue actualmente en uso en algunos centros meteorológicos.

Como una amalgama del radar y el sodar, surge, a finales de los años 70, el RASS (*Radio Acoustic Sounding System*), que es un sistema que aprovecha el esparcimiento de las ondas de radio por un frente de onda acústico para medir la velocidad del sonido en el aire, con la que es posible calcular además la temperatura del aire. Su altitud de trabajo en la atmósfera, como en el caso del sodar, no es superior a los 1000 m.

Por otra parte, en las últimas cuatro décadas, el mundo ha sido testigo de la invención y evolución del láser y de su particular aplicación en estudios atmosféricos. En efecto, la atmósfera fue uno de los primeros escenarios en el que las propiedades de la luz láser: alta potencia, monocromaticidad, corta duración y colimación, fueron puestas a prueba.

Las tecnologías que utilizan luz empezaron a sustituir a los sistemas que usan sonido y ondas de radio en nuevas aplicaciones en el estudio de la atmósfera. De

entre esas tecnologías, destaca el lidar (*Light Detection And Ranging*, de sus siglas en inglés). Lidar, radar láser, radar óptico, son los términos diversos con los que se ha denominado al sistema “radar” que utiliza radiación electromagnética a frecuencias ópticas, en lugar de ondas de radio. En un lidar la longitud de onda de radiación es de 10^4 a 10^5 veces más corta que la que usa un radar convencional.

Con los sistemas lidar, se realizan análisis de la atmósfera en grandes áreas y en períodos cortos de tiempo, y tienen una amplia aplicación en la evaluación de la estructura, propiedades, composición y dinámica de la atmósfera. Una ventaja adicional es que la detección puede realizarse a gran distancia y hasta en lugares inaccesibles para el hombre.

El lidar puede ser *biestático* o *monoestático*. En el lidar biestático se requieren dos instalaciones diferentes separadas cierta distancia, una instalación es para el emisor y la otra es para el receptor. La principal desventaja de esta configuración estriba en la dificultad para alinear el eje óptico del receptor con el eje de propagación del rayo láser.

En el lidar monoestático, el emisor y el receptor se encuentran en el mismo sitio; esta configuración es la preferida por los científicos porque la alineación del sistema es más sencilla, presenta mejor estabilidad y solamente requiere de una sola instalación para ubicar el sistema completo (emisor y receptor). Actualmente, el lidar biestático ha dejado de utilizarse, por lo que el término lidar se refiere predominantemente al lidar monoestático.

En una forma general los lidares se pueden clasificar en 6 tipos:

- Lidar Telémetro.
- Lidar de Esparcimiento Elástico (o dispersión elástica).
- Lidar de Absorción Diferencial.
- Lidar Doppler.
- Lidar Raman (inelástico).
- Lidar de Fluorescencia

El lidar telémetro (o *range finder*, como se conoce en inglés) es el más simple de los lidares. Se basa en la reflexión de la luz láser en el objetivo y se usa para

medir la distancia entre el lidar y un objetivo sólido o topográfico (edificio, montaña, artefacto, etc.). La distancia al objetivo se mide tomando el tiempo que tarda el pulso láser en recorrer el camino de ida y vuelta al objetivo. Su principal uso es la medición de distancias de los objetivos militares.

El lidar de esparcimiento elástico se basa en la dispersión elástica que sufre la luz láser en su trayecto al propagarse por la atmósfera. El término elástico se refiere a que la luz que se dispersa y regresa a la misma longitud de onda que aquella emitida por el láser. Los dispersores de luz son las partículas y gases que constituyen la atmósfera y que se encuentran en el trayecto de propagación del haz láser. Su principal aplicación es el estudio de la estructura atmosférica. El objetivo de este trabajo de tesis es el desarrollo de un lidar de este tipo.

El lidar de absorción diferencial o DIAL (*Differential Absorption Lidar*, de sus siglas en inglés) se usa para medir la concentración de especies moleculares en la atmósfera como: ozono, dióxido de azufre, vapor de agua u otras especies contaminantes. Aprovecha la propiedad de absorción espectral que tienen los gases moleculares para determinar su presencia en la atmósfera. Usa luz láser a dos longitudes de onda diferentes, una dentro de la banda de absorción del gas y la otra ligeramente fuera de esa banda. La diferencia en las intensidades (o absorción diferencial) de las dos señales lidar elásticas a esas dos longitudes de onda, permite deducir la concentración del gas molecular de interés (cf. sección 5.3). Este tipo de lidar tiene actualmente gran aplicación en el estudio del ozono en la troposfera y la estratosfera, así como en el estudio de otros constituyentes y contaminantes atmosféricos.

El lidar Doppler se utiliza para medir la velocidad de un objetivo. Su principio de funcionamiento se basa en el cambio en la longitud de onda que sufre la luz al alcanzar un objetivo en movimiento (efecto Doppler). Se usa principalmente para medir velocidad de viento, de nubes o de estratos atmosféricos.

El lidar Raman detecta especies moleculares aprovechando el corrimiento en la longitud de onda producido por la dispersión Raman de vibración de la molécula seleccionada, promovida por la irradiación láser. El sistema de recepción se sintoniza para recibir la radiación dispersada a las longitudes de onda Raman y determinar especies como nitrógeno molecular (387 nm) y vapor de agua (408 nm) en la atmósfera.

El lidar de fluorescencia aprovecha la propiedad que tienen algunos compuestos para absorber la luz (luz ultravioleta) y esparcirla a una longitud de onda más larga; propiedad que se conoce como fluorescencia. Su principal aplicación es la localización de hidrocarburos en la superficie del agua (mar, lagos o ríos).

Debido a la capacidad del lidar para determinar parámetros atmosféricos, en el Instituto de Investigaciones Eléctricas, se inició la tarea de desarrollar un sistema lidar basado en la dispersión elástica de la luz en la atmósfera, con el objetivo de tener una herramienta para analizar la estructura de la parte baja de la atmósfera (<40 km) y apoyar los distintos proyectos relacionados con estudios atmosféricos. Por estructura se entiende la existencia o formación de estratos o capas, zonas de transición o de turbulencia, y su distribución espacial.

Cabe señalar que son pocos los países en el mundo que han desarrollado y aplicado sistemas lidar en el estudio de la atmósfera, aunado a ello, los científicos involucrados en su desarrollo no difunden los detalles de sus sistemas experimentales ni los métodos analíticos con los que se elaboran los algoritmos para el proceso de las señales lidar; debido principalmente a su evidente aplicación militar. Por esas razones, el desarrollo de un lidar debe efectuarse partiendo desde los principios fundamentales.

En esta tesis se presenta el desarrollo de un Lidar de Esparcimiento Elástico y de un método propio para procesar las señales de retorno atmosféricas, así como la teoría involucrada en su desarrollo, diseño y construcción, y se presentan además los resultados de los sondeos en la atmósfera. En el capítulo segundo, se presenta una breve reseña de los sistemas lidar que se utilizan en diversas partes del mundo. El capítulo tres está dedicado a describir en forma breve los principios que rigen la propagación y dispersión de la luz láser en la atmósfera. En el capítulo 4 se discuten las bases del funcionamiento del lidar, estableciendo las ecuaciones que describen la dispersión atmosférica de luz láser. En el capítulo 5 se presentan algunos de los métodos más conocidos que se utilizan para procesar la señal lidar. En el capítulo 6 se presenta en detalle el método del cociente de coeficientes de dispersión, desarrollado en el marco de esta tesis para procesar las señales de dispersión elástica obtenidas, que permite localizar y resaltar los detalles de la estructura de la atmósfera. En el capítulo 7 se presentan los criterios y parámetros que fueron considerados para el diseño y la construcción

del lidar. En el capítulo 8 se prueba el desempeño del método de cocientes desarrollado mediante una comparación con el método de Absorción diferencial, que sirve para demostrar su validez en el procesamiento de las señales lidar; y que muestran que el método además de que desempeña su función, es de fácil aplicación y funciona aún en atmósferas muy contaminadas. En este mismo capítulo se presentan también las mediciones con el sistema en la atmósfera, así como los resultados obtenidos. En el capítulo 9 se hacen algunas conclusiones sobre el proyecto de investigación desarrollado y en el capítulo 10, se presentan las referencias bibliográficas consultadas durante el desarrollo de este trabajo. Finalmente, en el Anexo, se presentan los detalles de construcción y algunas fotografías del sistema lidar de esparcimiento elástico

2

ANTECEDENTES

2.1. Historia del Lidar.

La idea de estudiar la atmósfera con fuentes luminosas se remonta al año 1930, cuando Synge [1] y un grupo de científicos sugirieron por primera vez el uso de fuentes intensas de luz para determinar la densidad de la atmósfera. Como el láser no existía aún en aquella época, se proponía el uso de faros luminosos para sondear la atmósfera. Los primeros experimentos de ese tipo que se realizaron para determinar la densidad de la atmósfera a grandes alturas, fueron reportados en 1937 por Hulbert [2] y años después por Elterman, en 1954 [3].

Con la invención de los láseres de rubí en 1960 [4], capaces de generar pulsos ópticos, coherentes y potentes, cuya luz podía ser transmitida largas distancias con muy poca divergencia, se contó con el instrumento ideal para examinar la atmósfera y sus componentes. Así, en el año de 1962, McClung y Hellwarth [5] reportaron por primera vez sus observaciones sobre la propagación y dispersión de la luz láser en la atmósfera. Las primeras aplicaciones formales en el estudio de la atmósfera fueron llevadas a cabo por Fiocco y Smullin [6] del Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT), quienes en 1963, registraron ecos de la luz láser provenientes de la troposfera y de las regiones superiores de la atmósfera. Ese mismo año, Ligda [7] empleó las primeras técnicas lidar para rastrear partículas de origen volcánico en la troposfera; a partir de esos estudios, el lidar empezó a ser ampliamente reconocido. Es muy probable que el término *lidar* para denominar al radar óptico haya sido acuñado por Collis y Ligda [8,9] en 1966.

A partir de entonces, el descubrimiento de nuevas fuentes láser, el desarrollo de nuevos compuestos y materiales; los avances de la óptica, de la optoelectrónica, de los detectores y de los sistemas electrónicos de adquisición y de procesamiento de señales, han permitido explotar el potencial del lidar para llevarlo a aplicaciones en una extraordinaria variedad de estudios atmosféricos.

El lidar se basa exactamente en el mismo principio en el que se basa el radar (*radio detection and ranging*), la única diferencia es que en el primero, la radiación se encuentra en el intervalo de las frecuencias cercanas a las de la luz visible.

Los componentes principales de un lidar típico se muestran en forma simplificada en la Figura 2.1, su principio de operación se basa en la emisión de un pulso corto e intenso de energía luminosa generado por el láser, que es enviado a través de la óptica de salida hacia la atmósfera. En su trayecto, la luz del haz es esparcida hacia todas las direcciones por las moléculas y partículas presentes en la atmósfera. Una porción de la luz es dispersada de regreso hacia su punto de origen (fenómeno que se conoce como retrodispersión, o *backscattering*, de su término en inglés). Esta luz es capturada con una óptica recolectora (el telescopio) y es enfocada a un detector de luz (fotodetector), en donde se mide la cantidad de luz retrodispersada como una función de la distancia al lidar. Para disminuir el ruido y aumentar el alcance del lidar, se coloca un filtro espectral antes del fotodetector para discriminar la radiación del láser de la radiación de fondo: luz solar o artificial difusa a otras longitudes de onda.

La señal luminosa en el detector, es convertida en señal eléctrica que luego es amplificada con un amplificador de bajo ruido. Esta señal eléctrica se transfiere a un osciloscopio u otro sistema de visualización o digitalización, en donde se observa la forma y el comportamiento de la señal recibida; para un estudio ulterior, la señal es llevada a una computadora para su proceso y análisis. Como la señal luminosa se adquiere en tiempo real, debe manipularse con sistemas de alta velocidad, dada la rapidez con la que se desarrolla el fenómeno.

La forma de la señal obtenida con un lidar es como la que muestra el dibujo de la Figura 2.2. La señal es generada por la retrodispersión que sufre el pulso láser al propagarse a través de la atmósfera. Básicamente, es una gráfica de potencia de

la luz retroesparcida y recibida de regreso, contra distancia. Cualquier inhomogeneidad en la atmósfera, se manifiesta en la gráfica, en intensidad, distancia y dirección.

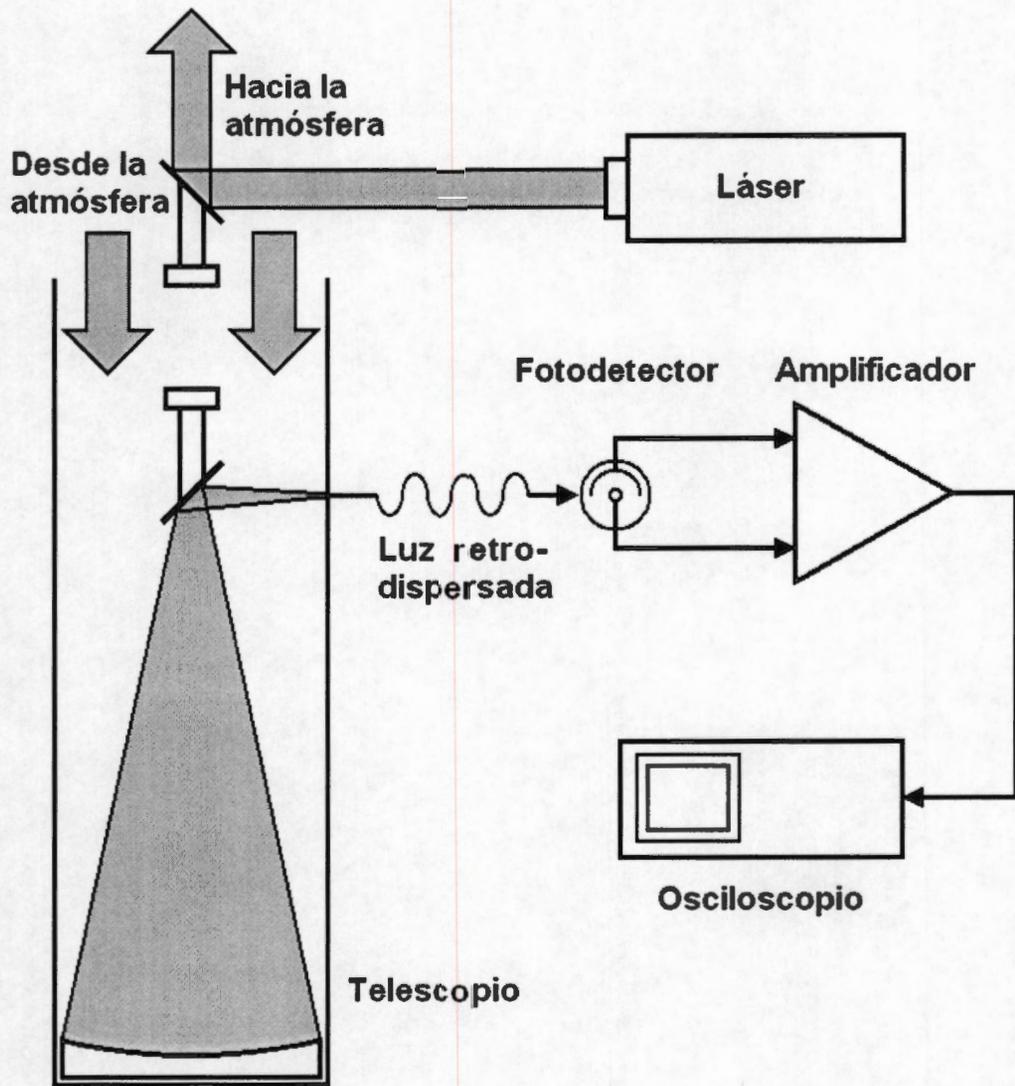


Figura 2.1. Esquema simplificado de un lidar típico.

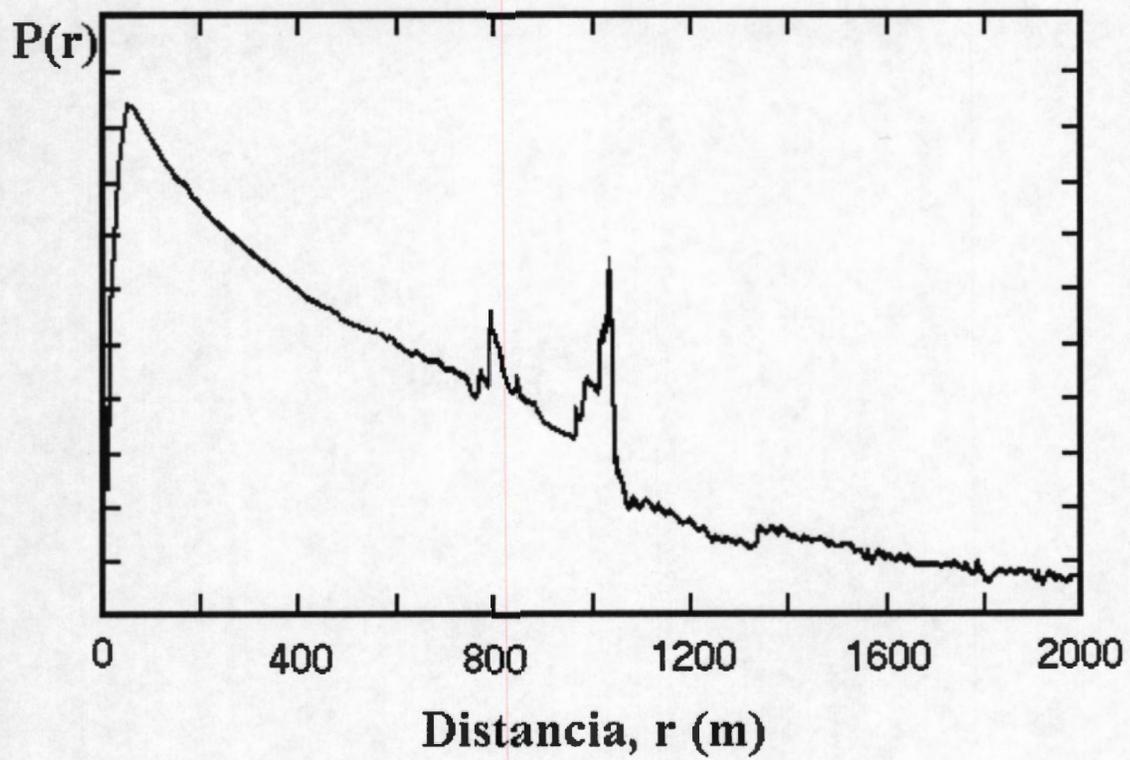


Figura 2.2. Gráfica de una señal Lidar.

2.2. Historia del Lidar en México.

A finales de la década de los 70, mientras en los países industrializados (Canadá, Francia, Italia, Reino Unido y Estados Unidos) se trabajaba plenamente en el desarrollo de lidares de diferentes tipos, usos y aplicaciones, en México no existía actividad alguna relacionada con ello.

En el año de 1986, en el marco de un proyecto de cooperación científica entre los gobiernos de México e Italia, coordinado a través de sus respectivos ministerios de relaciones exteriores, se acordó un proyecto para la construcción conjunta de un lidar de absorción diferencial (DIAL) para detectar dióxido de azufre en la atmósfera. El principal objetivo de ese proyecto era transferir la tecnología lidar a México; tecnología en la que los científicos italianos tenían vasta experiencia, pues habían desarrollado exitosamente y tenían en uso varios sistemas DIAL para la detección de dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y ozono (O_3).

En ese proyecto, la construcción del DIAL quedaría a cargo del *Centro Informazione Studi Esperienze* (CISE) de Italia y del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) de México. El DIAL sería construido por investigadores italianos en las instalaciones del CISE, con la participación de investigadores mexicanos. El principal beneficio para México consistía en que la mayor parte del costo del proyecto iba a ser erogado por el gobierno italiano. Los recursos para comprar una plataforma móvil (camión) para montar el DIAL, los pasajes y el salario de los investigadores mexicanos serían aportados por el IIE.

En el año de 1989 el Laboratorio Móvil DIAL, montado sobre el chasis de un camión de 22 toneladas, se entregó oficialmente a México. A partir de entonces y tan pronto como el DIAL fue transportado a México, se empezaron a realizar determinaciones de dióxido de azufre en la atmósfera sobre zonas aledañas a las centrales generadoras de energía de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y de otras industrias. Se realizaron mediciones en centrales termoeléctricas, como: Petacalco, Gro.; Tula, Hgo.; Valle de México, Méx.; Manzanillo, Col.; Jorge Luque, Méx; y en industrias como: Colgate-Palmolive; entre otras.

En el año de 1991, como un resultado de la enorme preocupación por la contaminación en la Cd. de México, se dio inicio a un proyecto muy ambicioso denominado Estudio Global de la Calidad del Aire [10], en el que participaron varias instituciones mexicanas y extranjeras. El proyecto comprendía un estudio integral de la contaminación complementada con modelación y simulación de procesos en la atmósfera sobre el área metropolitana de la Cd. de México.

En el estudio integral de la contaminación participaron con mediciones en la atmósfera tres sistemas de tecnología avanzada: el DIAL del IIE, un lidar de esparcimiento elástico del Laboratorio Nacional de Los Álamos (LANL) y un avión de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, de sus abreviaturas en inglés) de Estados Unidos de América. Se puede afirmar que en el marco de ese proyecto se realizó en México, la más intensa actividad relacionada con los lidares, que haya habido en su historia.

Con las experiencias vividas en ese proyecto, en el año 1999, se inició en el Instituto de Investigaciones Eléctricas un proyecto para desarrollar un lidar de esparcimiento elástico, con el fin de complementar las mediciones que se realizaban con el DIAL. Durante los primeros tres años del proyecto se adquirieron las piezas más importantes (y más caras) del lidar: el láser Nd:YAG, el digitalizador y el telescopio. En los años posteriores, a pesar de que los recursos eran cada vez más escasos, se logró diseñar y construir el lidar, y el método para interpretar las señales lidar; que son los que se reportan en este trabajo de tesis.

En el año 2002, un grupo de investigación [11], reportó el inicio de la construcción de un lidar de absorción diferencial (DIAL) con el fin de utilizarlo en la medición de contaminantes en la atmósfera en las zonas industriales del Estado de Guanajuato. Sin embargo, a la fecha actual, no se ha encontrado en la literatura alguna referencia posterior sobre el desarrollo o uso de dicho lidar; lo que hace suponer que el proyecto no concluyó satisfactoriamente.

Actualmente en México, los recursos para ciencia y tecnología siguen siendo escasos, lo que hace difícil iniciar nuevos proyectos para avanzar o continuar en la tecnología lidar; peor aún, es probable que los pocos lidares que existen no puedan sobrevivir a esa falta de recursos.

2.3. Usos y Aplicaciones del Lidar.

Desde su desarrollo y hasta hoy en día, la aplicación del lidar en el estudio de la atmósfera se realiza cada vez con mayor frecuencia. En muchas partes del mundo [12], lidares de altas especificaciones se han utilizado satisfactoriamente en una infinidad de aplicaciones en la atmósfera, entre las más importantes pueden citarse: observaciones meteorológicas [13]; la determinación de perfiles verticales de concentración de aerosoles [14]; el estudio de la inversión de radiación nocturna [15], el diseño de redes de vigilancia de la calidad del aire [16]; la determinación de perfiles de temperatura atmosféricos [17, 18]; y en general, en el estudio de las plumas de emisiones contaminantes [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26].

Otra aplicación interesante, que representa hasta ahora la distancia más grande cubierta por un lidar es el Experimento de Medición de Distancia Lunar con Láser (*Lunar Laser Ranging Experiment*, de su nombre en inglés) [27]. Es un sistema que ha estado midiendo la distancia entre la Tierra y la Luna durante casi 40 años. Los lidares, situados en la Tierra, se apuntan a un retroreflector óptico (arreglo de prismas de esquina de cubo) situado en la Luna, que regresa el pulso láser a su lugar de origen. El Experimento se hizo realidad con la instalación del retroreflector en la Luna el 21 de julio de 1969, durante la misión del Apolo 11. Otros dos retroreflectores que fueron instalados durante las misiones Apolo 14 y Apolo 15, han estado contribuyendo al Experimento. La precisión del Experimento no sólo ha permitido determinar una distancia promedio de 384,403 kilómetros, sino que además, ha encontrado que la Luna se aleja de la Tierra a una razón de 38 mm por año.

Tal ha sido el impacto de esta relativamente nueva herramienta, que en algunos países su uso y aplicación han sido adoptados por las agencias de protección del ambiente como método normalizado alternativo para determinar la opacidad de las plumas de emisiones a la atmósfera [28].

Desafortunadamente, hasta donde llega el conocimiento del autor de este trabajo, en México no se han realizado esfuerzos fructíferos para el desarrollo de un lidar.

Lo anteriormente manifestado, además de describir el uso y el potencial de aplicación de los lidares, justifica plenamente el desarrollo de un lidar de

esparcimiento elástico para contar en nuestro país con una herramienta con la capacidad para realizar estudios de la estructura atmosférica. Una de las razones por la que se decidió construir este tipo de lidar es que el lidar de esparcimiento (o dispersión elástica) no requiere de una inversión económica muy elevada. Sin embargo, el tratamiento o procesamiento de la señal es más complicado que el que se realiza en los otros tipos de lidar, como por ejemplo, el lidar de absorción diferencial.

Entonces, considerando la longitud de onda de los láseres que se utilizan en los lidares, por ejemplo: $\lambda = 532 \text{ nm}$, la dispersión de las partículas se puede clasificar en tres tipos. El primer tipo, cuando $\phi < 1$, representa la dispersión de partículas pequeñas, por ejemplo las de una atmósfera limpia, compuesta solamente por las moléculas de los gases que la constituyen; este tipo de dispersión es equivalente a la dispersión de Rayleigh. La región donde $\phi > 40$, representa la dispersión de partículas grandes, como aquellas que se encuentran en neblinas espesas o nubes de lluvia. En la región intermedia, donde ϕ se encuentra entre 1 y 40, se representan aquellos tamaños de partícula o aerosoles que se encuentran normalmente en las partes bajas de la atmósfera.

Otro aspecto singular de la teoría de Mie es que la distribución angular de la dispersión² es una función del parámetro de tamaño ϕ , como se ilustra en el dibujo de la Figura 3.2. Para valores pequeños de ϕ (Fig. 3.2a), la distribución es simétrica, similar a la dispersión de Rayleigh (Ec. 3.1). Conforme el parámetro de tamaño se incrementa, por ejemplo para $\phi = 1$ (Fig. 3.2b), aparecen discrepancias con la teoría de Rayleigh: se manifiesta una asimetría entre la fracción de luz dispersada hacia adelante y la dispersada hacia atrás (retrodispersión); y se observa aún mayor cantidad de luz dispersada hacia adelante que hacia atrás. Para partículas más grandes, como se muestra en la Fig. 3.2c, la asimetría se hace mucho más pronunciada y prácticamente toda la luz aparece dispersada hacia adelante; la dispersión a un ángulo dado cambia drásticamente para incrementos pequeños en el tamaño de la partícula, dando lugar a la aparición de lóbulos tanto en la dispersión hacia adelante como en la dispersión hacia atrás. Cuando el tamaño de la partícula es mucho mayor que la longitud de onda de la luz incidente, la luz sigue las reglas de la óptica geométrica.

² A la distribución angular de la dispersión se le conoce habitualmente como *función de fase*, término que tuvo su origen en astronomía para denominar las fases de los planetas o satélites, pero que no tiene relación alguna con ángulo de fase.

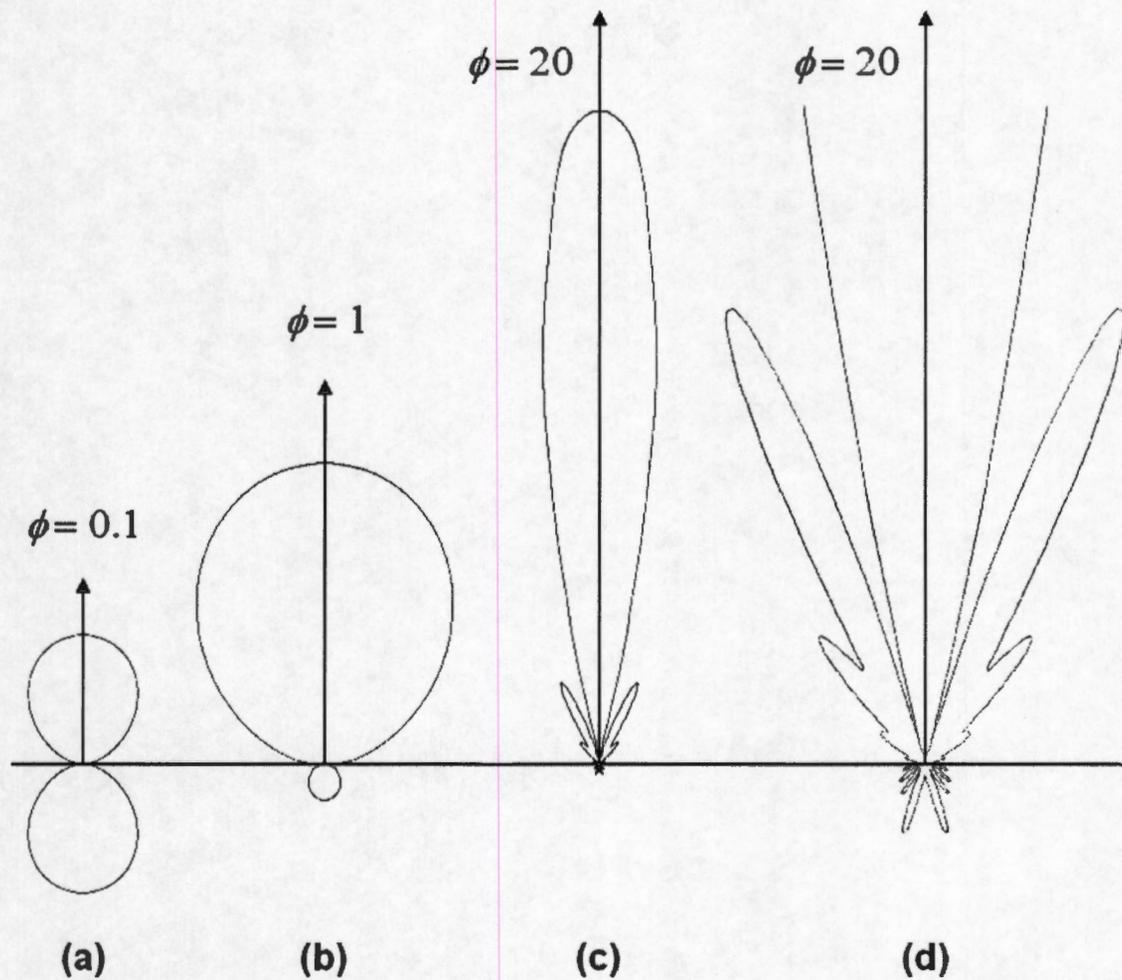


Figura 3.2. Gráficas polares de la distribución angular del esparcimiento para esferas con índice de refracción $n = 1.33$ para distintos valores del parámetro de tamaño ϕ . La figura (d) es una ampliación de la figura (c).

Las peculiaridades de la dispersión de Mie para $\phi > 1$ se pueden listar como:

(i). La intensidad de la dispersión en la dirección hacia adelante es mucho mayor que la dispersión hacia atrás. Conforme el parámetro ϕ se incrementa, la dispersión hacia adelante se incrementa.

(ii). La dependencia angular de la dispersión es mucho más complicada que aquella correspondiente a moléculas o partículas pequeñas ($\phi < 1$). Conforme ϕ se incrementa, aparecen lóbulos direccionales adicionales de radiación.

(iii). La dispersión para partículas muy grandes ($\phi > 40$) es relativamente independiente de la longitud de onda, comparada con la dispersión de moléculas o de partículas pequeñas.

Resumiendo, la función global de retrodispersión β depende de la longitud de onda λ , y del número, tamaño y propiedades dieléctricas de las partículas presentes en la atmósfera. Esta combinación de variables desconocidas hace imposible extraer información exacta sobre la naturaleza del conjunto de partículas a partir de una medida de la retrodispersión.

La mayor parte de la materia particulada presente en la atmósfera tiene tamaño del mismo orden que la longitud de onda de los láseres utilizados en los lidares (visible o infrarrojo cercano), lo que conduce a que la magnitud de la retrodispersión, en esta región de dispersión Mie para cada partícula, dependa de una manera compleja de su parámetro de tamaño. A este respecto, conviene citar a lo que Bohren y Huffman [48] llaman “*el problema inverso*” que consiste en encontrar mediante un análisis de la luz dispersada, la partícula o partículas que son responsables de la dispersión. Aquí radica la dificultad del problema y como ellos afirman: “es como tratar de describir un dragón, en su forma y tamaño, mediante el puro análisis de sus huellas”.

Sin embargo, en un conjunto grande de partículas, las variaciones en la retrodispersión causadas por los diferentes tamaños de cada partícula, tienden a promediarse; y entonces, en términos generales, la función global de retrodispersión depende directamente de la suma de las secciones transversales de las partículas, sin que exista una dependencia apreciable con respecto de la longitud de onda [9]. Ello permite, elaborar métodos para encontrar de forma

aproximada y restringida la distribución de tamaños de la materia particulada presente en la atmósfera.

Como consecuencia de lo anterior, un lidar de dispersión elástica, sólo puede proporcionar información sobre la dispersión producida en forma conjunta por gases, compuestos, partículas y aerosoles presentes en la atmósfera. El objetivo principal de un lidar de dispersión elástica es localizar, en dirección y distancia, zonas en las que existen cambios de la estructura atmosférica causados por gradientes de densidad, concentración de partículas (o materia particulada), altura de techo de nube, altura de capa de mezcla, presencia de plumas de emisiones contaminantes, etc.

Cuando el objetivo es desarrollar un lidar de dispersión elástica para estudiar la atmósfera, uno de los problemas medulares es encontrar un método para el escrutinio de la señal lidar. En consecuencia, parte de las actividades de este trabajo de investigación, estuvo dedicado al desarrollo de un método para el análisis de la señal.

4

LAS ECUACIONES PARA RETRODISPERSIÓN ATMOSFÉRICA DE LUZ LÁSER.

4.1. El Diagrama Espacio-tiempo.

En la figura 4.1 se muestra el diagrama espacio-tiempo, que permite describir el fenómeno de retrodispersión que sufre la luz de un pulso láser al propagarse por la atmósfera. El eje de las ordenadas representa el alcance o recorrido del pulso láser, mientras que el eje de las abscisas representa el tiempo transcurrido. Para delimitar la longitud del pulso láser, se ha hecho la suposición de que el pulso tiene un perfil rectangular, en vez de un perfil gaussiano.

Cuando se dispara el láser, en el punto con coordenadas ($R = 0, t = 0$), el pulso de luz se propaga hasta que encuentra partículas dispersoras que causan que parte de la luz se regrese a su punto de partida ($R = 0$), después de recorrer una distancia $2R$ en el tiempo $t = 2R/c$, siendo c , la velocidad de propagación de la luz.

Como el pulso láser tiene una duración τ , la longitud o extensión espacial del pulso es $c\tau$, y el detector, situado a $R = 0$, recibe la radiación dispersada durante el intervalo temporal $(t, t + \tau)$, lo cual corresponde a las distancias comprendidas entre:

$$\frac{ct}{2} \leq R \leq \frac{ct}{2} + \frac{c\tau}{2},$$

Es decir, la distancia mínima de separación entre dos medidas consecutivas de la luz recibida por un lidar, debe ser mayor o igual a $c\tau/2$. Entonces, τ define el límite inferior o mínimo de la resolución espacial que puede tener un sistema lidar.

Por lo anterior, los sistemas de electrónicos de adquisición de señales de un lidar, no deberán tener velocidades de muestreo superiores a $1/\tau$. En el caso específico de un láser cuyo pulso tiene duración de $\tau = 7$ ns, la velocidad de muestreo sólo puede ser menor o igual a 143×10^6 muestras por segundo.

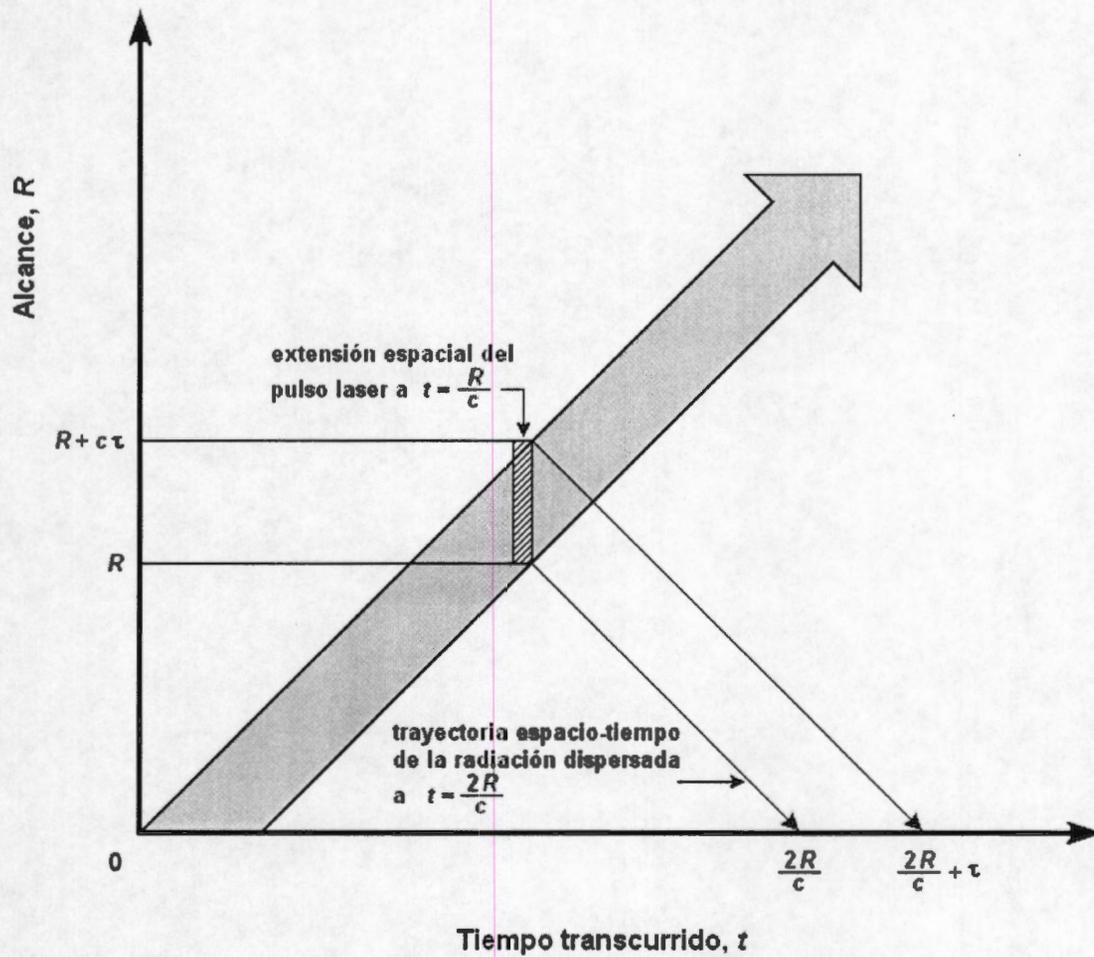


Figura 4.1. Diagrama espacio-tiempo para el fenómeno de retrodispersión, considerando un pulso láser con perfil rectangular.

4.2. La Ecuación General de Esparcimiento Atmosférico para Lidar.

En principio, para un lidar, en el que la fuente emisora (láser) y el receptor (telescopio y detector) se encuentran en el mismo sitio (lidar monoestático), la potencia $P(\lambda, R)$ de la señal que recibe el detector, esparcida 180° por un elemento de atmósfera que se encuentra a la distancia R , es de acuerdo con lo establecido por Measures [49]:

$$P(\lambda, R) = \frac{A_0}{R^2} \zeta(\lambda) \int_0^R \beta(\lambda_L, \lambda, R) T(\lambda, R) \xi(R) I(R) A_L(R) dr, \quad (4.1)$$

donde, A_0/R^2 representa el ángulo sólido de recolección de la óptica de recepción (visto desde el elemento de atmósfera); $\zeta(\lambda)$, representa la respuesta espectral del sistema de recepción (óptica, filtro y detector); $\beta(\lambda_L, \lambda, R)$, representa el coeficiente de retrodispersión asociado al elemento de atmósfera a la longitud de onda del láser (dispersión elástica) y a otras longitudes de onda (dispersión inelástica); $T(\lambda, R)$, es el factor de transmisión atmosférica a la longitud de onda λ , en el trayecto R ; $\xi(R)$, es un factor geométrico que representa la probabilidad de que la radiación dispersada por el elemento de atmósfera sea recibida por el detector; $I(R)$, es la irradiancia producida por el láser en la posición R ; y A_L es el área irradiada por el láser en la posición R .

Considerando que el pulso láser tiene una duración τ , la integración en la Ec. (4.1) se realiza sobre el intervalo de distancia:

$$\frac{ct}{2} \leq R \leq \frac{ct}{2} + \frac{c\tau}{2},$$

siendo c la velocidad de la luz y t el tiempo que tarda la luz en recorrer el camino de ida y regreso al elemento de atmósfera situado a la distancia R . Es decir, $2R = ct$. En el tramo de distancia $c\tau/2$, los términos en el integrando se pueden considerar constantes. Entonces,

$$P(\lambda, R) = \frac{A_0 c \tau}{2R^2} \zeta(\lambda) \beta(\lambda_L, \lambda, R) T(\lambda, R) \xi(R) I(R) A_L(R), \quad (4.2)$$

Si E_L es la energía que transporta el pulso láser, su irradiancia, en la posición R está dada por,

$$I(R) = \frac{E_L T(\lambda_L, R)}{\tau A_L(R)},$$

$$\Rightarrow P(\lambda, R) = \frac{A_0 c E_L}{2R^2} \zeta(\lambda) \xi(R) \beta(\lambda_L, \lambda, R) T(\lambda_L, R) T(\lambda, R). \quad (4.3)$$

Por otra parte, de la ley de atenuación de Bouguer, también llamada ley de Lambert [50] para dispersión elástica (λ_L) y dispersión inelástica (λ), los coeficientes de transmisión están dados, respectivamente, por:

$$T(\lambda_L, R) = \exp \left\{ - \int_0^R \alpha_L(\lambda_L, R) dr \right\} \quad (\text{Interacción elástica}),$$

$$T(\lambda, R) = \exp \left\{ - \int_0^R \alpha_\lambda(\lambda, R) dr \right\}, \quad (\text{Interacción inelástica}),$$

donde, $\alpha_L(\lambda_L, R)$ y $\alpha_\lambda(\lambda, R)$ son los coeficientes de atenuación (o extinción) de la atmósfera en la posición R , a la longitud de onda del láser y a las otras longitudes de onda detectadas, respectivamente.

Al combinar los coeficientes de atenuación se obtiene el factor total de transmisión atmosférica:

$$T(R) = T(\lambda_L, R) T(\lambda, R) = \exp \left\{ - \int_0^R [\alpha_L(\lambda_L, R) + \alpha_\lambda(\lambda, R)] dr \right\}.$$

Si se introduce $\alpha(R) = \alpha_L(\lambda_L, R) + \alpha_\lambda(\lambda, R)$, como el coeficiente global de atenuación entonces:

$$T(R) = T(\lambda_L, R) T(\lambda, R) = \exp \left\{ - \int_0^R \alpha(R) dr \right\} \quad (4.4)$$

y sustituyendo la Ec. (4.4) en la Ec. (4.3), se obtiene:

$$P(\lambda, R) = \frac{A_0 c E_L}{2R^2} \zeta(\lambda) \xi(R) \beta(\lambda_L, \lambda, R) \exp \left\{ - \int_0^R \alpha(R) dr \right\}.$$

Considerando que $P_L = E_L/\tau$ es la potencia promedio del pulso láser,

$$\Rightarrow P(\lambda, R) = P_L \frac{c\tau A_0}{2R^2} \zeta(\lambda) \xi(R) \beta(\lambda_L, \lambda, R) \exp \left\{ - \int_0^R \alpha(R) dr \right\}. \quad (4.5)$$

La Ec. (4.5) describe la retrodispersión atmosférica de un pulso láser [51], y se utiliza generalmente como base para el desarrollo de los algoritmos con los que se interpreta la señal lidar en el caso de dispersión no-elástica (esparcimiento Raman y fluorescencia) [52].

4.3. La Ecuación para el Lidar Elástico.

En el caso específico de un lidar basado solamente en la dispersión elástica por gases y partículas, la longitud de onda de la luz que se recibe y detecta es invariablemente igual a la que emite el láser, es decir:

$$\lambda = \lambda_L,$$

entonces, con la Ec. (4.5):

$$P(\lambda_L, R) = P_L \frac{c\tau A_0}{2R^2} \zeta(\lambda_L) \xi(R) \beta(\lambda_L, R) \exp \left\{ - 2 \int_0^R \alpha(R) dr \right\}. \quad (4.6)$$

Es importante señalar que dado el gran número de tamaños, formas y composición de los elementos dispersores (moléculas, partículas, aerosoles, etc.)

presentes en la atmósfera, el coeficiente de retrodispersión (β) global es una función extremadamente compleja.

La ecuación (4.6), describe la retrodispersión elástica atmosférica y constituye la base para la interpretación y proceso de las señales de un lidar de dispersión elástica.

5

MÉTODOS PARA PROCESAR LA SEÑAL LIDAR

Desde las etapas tempranas del desarrollo de los sistemas lidar y hasta la fecha actual, el principal objetivo de las investigaciones dedicadas al lidar, ha sido encontrar, a partir de las señales de regreso, un método analítico que permita extraer información sobre la estructura de la atmósfera o la presencia de algún compuesto específico.

Es posible que la búsqueda o elaboración de este método para analizar las señales lidar constituya la tarea más difícil en el desarrollo y puesta en funcionamiento de un lidar. Desde su inicio, se han venido utilizando diferentes métodos, cada vez más sofisticados, con el fin de analizar las señales lidar.

El problema del análisis de los datos lidar está directamente relacionado con los problemas de interpretación de la señal lidar; a pesar de la amplia variedad de los sistemas lidar desarrollados que se utilizan para mediciones atmosféricas periódicas o de rutina, no se puede afirmar que existe un método de inversión o análisis de la señal, desarrollado o adaptado, que haya sido aceptado ampliamente como método estándar de medición. Entonces, un investigador debe enfrentarse a la tarea de adaptar, diseñar o elaborar su propio método de análisis para obtener de las señales lidar la información de su propio interés.

A continuación se presentan algunos de los métodos más conocidos que se utilizan para procesar las señales lidar.

5.1. Promedio de las Señales Lidar.

Aunque no es un método que permite analizar o interpretar las señales lidar, el cálculo del promedio de un conjunto de señales lidar es la forma más común para obtener señales que pueden indicar directamente la estructura atmosférica, o bien para proporcionar señales limpias que puedan ser procesadas posteriormente. Cuando la señal lidar generada por un solo pulso láser es digitalizada, se obtiene una colección de valores o números digitales que corresponden a la potencia de la luz recibida y cuya separación espacial está dada por la velocidad de digitalización del sistema (o velocidad de conversión de la información analógica a digital). El tiempo de digitalización (Δt) entre dos segmentos consecutivos de la señal define una longitud que representa la resolución del sistema y que usualmente se denota con la letra L ($L = \Delta t/2c$).

El método consiste en disparar el pulso láser un cierto número de veces, en una misma dirección, y promediar entre sí los valores de cada segmento (L) de la señal digitalizada. De esta forma, las contribuciones a la señal producidas en forma aleatoria por las partículas o por radiación no deseada, se suavizan y sólo prevalecen aquellas que corresponden a las características de la atmósfera que se mantuvieron fijas o constantes durante el período de tiempo en el que se realizaron ese número de veces los disparos del pulso láser.

La potencia de la señal disminuye rápidamente con respecto de la distancia (ver siguiente sección), mientras que el nivel de ruido aleatorio (no del sistema) más o menos constante sobre la longitud entera de la señal; a distancias lejanas, por ejemplo, superiores a 3 km, el ruido aleatorio puede tener la misma magnitud que la propia señal lidar. Entonces, el procedimiento de promediar un número determinado de señales disminuye el ruido aleatorio, incrementa la relación señal a ruido y en consecuencia, aumenta el alcance útil del lidar. Por ello, es siempre conveniente realizar el promedio de las señales, ya sea que se vaya a realizar o no un proceso posterior.

En las figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se ilustra el procedimiento de promediar las señales lidar. En la figura 5.1 se muestra una sola señal lidar real adquirida mediante un sólo disparo del láser. En la figura 5.2 se muestran, en la misma gráfica, cinco señales lidar independientes, obtenidas en forma consecutiva con una diferencia de tiempo de 100 ms (aproximadamente), con el lidar apuntando hacia la misma

dirección. Como se observa en la figura 5.2, las señales son muy parecidas; sin embargo, existen pequeñas diferencias entre ellas, principalmente a distancia lejana, que indican variaciones en el esparcimiento de luz de las partículas, causadas probablemente por el cambio de posición de las partículas o variaciones en sus características dispersivas, o simplemente, por ruido en el sistema.

Finalmente, en la figura 5.3 se muestra la señal lidar promediada, que al compararla con la figura 5.1 se aprecia que es una señal más suave, más limpia, en la que se destacan principalmente las no homogeneidades propias de la atmósfera.

Se ha presentado en forma gráfica el promediado de las señales lidar utilizando solamente 5 disparos del láser para poder ilustrar en forma simple el procedimiento. Pero en los sondeos atmosféricos que se han realizado con el lidar (sección 8.2) el promedio se realizó sobre 20 disparos del láser, lo cual proporciona señales aún más limpias que aquella mostrada en la figura 5.3.

Tradicionalmente, el promedio de las señales se realizaba mediante programas en la computadora sobre el conjunto de los datos almacenados, después de adquirir las diferentes señales; pero actualmente, los nuevos sistemas electrónicos digitalizadores tienen la capacidad para realizar en tiempo real y dentro de un banco de memoria a bordo, el promediado de los datos de las señales lidar, para obtener una señal más limpia.

Por lo anterior, es conveniente que el digitalizador que se vaya a utilizar en el sistema lidar tenga esta capacidad.

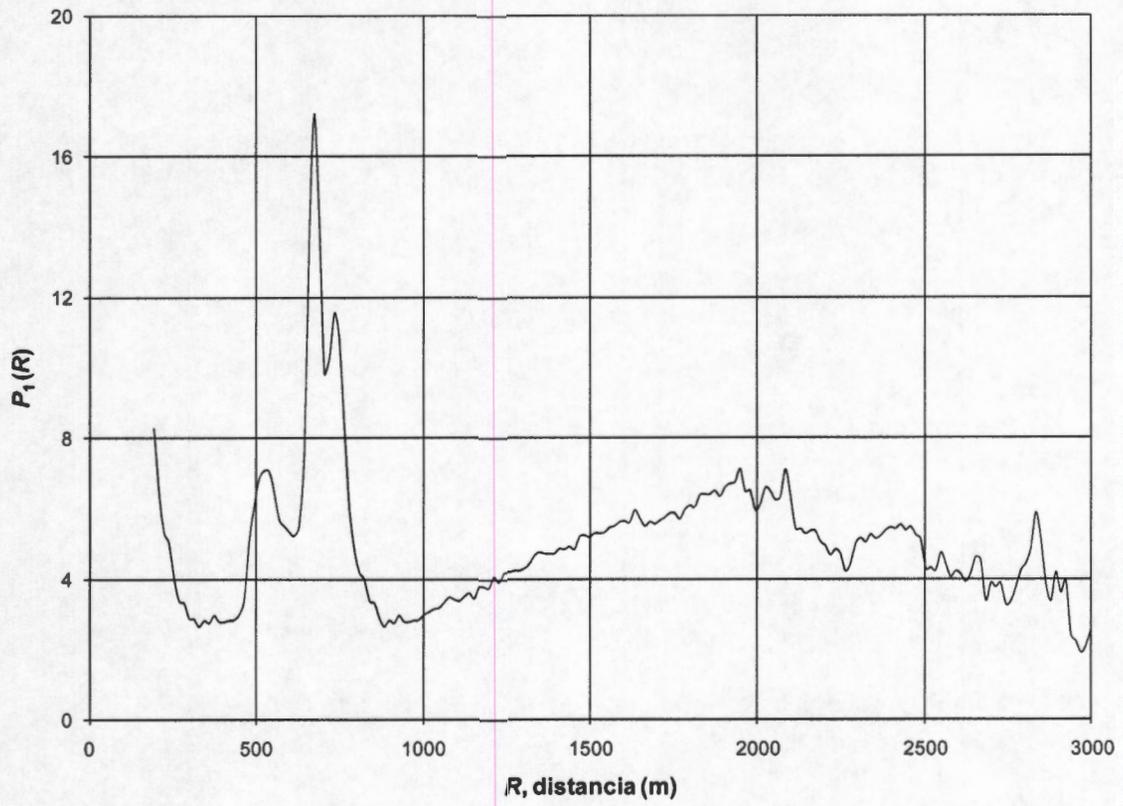


Figura 5.1. Gráfica de una señal lidar real correspondiente a un sólo disparo del pulso láser.

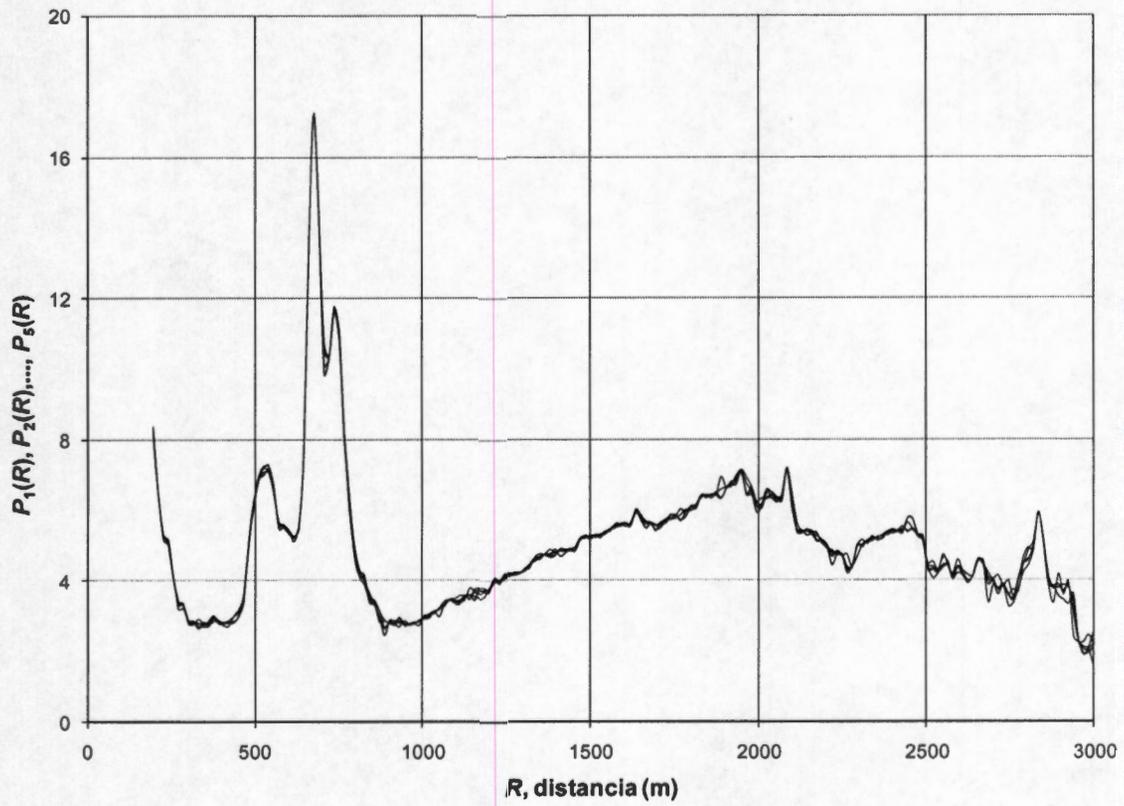


Figura 5.2. Gráfica de 5 señales lidar superpuestas obtenidas en sendos disparos.

3

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

3.1. Propagación y Esparcimiento de Luz en la Atmósfera.

La atmósfera contiene, además de una variedad de moléculas de gas, una mezcla de partículas y aerosoles líquidos y sólidos finamente diseminados que incluyen: polvo, cristales de hielo, niebla y nubes. El tamaño de estas partículas abarca cerca de cinco órdenes de magnitud: desde 10^{-2} micras hasta 10^4 micras, o aún más grandes como en el caso de las gotas de lluvia [29]. Entre las fuentes naturales de partículas se pueden mencionar los incendios, el polvo levantado por el viento, los volcanes y los residuos de reacciones químicas naturales o producidas por el hombre. En el caso de las partículas generadas por el hombre, la mayor parte de ellas son el resultado de la combustión de los diversos combustibles fósiles y desperdicios usados en la generación de energía o en la industria.

La concentración de partículas varía drásticamente dependiendo de la localidad, hora del día y época del año, pero generalmente decrece en la atmósfera con respecto de la altura. Debido a que la mayoría de las partículas son higroscópicas, su tamaño y distribución dependen también de la humedad relativa.

Conforme las dimensiones de esas partículas se hacen comparables a la longitud de onda que los ilumina, sus propiedades conjuntas de dispersión se vuelven extremadamente complejas.

La interacción de la radiación láser con la atmósfera permite revelar información sobre los perfiles de concentración de los gases y partículas en ella. La pérdida

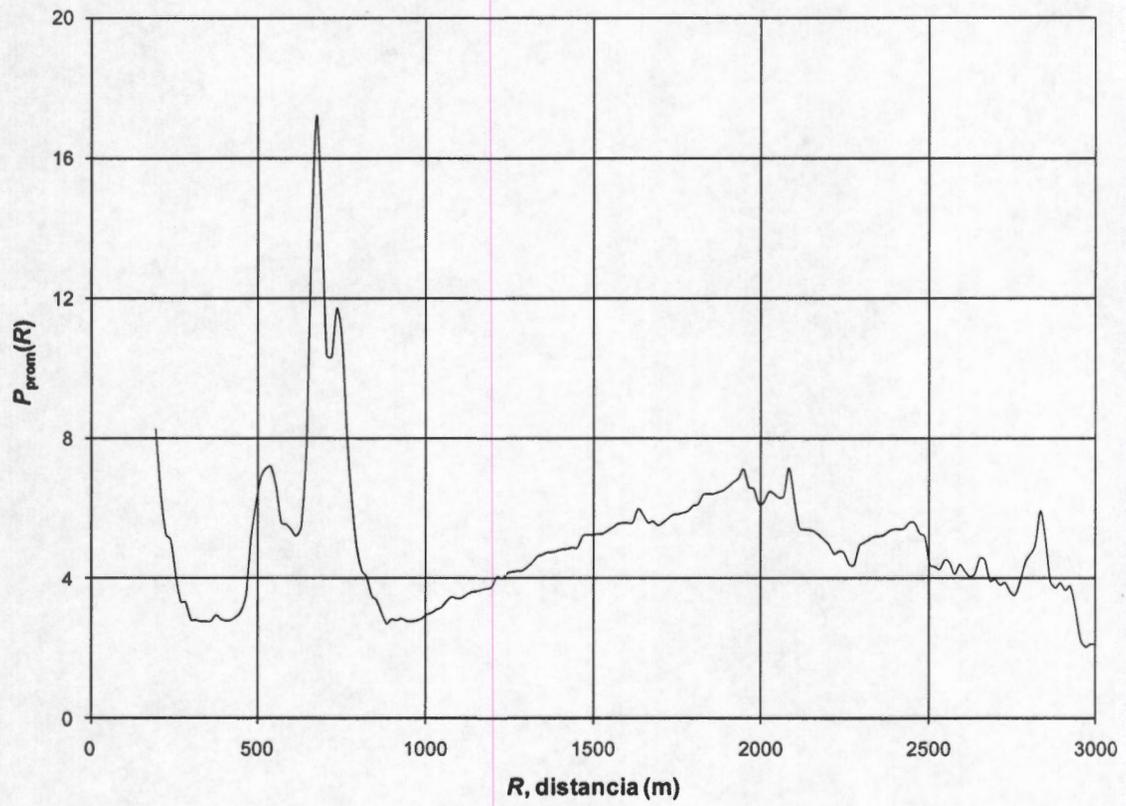


Figura 5.3. Gráfica de la señal lidar promedio de los 5 disparos.

5.2. Corrección de la Señal Lidar Mediante el Cuadrado de la Distancia (R^2).

A partir de la Ec. (4.6), si se supone que el pulso láser se propaga a través de una atmósfera estable, homogénea y sin discontinuidades, los términos de dispersión y de atenuación: $\beta(R)$ y $\alpha(R)$, se pueden considerar constantes, y entonces es posible escribir:

$$P(R) = f\left(\frac{1}{R^2}\right).$$

En esta ecuación, la atenuación que sufre la luz es una función f que depende en forma inversamente proporcional con el cuadrado de la distancia. Es decir, conforme aumenta el valor de la distancia R , la potencia de la señal disminuye cuadráticamente. Este comportamiento de la señal es el que restringe el alcance del lidar, ya que para un sistema lidar dado, la potencia de la señal decrece en varios órdenes de magnitud en pocos kilómetros.

El método de corrección de la distancia al cuadrado (R^2) consiste en imponer a la función $P(R)$ una función g del tipo [53, 54, 55]:

$$g(P(R)R^2),$$

de forma que la función compuesta:

$$P'(R) \equiv g(P(R)) = f\left(\frac{1}{R^2}\right)R^2,$$

donde $P'(R)$ es la potencia de la señal lidar corregida.

El método se aplica sobre la señal digitalizada multiplicando cada valor de la potencia de la señal por el cuadrado de la distancia a la que se encuentra el segmento de la señal que tiene ese valor.

La Figura 5.1 muestra la gráfica de una señal lidar real y la figura 5.4 muestra esa misma señal corregida con el método de corrección R^2 .

La ventaja de este método de corrección es que elimina la dependencia de la potencia de la señal con el inverso del cuadrado de la distancia, resaltando así las características de la estructura de la atmósfera, lo cual permite una mejor visualización y localización de los detalles atmosféricos.

Su principal desventaja es que la magnitud del ruido se incrementa también cuadráticamente por lo que a distancias muy lejanas el ruido puede ser mayor que la magnitud de la señal.

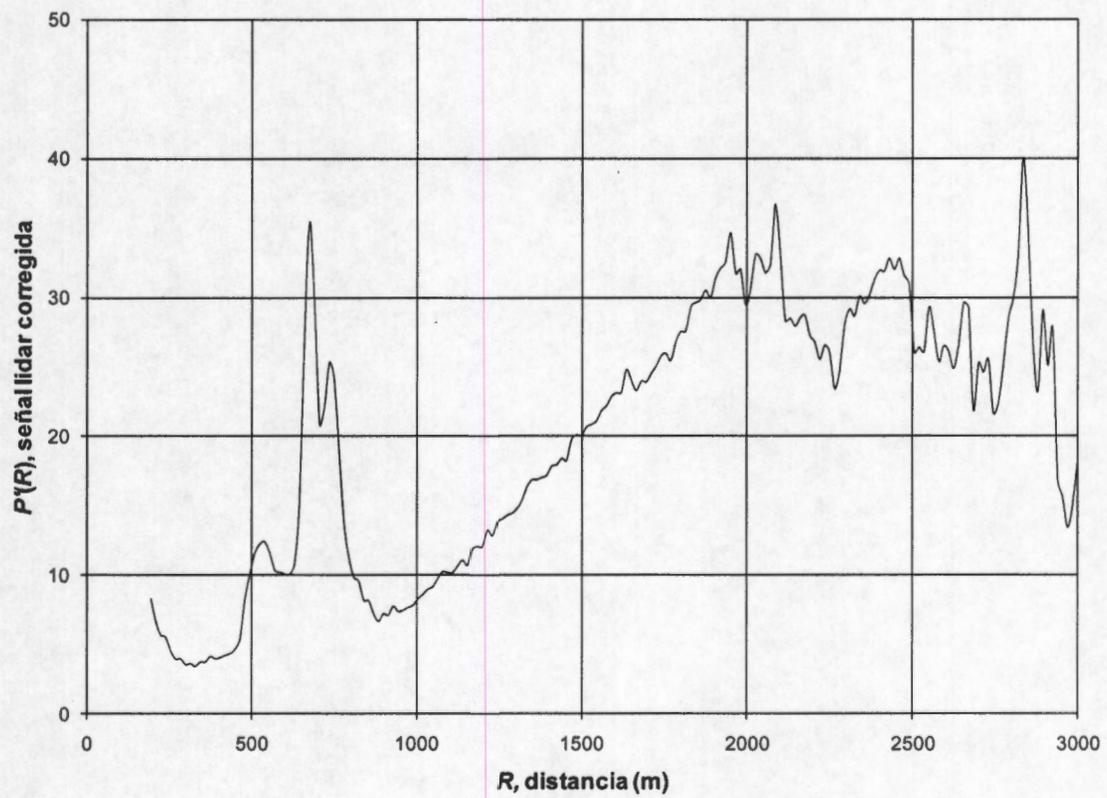


Figura 5.4. Señal lidar de la Fig. 5.1, corregida con el método de la distancia al cuadrado.

5.3. El Método de Absorción Diferencial (DIAL).

La subordinación de la potencia de la señal lidar con respecto del término de atenuación (función exponencial en la Ec. 4.6) puede aprovecharse para conocer la presencia y concentración de gases específicos en la atmósfera a distancias apreciables y con una sensibilidad relativamente alta ($\cong 1$ ppm-atm). El método se basa en la fuerte dependencia que tiene el coeficiente de absorción espectral con respecto de la longitud de onda de radiación. Es el caso del Lidar de Absorción Diferencial (*Differential Absorption Lidar*, o DIAL, de su abreviatura en inglés) [56, 57, 58, 59, 60, 61].

La absorción diferencial de un gas específico se manifiesta cuando se usan dos pulsos de radiación láser con longitudes de onda λ_1 y λ_2 , que se seleccionan de forma que λ_1 corresponda con la longitud de onda central de un máximo en la línea de absorción del gas de interés; mientras que λ_2 se sintoniza ligeramente fuera de esa línea de absorción. En la figura 5.3 se muestra el espectro de absorción del dióxido de azufre (SO_2) y las líneas espectrales correspondientes a λ_1 y λ_2 que se utilizan en la absorción diferencial. Es necesario procurar que estas dos longitudes de onda sean muy cercanas, de modo que al realizar el cociente entre las potencias de las señales lidar para cada longitud de onda, los términos comunes se cancelen y sea posible encontrar una relación entre la absorción diferencial y la concentración del gas de interés. Para este fin, se utilizan láseres sintonizados a λ_1 y λ_2 cuyos pulsos se disparan en forma alternada a través del mismo sistema óptico y se reciben y digitalizan de igual manera.

El coeficiente de atenuación en la Ec. (4.6) a la longitud de onda λ puede descomponerse en los siguientes términos:

$$\alpha(r) = \alpha_{Mie}(r) + \alpha_{gas}(r), \quad (5.1)$$

donde, como se ha visto (cf. sección 3.1), α_{Mie} es el coeficiente de extinción por dispersión, y α_{gas} es el coeficiente de extinción del gas presente en la atmósfera que absorbe a la longitud de onda del láser.

Sustituyendo la Ec. (5.1) en la Ec. (4.6):

$$P(\lambda, R) = P_L \frac{c\tau A_0}{2R^2} \zeta(\lambda) \xi(R) \beta(\lambda, R) \times \exp \left\{ -2 \int_0^R [\alpha_{Mie}(r) + \alpha_{gas}(r)] dr \right\} \quad (5.2)$$

Sea, λ_1 = longitud de onda de absorción del gas de interés.
 λ_2 = longitud de onda de poca absorción,
 tales que, $\lambda_2 = \lambda_1 + \delta\lambda$.

Entonces el cociente entre la potencia de la señal lidar para λ_1 y la potencia de la señal para λ_2 es, de acuerdo con la Ec. (5.2):

$$Q(R) = \frac{P(\lambda_1, R)}{P(\lambda_2, R)} = \frac{P_L(\lambda_1) \zeta(\lambda_1) \beta(\lambda_1, R)}{P_L(\lambda_2) \zeta(\lambda_2) \beta(\lambda_2, R)} \exp \left\{ -2 \int_0^R [\alpha_{Mie}(\lambda_1, r) + \alpha_{gas}(\lambda_1, r)] dr - 2 \int_0^R [-\alpha_{Mie}(\lambda_2, r) - \alpha_{gas}(\lambda_2, r)] dr \right\}. \quad (5.3)$$

Como λ_2 se escoge de manera que $\delta\lambda$ sea muy pequeña, se puede considerar que,

$$\frac{\zeta(\lambda_1) \beta(\lambda_1, R)}{\zeta(\lambda_2) \beta(\lambda_2, R)} = 1,$$

y por la misma razón,

$$\alpha_{Mie}(\lambda_1, r) - \alpha_{Mie}(\lambda_2, r) = 0$$

Entonces,

$$Q(R) = \frac{P(\lambda_1, R)}{P(\lambda_2, R)} = \frac{P_L(\lambda_1)}{P_L(\lambda_2)} \exp \left\{ -2 \int_0^R [\alpha_{gas}(\lambda_1, r) - \alpha_{gas}(\lambda_2, r)] dr \right\} \quad (5.4)$$

Por otra parte, el coeficiente de extinción puede expresarse como [62]:

$$\alpha(\lambda, r) = \kappa(\lambda)p(r),$$

siendo $\kappa(\lambda)$ la constante de absorción del gas a la longitud de onda λ y $p(r)$ la presión parcial de ese gas en la posición r .

$$\Rightarrow \alpha_{gas}(\lambda_1, r) - \alpha_{gas}(\lambda_2, r) = \kappa(\lambda_1)p(r) - \kappa(\lambda_2)p(r) = \Delta\kappa_{gas}p(r).$$

Y sustituyendo en la ecuación (5.4):

$$Q(R) = \frac{P(\lambda_1, R)}{P(\lambda_2, R)} = \frac{P_L(\lambda_1)}{P_L(\lambda_2)} \exp \left\{ -2 \int_0^R \Delta\kappa_{gas} p(r) dr \right\}, \quad (5.5)$$

donde $\Delta\kappa_{gas}$ denota la constante de absorción diferencial del gas de interés.

$Q(R)$ en la Ec. (5.5) considera un camino óptico del pulso láser de 0 a R . Si se considera ahora un trayecto de 0 a $R + L$:

$$Q(R + L) = \frac{P(\lambda_1, R + L)}{P(\lambda_2, R + L)} = \frac{P_L(\lambda_1)}{P_L(\lambda_2)} \exp \left\{ -2 \int_0^{R+L} \Delta\kappa_{gas} p(r) dr \right\}. \quad (5.6)$$

Escribiendo el cociente entre las ecuaciones (5.6) y (5.5),

$$\frac{Q(R + L)}{Q(R)} = \frac{P(\lambda_1, R + L) P(\lambda_2, R)}{P(\lambda_2, R + L) P(\lambda_1, R)} = \exp \left\{ -2 \int_R^{R+L} \Delta\kappa_{gas} p(r) dr \right\}, \quad (5.7)$$

Considerando que $p(r)$ y $\Delta\kappa$ son los valores promedio en el trayecto entre R y $R + L$, entonces:

$$p(R, R + L) = \frac{1}{2\Delta\kappa_{gas}L} \log_e \frac{P(\lambda_2, R + L) P(\lambda_1, R)}{P(\lambda_1, R + L) P(\lambda_2, R)}, \quad (5.8)$$

Finalmente, utilizando las constantes adecuadas para obtener las dimensiones en ppm-atm [63], la concentración N del gas de interés en el trayecto entre R y $R + L$ se escribe:

$$N_{gas}(R, R + L) \equiv \frac{C}{2\Delta\kappa_{gas}L} \log_e \frac{P(\lambda_2, R + L) P(\lambda_1, R)}{P(\lambda_1, R + L) P(\lambda_2, R)}, \quad (5.9)$$

En esta última ecuación se observa que los términos constantes y de esparcimiento se han cancelado y ahora es posible calcular la concentración del gas de interés a partir de la potencia de la luz recibida de cada rayo láser a λ_1 y λ_2 en el intervalo de distancias entre R y $R + L$, de la resolución L del sistema y de la constante de absorción diferencial $\Delta\kappa$. La magnitud de la potencia recibida está contenida en la señal lidar para cada muestra tomada en el intervalo de resolución del sistema (L). La constante de absorción diferencial $\Delta\kappa_{gas}$ se determina experimentalmente haciendo incidir los dos haces láser del lidar en una celda muestra que contiene el gas de interés a una concentración conocida.

En la Figura 5.4, se ilustran las etapas en el proceso de la señal en un lidar de absorción diferencial.

Aunque no es uno de los objetivos de esta tesis profundizar en el método lidar de absorción diferencial (DIAL), el resultado obtenido y representado por la Ec. (5.9), servirá de base para comprobar experimentalmente los resultados del método que se ha desarrollado para procesar la señal lidar elástica. El método se describe en el siguiente capítulo.

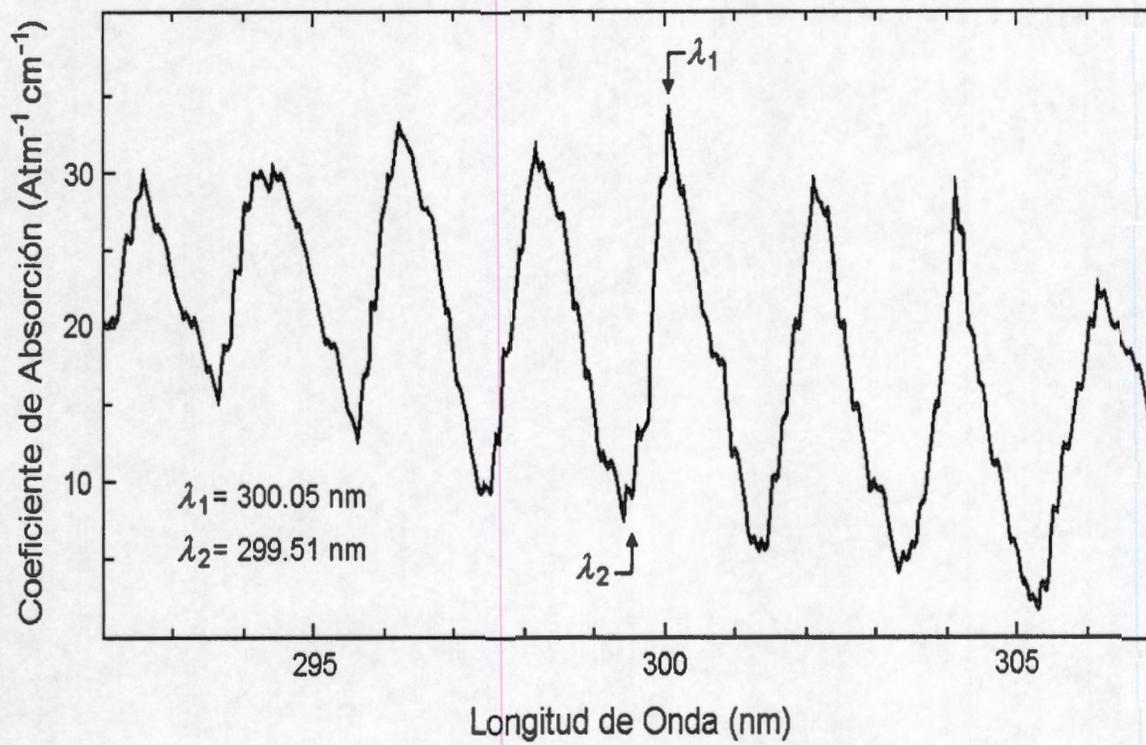


Figura 5.3. Coeficiente de absorción del dióxido de azufre como función de la longitud de onda [64].

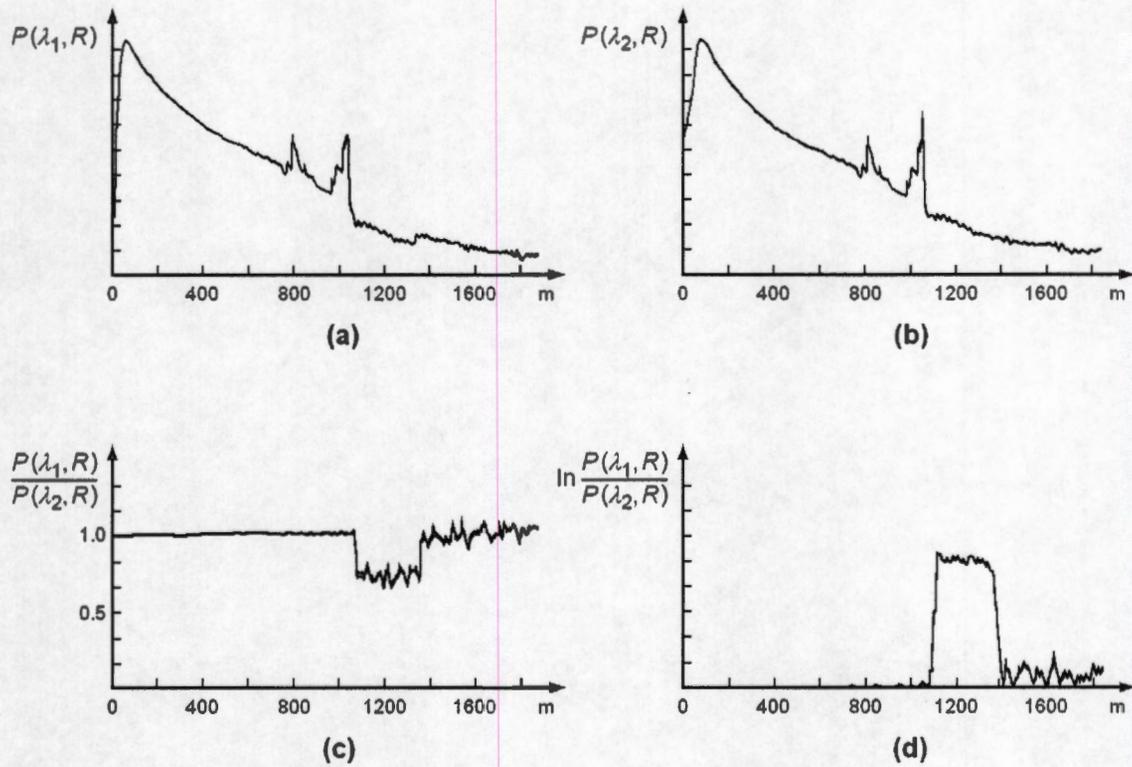


Figura 5.4. Tratamiento de las señales lidar en el Método de Absorción Diferencial (DIAL). (a) señal cruda para λ_1 ; (b) señal cruda para λ_2 ; (c) cociente entre ambas señales; (d) logaritmo del cociente entre las señales que es proporcional a la concentración del gas de interés.

6

MÉTODO DEL COCIENTE DE COEFICIENTES DE BETA (β)

6.1. Desarrollo del Método del Cociente de Coeficientes de Retrodispersión (β).

Haciendo la diferenciación de la Ec. (4.6) se obtiene:

$$\frac{dP}{P} = \frac{d\beta}{\beta} - 2\alpha dR \quad (6.1)$$

Esta ecuación establece que los gradientes de P y β sólo difieren por un término proporcional al coeficiente de atenuación α .

En el caso más simple, cuando el término de atenuación se puede suponer despreciable, por ejemplo, en atmósferas relativamente limpias, es suficiente con tomar en cuenta la dependencia de la señal lidar con respecto del inverso del cuadrado de la distancia para corregir el conjunto de datos y determinar la estructura atmosférica [53, 54, 55].

La suposición anterior, sin embargo, no es necesariamente válida cuando el rayo láser se propaga a través de una atmósfera muy contaminada; en tal caso, el término de atenuación ($-2\alpha dR$) influye significativamente sobre el sondeo lidar, enmascarando la posición a la que se encuentran las características o discontinuidades de la atmósfera. Entonces, los picos o máximos en la señal lidar no corresponden con los máximos en el coeficiente de dispersión, mostrando una

localización irreal o falsa de los detalles de la atmósfera (fuentes emisoras de plumas de contaminantes o partículas, estratos, nubes, etc.). En otras palabras, no es posible determinar donde comienza una pluma contaminante y donde termina y por lo tanto, no es posible conocer correctamente su posición, extensión, forma o área de influencia.

Por esa razón, se desarrolló un método matemático sencillo para calcular los cambios en el coeficiente de retrodispersión de la atmósfera y resaltar de esta forma las propiedades dispersivas de la atmósfera y localizarlas en el lugar preciso donde se encuentran. El método se presenta a continuación.

De acuerdo con la Ec. (6.1), y suponiendo que se tiene otro elemento dispersor en la atmósfera, situado a la distancia $R + L$, la potencia de la radiación detectada desde esa distancia es:

$$P(\lambda, R + L) = P_L \frac{c\tau A_0}{2(R + L)^2} \zeta(\lambda_L) \xi(R) \beta(\lambda_L, R) \exp \left\{ -2 \int_0^{R+L} \alpha(R) dr \right\}, \quad (6.2)$$

y el cociente entre las señales lidar correspondientes a las distancias R , y $R + L$, se escribe entonces:

$$\frac{P(R + L)}{P(R)} = \left(\frac{R}{R + L} \right)^2 \frac{\xi(R + L)}{\xi(R)} \frac{\beta(R + L)}{\beta(R)} \exp \left\{ -2 \int_R^{R+L} \alpha(R) dr \right\}. \quad (6.3)$$

La distancia L representa la resolución espacial del lidar y está definida como la separación mínima con la que los sistemas electrónicos de adquisición y digitalización adquieren dos muestras consecutivas (contiguas) de la señal. Aquí, es conveniente mencionar, que la resolución L del sistema es un parámetro que se puede modificar, cambiando la velocidad de muestreo del sistema de digitalización.

De hecho, es evidente que:

$$R \gg L \geq \frac{c\tau}{2},$$

y la resolución espacial mínima límite que se puede obtener de un sistema lidar es cuando $L_{min} = c\tau/2$. Considerando la desigualdad anterior,

$$\frac{\xi(R+L)}{\xi(R)} \cong 1$$

y con la Ec. (6.3):

$$\Rightarrow \frac{P(R+L)}{P(R)} = \left(\frac{R}{R+L}\right)^2 \frac{\beta(R+L)}{\beta(R)} \exp\left\{-2 \int_R^{R+L} \alpha(r) dr\right\},$$

Si además se supone que el coeficiente $\alpha(R)$ es constante solamente en el intervalo $(R, R+L)$, la ecuación toma la forma:

$$\frac{P(R+L)}{P(R)} = \left(\frac{R}{R+L}\right)^2 \frac{\beta(R+L)}{\beta(R)} \exp(-2\alpha L),$$

$$\Rightarrow Q_\beta(R) = \frac{\beta(R+L)}{\beta(R)} = k \left(\frac{R+L}{R}\right)^2 \frac{P(R+L)}{P(R)}. \quad (6.4)$$

La ecuación (6.4) representa el método que constituye una aportación nueva para procesar la señal lidar atmosférica, que no ha sido reportado en la literatura y con la cual es posible elaborar los programas de cómputo para interpretar la señal lidar atmosférica. La ecuación determina el cociente entre los coeficientes de retrodispersión atmosférica de los elementos de atmósfera contiguos separados por la distancia L , como función de la distancia R , contenidos dentro de la distancia de alcance del lidar. Ello permite la localización precisa de las características de la estructura atmosférica [65].

6.2. Aplicación del Método de Cocientes.

La ecuación (6.4) se aplica numéricamente sobre la señal lidar digitalizada, considerando rectángulos de altura $P_i(R + L_i)$ y anchura L , y comparándolos con la altura del paso inmediato anterior: $P_{i-1}(R + L_{i-1})$, con $L_i = \{L, 2L, 3L, \dots\}$. En la Figura 6.1 se ilustra gráficamente el proceso de digitalización de una señal lidar; se observan los intervalos de tiempo en los que el digitalizador convierte y captura los valores de cada segmento de la señal lidar. Cada segmento tiene una longitud L equivalente al tiempo de digitalización, el cual a su vez está dado por la velocidad de digitalización del sistema.

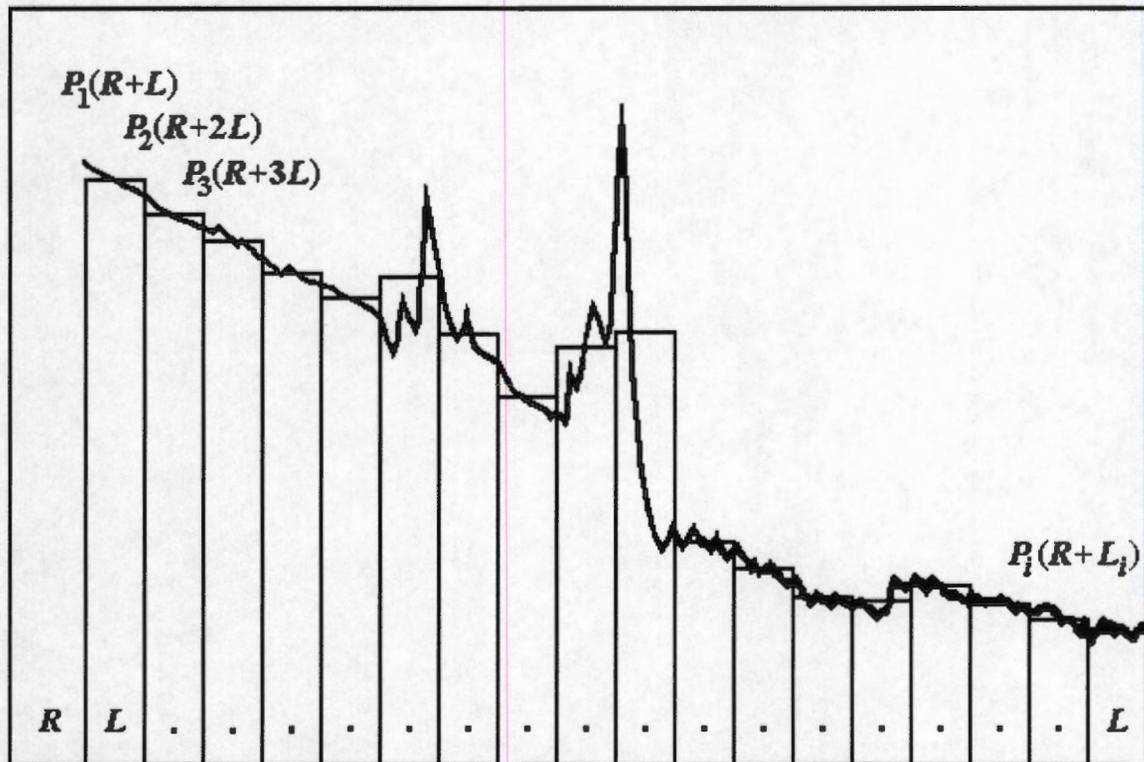


Figura 6.1. Digitalización de la señal lidar.

En la Figura 6.2 se muestra una señal lidar cruda real obtenida en una atmósfera contaminada promediando 20 disparos del pulso láser.

En la Figura 6.3 se muestra una gráfica de la misma señal mostrada en la Fig. 6.2 después de haber sido procesada con la Ec. (6.4). Es una gráfica del cociente del coeficiente de retrodispersión atmosférico Q_{β} como función de la distancia. Como se observa en la figura, la dependencia $1/R^2$ ha desaparecido, y los picos que representan información sobre las propiedades de esparcimiento de la atmósfera han sido resaltados sin haberse modificado la distancia a la que se encuentran. En la gráfica es ahora posible localizar, temporal y espacialmente, las discontinuidades en la estructura atmosférica, aunque estén ocultas en la señal lidar. Por ejemplo, en la gráfica de la Figura 6.3 se aprecia un pico máximo localizado a una distancia de 875 metros que en la gráfica de la figura 6.2 aparece enmascarado. Lo cual demuestra la capacidad del método para mostrar los detalles de la estructura atmosférica.

Por otra parte, es conveniente señalar que con el método de cocientes propuesto, no es necesario realizar el proceso de la señal con el método de corrección de la distancia al cuadrado.

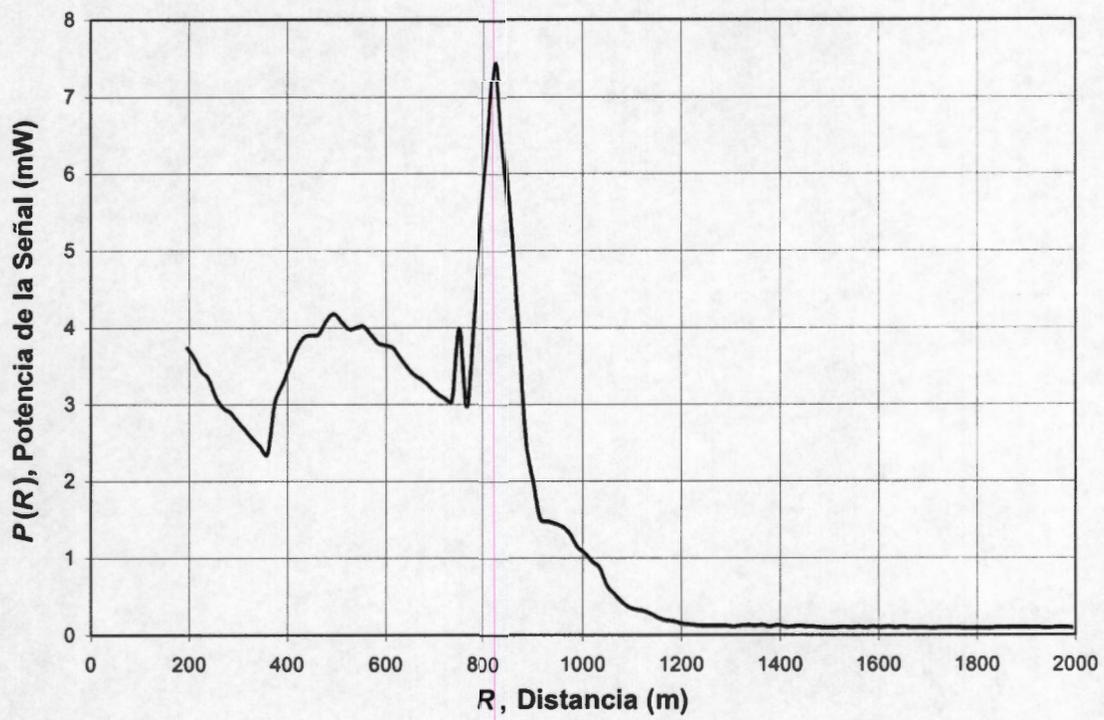


Figura 6.2. Gráfica de una señal lidar real en una atmósfera contaminada.

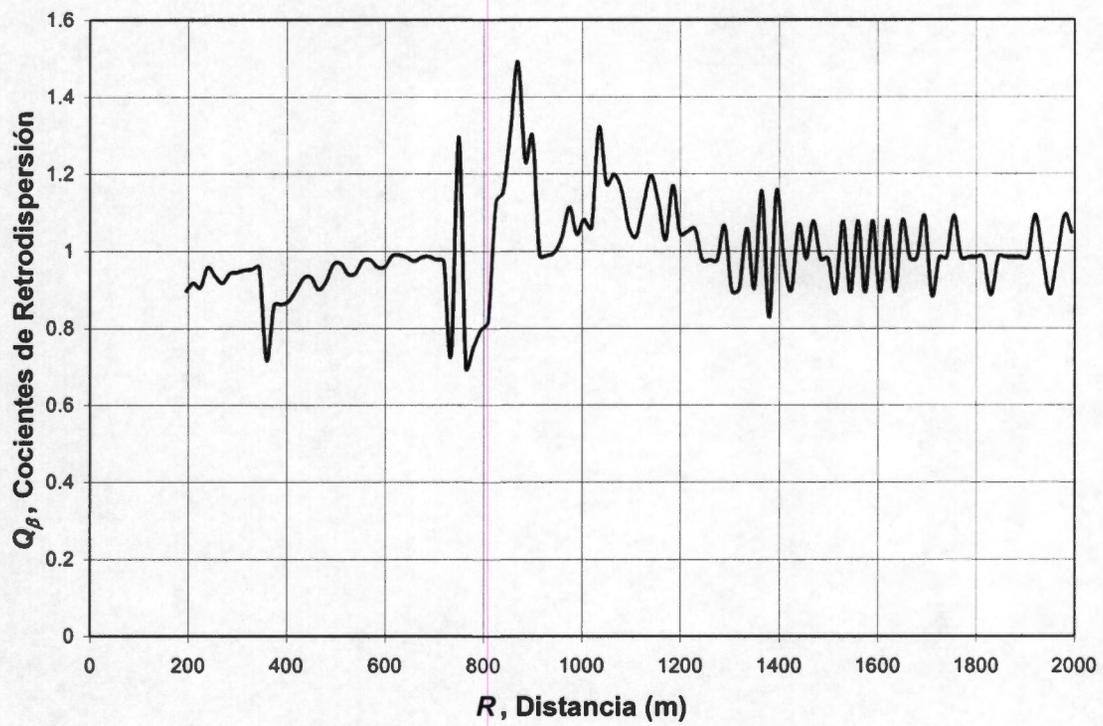


Figura 6.3. Gráfica de la señal lidar que se muestra en la Figura 6.2, procesada con la ecuación. (6.4).

7

DESARROLLO DEL LIDAR

7.1. Transmisión de Luz en la Atmósfera.

La atmósfera es una mezcla de gases cuyos principales componentes absorben radiación a diferentes longitudes de onda.

En el intervalo de longitudes de onda de mayor interés desde el punto de vista de la longitud de onda de los láseres que conforman los lidares, los principales absorbentes son las moléculas de agua, dióxido de carbono y ozono. La atenuación es debida a que estas moléculas absorben selectivamente la radiación mediante cambios de sus estados de energía vibracional y rotacional. La Figura 7.1 muestra la transmitancia de la atmósfera en el espectro de longitudes de onda: $0.2 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 15 \mu\text{m}$, en un camino óptico horizontal con 1820 m (1 milla marina) de longitud, al nivel del mar.

Como se observa en la figura, existen algunos intervalos de longitudes de onda o “ventanas” en las que la luz es menos absorbida por la atmósfera y puede transmitirse una mayor distancia. Si se tiene poca atenuación en la atmósfera, la luz láser puede propagarse más distancia y por lo tanto el lidar tiene un mayor alcance; por el contrario, si existe mucha atenuación el alcance del lidar se verá reducido. Entonces, en principio, es conveniente escoger una ventana en la que el lidar tenga un mayor alcance.

Por ejemplo, en la Figura 7.1 se aprecia que en el espectro infrarrojo, a longitudes de onda mayores que $1.2 \mu\text{m}$, existen varias zonas en las que la transmitancia de la atmósfera supera el 75%; sin embargo, en esta región del

espectro, es difícil encontrar láseres comerciales (a costos razonables) con radiación en esas longitudes de onda. El láser que más se aproxima es el láser de Nd:YAG (Granate de Aluminio e Itrio, contaminado con Neodimio), cuya emisión se encuentra a 1,064 nm, ligeramente debajo de la ventana mencionada. No obstante, el inconveniente que se tiene alrededor de esta longitud de onda, es la existencia de bandas de fuerte absorción del vapor de agua, que hacen poco adecuado el uso de este láser en esa longitud de onda, como se observa en la línea a 1064 nm en el lado izquierdo del espectro.

En la región comprendida entre: $0.3 \mu\text{m} \leq \lambda \leq 0.75 \mu\text{m}$, la transmitancia de la atmósfera es superior al 60%. En esta región, la segunda armónica del láser de Nd:YAG proporciona una emisión a la longitud de onda de 532 nm, que de acuerdo con la gráfica de la Fig. 7.1, tiene una transmitancia en la atmósfera cercana al 65%; lo cual hace apropiado el uso de este láser, como se observa en la línea a 532 nm señalada en color verde en la Figura. Este hecho confirma el uso tan extendido que tiene este tipo de láser en los sistemas lidar que se utilizan en estudios atmosféricos.

Por lo anterior, el láser seleccionado para el desarrollo del lidar es un láser Nd:YAG de la marca Continuum con pulsos de 140 mJ de energía y duración de 7 ns, a la longitud de onda de emisión de la segunda armónica de 532 nm. Para obtener la emisión de la segunda armónica, el láser fue complementado con un módulo generador de segunda armónica para producir radiación a 532 nm a partir de la emisión fundamental de 1064 nm [66]. Otra de las ventajas de utilizar este tipo de láser es que en trabajos futuros se puede utilizar con otros módulos de generación de armónicas para emitir en otras longitudes de onda: tercera armónica (355 nm), cuarta armónica (266 nm) y quinta armónica (213 nm).

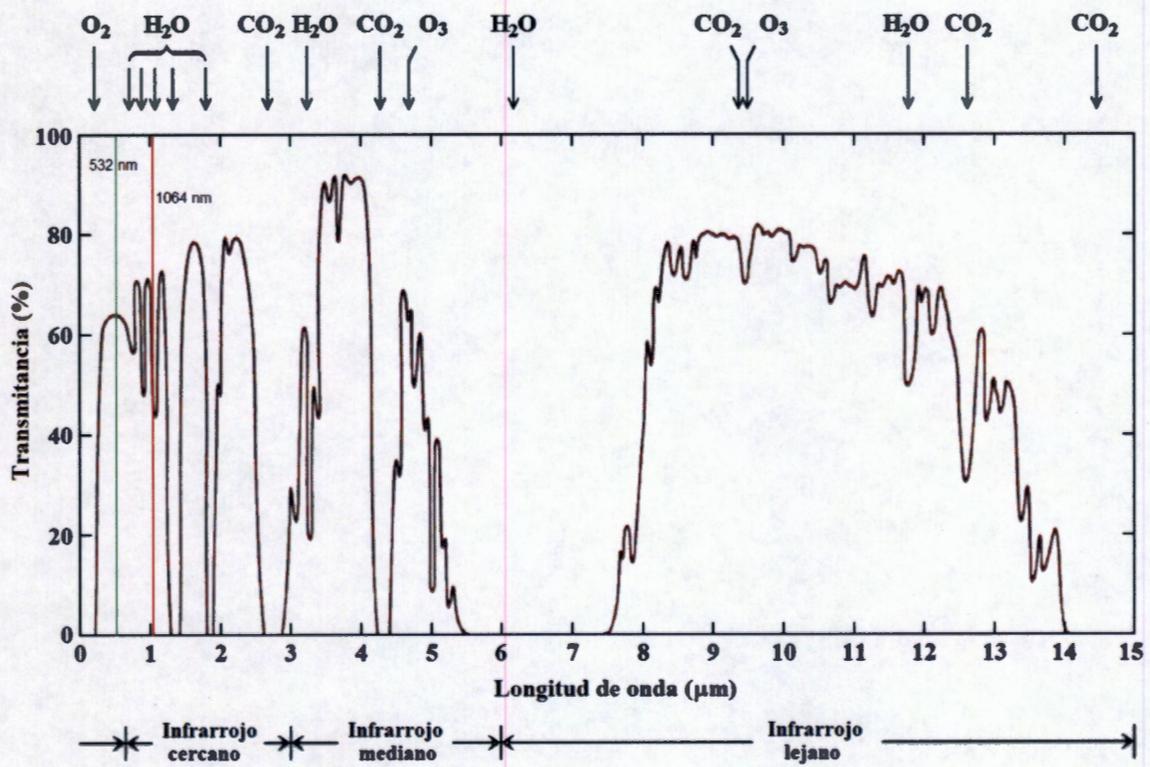


Figura 7.1. Transmitancia de la atmósfera con respecto de la longitud de onda de radiación [67].

7.2. El Detector.

La función del detector es capturar la potencia luminosa dispersada por la atmósfera y recolectada por el telescopio. Considerando un pulso láser de 7 ns de duración, el detector además de ser muy sensible a la luz, debe tener un tiempo de respuesta menor o igual a 7 ns.

Uno de los detectores de luz de respuesta rápida es el fotodiodo PIN, que está constituido por tres capas de cristal de silicio, dos de ellas alteradas (“dopadas”) con átomos de diferente valencia que conforman cargas eléctricas positivas y negativas que se llaman P y N, respectivamente, y una tercera capa sin alteración, llamada I (de Intrínseca) que está colocada entre las capas P y N (de ahí el nombre: PIN). Al aplicar una diferencia de potencial entre las capas P y N, el fotodiodo PIN exhibe un incremento en su conductividad eléctrica que es función de la intensidad de radiación que incide en la capa P. Comparado con el fotodiodo normal cuyo tiempo de respuesta es de 20 μ s, el fotodiodo PIN se puede polarizar con potenciales más altos, lo cual tiene el efecto de reducir su tiempo de respuesta hasta alcanzar niveles inferiores a los 5 ns [68]. Sin embargo, su baja sensibilidad, de alrededor de 0.5 A/W, hace necesario el uso de un amplificador adicional lo cual introduce ruido suplementario y aumenta el tiempo de respuesta del detector.

El fotodiodo de avalancha o APD (*Avalanche Photodiode*, de su nomenclatura en inglés) es un dispositivo semiconductor semejante en construcción al diodo PIN, que proporciona una mayor sensibilidad: alrededor de 100 A/W; con un tiempo de respuesta cercano a 1 ns. Su desventaja es que su máxima sensibilidad se encuentra cerca de los 800 nm (en el rojo o infrarrojo), que no lo hacen apropiado para el lidar objeto de este trabajo.

Desde su invención, y durante la mayor parte de su existencia, el fotomultiplicador ha sido el único dispositivo capaz de detectar directamente señales luminosas débiles. Sin embargo, el fotomultiplicador convencional se aleja de ser un transductor ideal ya que adolece de varios defectos: tiene un intervalo espectral limitado y no trabaja adecuadamente en presencia de campos magnéticos; es voluminoso y frágil y requiere además, de accesorios costosos,

como fuentes de alto voltaje, para su operación. Aún así, a falta de otras alternativas, el fotomultiplicador sigue siendo el dispositivo detector de radiación más utilizado para un gran número de aplicaciones donde se requiere alta sensibilidad.

El tubo fotomultiplicador es un bulbo al vacío con una superficie sensible a la radiación en su interior llamada fotocátodo. La energía de los fotones que inciden en el fotocátodo produce la emisión de electrones, los cuales son acelerados por un potencial de alto voltaje y multiplicados por electrodos adicionales (dínodos) colocados en cascada. Un sólo fotón incidente en el fotocátodo desencadena una nube de electrones que son recogidos en el ánodo (electrodo con polaridad opuesta a la del fotocátodo). El fotomultiplicador tiene un tiempo de respuesta de una fracción de nanosegundo [69, 70] y su sensibilidad se puede ajustar mediante el alto voltaje aplicado entre el fotocátodo y el ánodo.

Con años de investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías y materiales sensibles a la radiación se ha logrado obtener un nuevo tubo fotomultiplicador compacto y robusto que además de tener la sensibilidad del fotomultiplicador tradicional, ofrece mejores ventajas. Una de ellas, la principal, y es una de las razones por la que se eligió como detector del sistema lidar elástico, es su sensibilidad en la longitud de onda de 532 nm. El fotomultiplicador seleccionado es el modelo H6780 de Hamamatsu y tiene un área sensible con diámetro de 5 mm y un tiempo de respuesta de 0.78 ns; su sensibilidad radiante típica en el ánodo es de 3×10^4 A/W y se puede ajustar a través del alto voltaje aplicado. Otra de las características que es conveniente de este fotomultiplicador es que su respuesta en intensidad de corriente con respecto de la luz incidente es lineal [71].

La Figura 7.2 muestra la curva de sensibilidad del cátodo del fotomultiplicador Hamamatsu con respecto de la longitud de onda. Como se observa en la figura, la respuesta del fotomultiplicador a la longitud de onda de 532 nm (segunda armónica del láser de neodimio) es de aproximadamente 40 mA/W. Es decir, cerca del 67 por ciento del valor máximo de sensibilidad del fotomultiplicador que se encuentra en los 400 nm.

La intensidad de la radiación retroesparcida por la atmósfera disminuye en forma inversamente proporcional al cuadrado de la distancia; y el alcance de un lidar

está determinado, principalmente, por la magnitud de la relación señal a ruido del sistema óptico de recepción. Esto hace necesario destacar lo más posible la señal con respecto del ruido, eliminando todas las pérdidas posibles. Con el fin de aislar las interferencias eléctricas y albergar al fotomultiplicador, al filtro de interferencia y a una pupila de entrada, se construyó el alojamiento que se muestra en la Figura A2 del Anexo. En la parte superior de la figura (Fig. A2a), se muestra una vista sin ensamblar del alojamiento; en ella se pueden observar: el filtro de interferencia, la pupila de entrada y el fotomultiplicador. En la Figura A2b, se observa el conjunto ensamblado y acoplado a la pared del tubo del telescopio. El alojamiento proporciona una montura rígida y estable para el fotomultiplicador y los demás componentes mencionados y lo hace más robusto a las interferencias electromagnéticas.

La función del filtro de interferencia es transmitir a la superficie sensible (fotocátodo) del fotomultiplicador solamente la radiación a 532 nm y eliminar el resto de la radiación a otras longitudes de onda (radiación solar difusa). La Figura 7.3 muestra la curva de transmisión del filtro de interferencia con respecto de la longitud de onda [72]. Como se observa, el filtro está sintonizado para tener una transmisión máxima a 532 nm, y tiene un ancho de banda de 10 nm (± 5 nm).

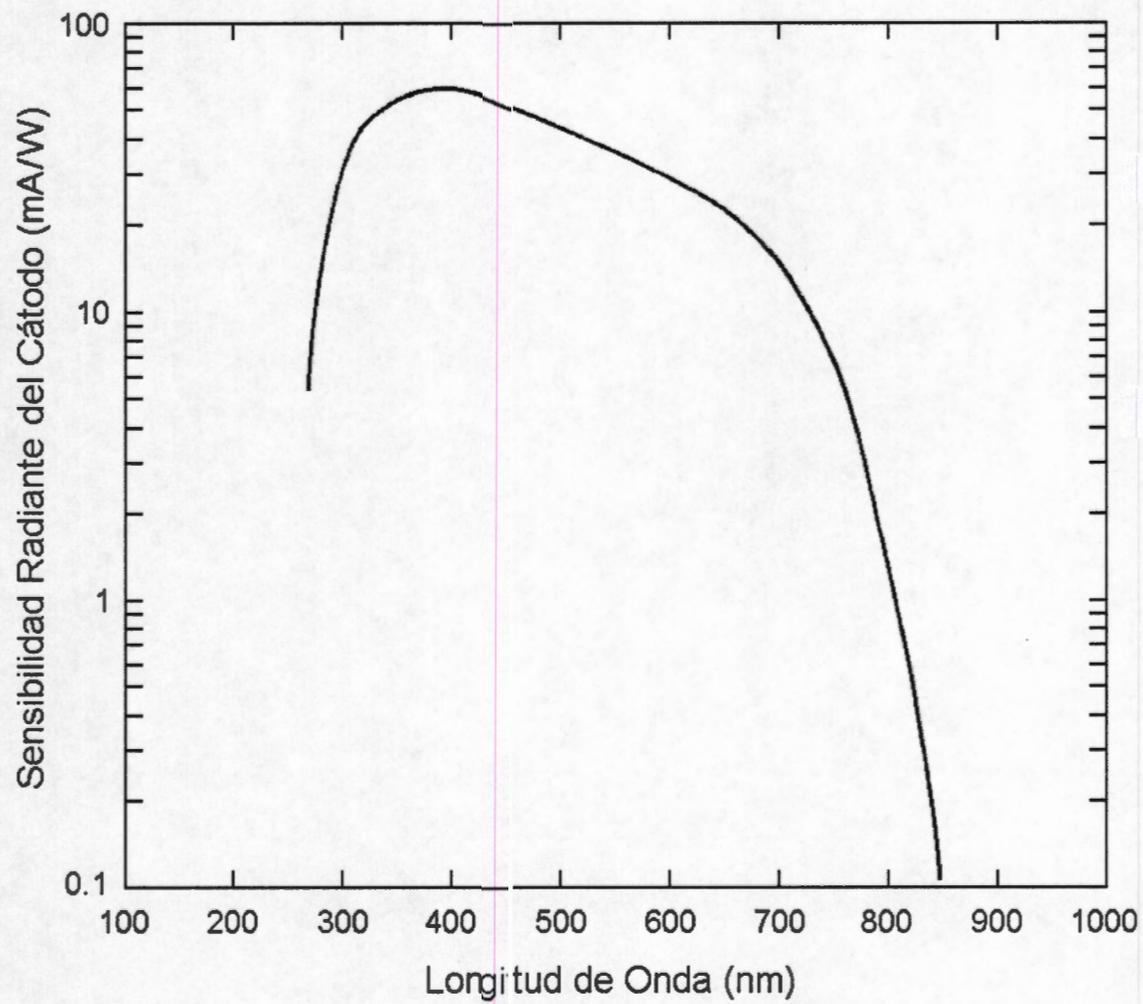


Figura 7.2. Curva espectral de sensibilidad radiante de cátodo del fotomultiplicador Hamamatsu H6780-01 [71].

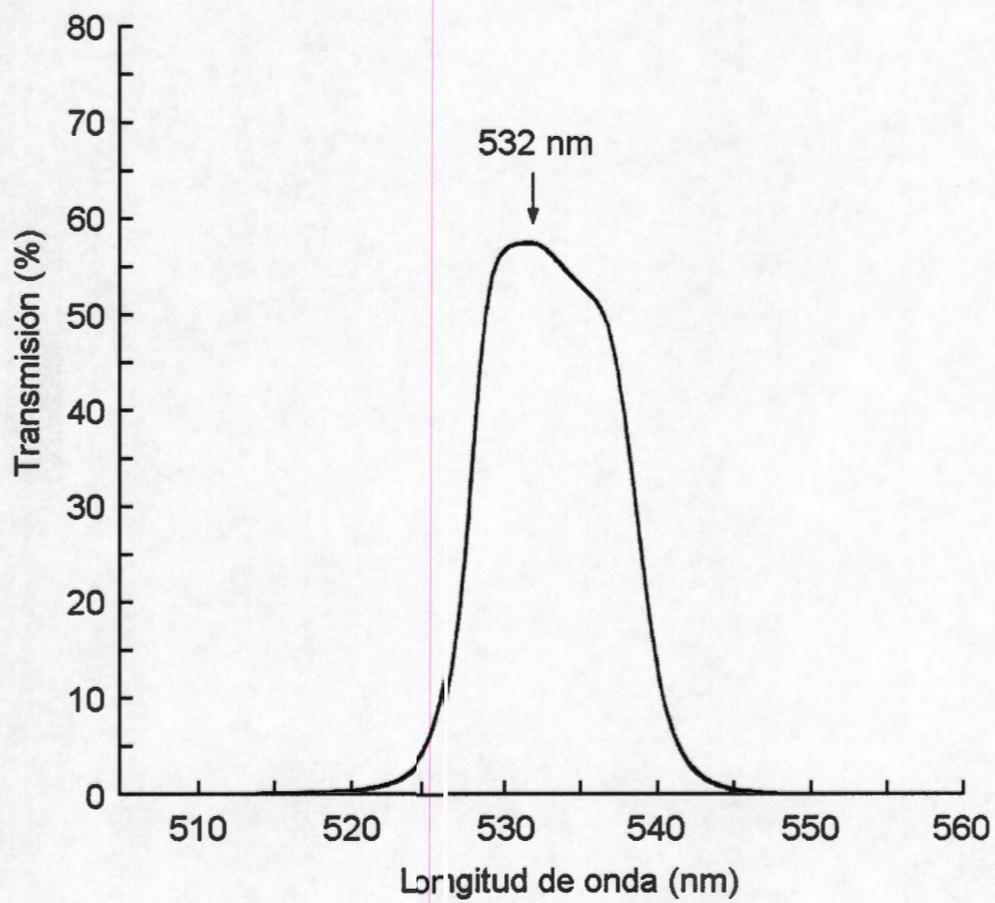


Figura 7.3. Curva de transmisión d'el filtro de interferencia con respecto de la longitud de onda.

7.3. La Etapa de Amplificación.

Para amplificar en una primera etapa la señal del fotomultiplicador, es necesario que los circuitos electrónicos sean colocados en una posición cercana (lo más cercano posible) al mismo para impedir en lo posible la inducción electromagnética de ruido, producida por cables, lámparas, etc.; esto hace necesario que el circuito se encuentre alojado en un gabinete metálico conectado a la estructura del telescopio.

La Figura 7.4 muestra los circuitos de alimentación y amplificación de la señal del fotomultiplicador. El cátodo y los 8 dínodos, con los que se produce el efecto de multiplicación (amplificación) de la señal luminosa, son alimentados por la fuente de alto voltaje a través de las resistencias R1 a R9, a los voltajes recomendados por el fabricante. El fotomultiplicador es una fuente de corriente que necesita conectarse a un equipo con entrada de baja impedancia; entonces, para conectarlo al digitalizador cuya entrada es de alta impedancia, es necesario convertir la señal de corriente a una señal de potencial (o voltaje). Para ello, se usa un amplificador de transimpedancia para convertir la señal con baja impedancia del fotomultiplicador a una señal con alta impedancia. El amplificador que se utiliza es el HCA-200M-20K de la compañía Femto [73]. Sus principales características son: amplificación con bajo ruido, respuesta lineal y amplio ancho de banda (de DC a 200 MHz). Como se muestra en la Figura 7.4, la salida del amplificador Femto se conecta directamente a la entrada del digitalizador.

Debido a que la ganancia del fotomultiplicador es proporcional a la diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo, su sensibilidad se puede ajustar con la resistencia R10 (*V control*), que controla el alto voltaje y en consecuencia la ganancia del fotomultiplicador. El módulo de alto voltaje está alimentado por una fuente de potencia regulada de 15 V.

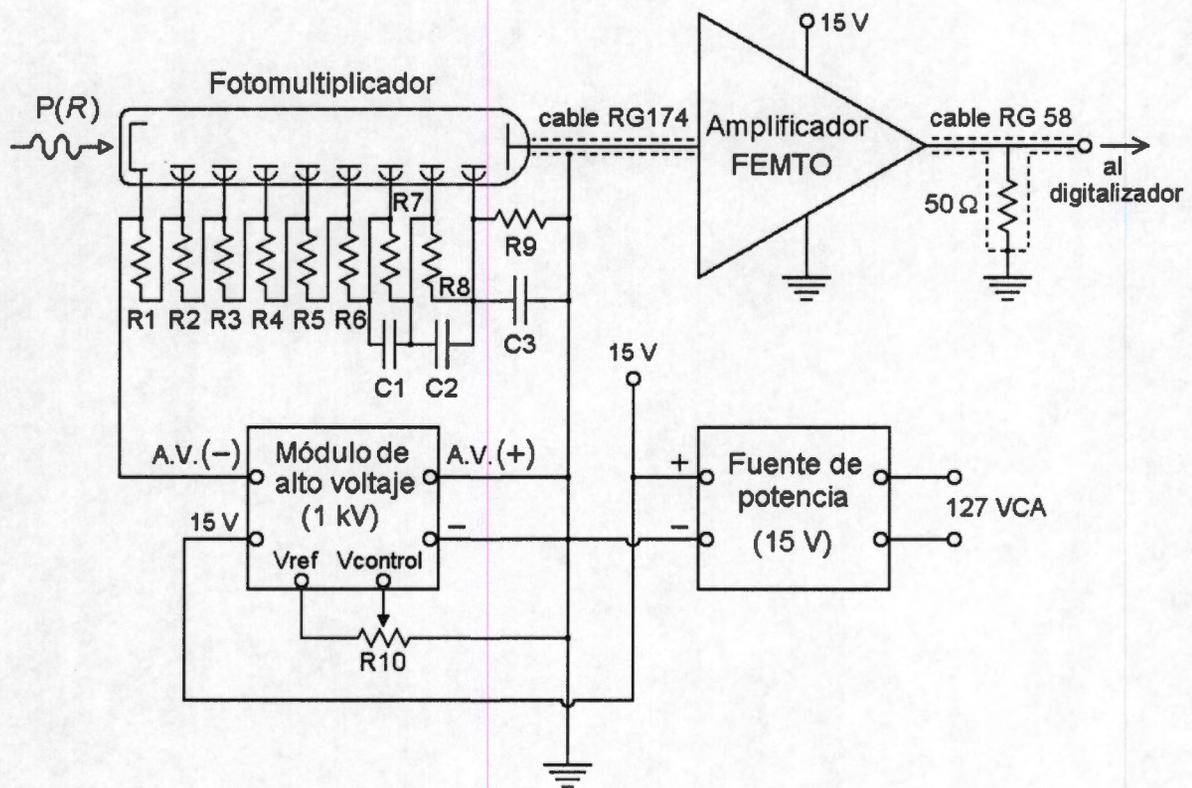


Figura 7.4. Circuitos de detección y amplificación de la señal.

7.4. Evaluación del Ruido en la Señal Lidar.

La intensidad del ruido en un tubo fotomultiplicador a niveles bajos de detección o de iluminación, depende del ruido de disparo (*shot-noise*) de la corriente en oscuridad (*dark current*), y está dado por [74]:

$$i_n = (2ei_d\Delta f)^{1/2}, \quad (7.1)$$

siendo e , la carga del electrón (1.6×10^{-19} C); i_d , la corriente en oscuridad del fotomultiplicador; y Δf , el ancho de banda del sistema electrónico de medición al que está conectado el fotomultiplicador.

La intensidad mínima de la señal lidar detectable por un sistema es cuando la intensidad de la señal es igual a la intensidad del ruido. Es decir:

$$\frac{I_s}{i_n} = 1,$$

$$\Rightarrow I_{S(\min)} = i_n = (2ei_d\Delta f)^{1/2}. \quad (7.2)$$

Por otra parte, el amplificador de transimpedancia (Femto) tiene una ganancia:

$$m = 2 \times 10^4 \text{ [volt/ampere]},$$

entonces, para una señal $P(R)$ de entrada al digitalizador (en volt), se tiene,

$$P(r) = mI_s,$$

y con la Eq. (7.2), la potencia mínima de la señal detectable por el sistema lidar es entonces:

$$P(R)_{\min} = mI_{S(\min)} = m(2ei_d\Delta f)^{1/2}. \quad (7.3)$$

De acuerdo con las especificaciones del fabricante [75] la corriente en oscuridad para el fotomultiplicador H6780-01 de Hamamatsu es:

$$i_d = 6.5 \times 10^{-10} \text{ A.}$$

Considerando que el digitalizador se utiliza con un ancho de banda de 10 MHz, entonces:

$$\Delta f = 1 \times 10^7 \text{ seg}^{-1}.$$

Sustituyendo los valores en la Eq. (7.3):

$$P(R)_{\min} = 9.12 \times 10^{-7} \text{ [volt]}.$$

Como se verá en las gráficas de las mediciones del sistema lidar, que se presentan en el capítulo 8, los valores de $P(R)$ encontrados están muy por arriba del valor mínimo detectable. En otras palabras, el nivel de ruido es prácticamente despreciable.

7.5. La Óptica de Recepción y Emisión.

Para el diseño de la óptica de recepción se han considerado los siguientes aspectos: máxima ganancia luminosa y reflectancia adecuada en la longitud de onda de 532 nm (longitud de onda de emisión del láser Nd:YAG).

La óptica de recepción del lidar consiste en un telescopio tipo newtoniano. Se ha elegido este tipo de telescopio por su simplicidad, pues está compuesto solamente por dos componentes, lo cual facilita su elaboración sin menoscabo de su calidad.

En términos generales, la luminosidad de la óptica es mayor, cuanto mayor es el diámetro del espejo primario. Sin embargo, el costo en la fabricación del espejo se incrementa exponencialmente con el diámetro del mismo. El diámetro seleccionado se considera adecuado para su construcción en el país, ya que existen instituciones con la infraestructura apropiada para elaborarlo con la calidad requerida y a un costo razonable.

El componente primario (espejo primario) es un espejo paraboloide con un diámetro de 400 mm, y una distancia focal de 1200 mm. Está fabricado en vidrio *pyrex* de alta calidad óptica y tiene un Número F/2.8. Aquí es oportuno señalar que el Número F ($F/\#$ o *F/number* de su término en inglés) de un telescopio es la relación entre el diámetro del objetivo (espejo o lente) y la distancia focal del mismo; y representa la luminosidad de la óptica. El Número F/2.8 lo distingue como un telescopio muy luminoso, que lo hacen diferente a los telescopios astronómicos cuyo Número F oscila entre F/5 y F/8; y se considera adecuado, ya que un Número F menor (más luminoso) significaría dificultar su elaboración (corte, tallado, pulido y aluminizado) [76].

El componente secundario (espejo diagonal) es un elipsoide plano, fabricado en vidrio borosilicato de alta calidad óptica, con dimensiones de 134 mm x 95 mm; que corresponden a su eje mayor y eje menor respectivamente.

Tanto el espejo primario como el secundario están recubiertos con una capa de aluminio puro, con espesor de 200 μm ; lo que asegura una reflectancia cercana al

95 % en la longitud de onda de 532 nm, como se observa en la gráfica que se muestra en la Figura 7.5 [77].

Los componentes ópticos y mecánicos (celda, tubo y soporte del espejo diagonal) del telescopio, fueron construidos en el Instituto Nacional de Astrofísica Óptica y Electrónica (INAOE), en Tonantzintla, Puebla; bajo el diseño y las especificaciones propuestos. El sistema óptico completo se muestra en la Figura 7.6 y en el anexo A1 se muestran los detalles y dimensiones.

Como se ha mencionado en la sección 7.1, el objetivo es sondear la atmósfera a la longitud de onda de 532 nm, que corresponde a la segunda armónica del láser de Nd:YAG y que es producida al hacer pasar el haz láser a la longitud de onda fundamental (1064 nm) por un módulo generador de segunda armónica. Es necesario tomar en cuenta, que la conversión de radiación de la armónica fundamental (1064 nm) a la segunda armónica (532 nm), no elimina la radiación a la longitud de onda fundamental [78]. Es decir, como la conversión no se lleva a cabo en forma totalmente eficiente, parte de la radiación fundamental queda sin convertir y emerge junto con la segunda armónica. Entonces, para enviar el pulso láser a la atmósfera, se utiliza un espejo a 45° que es transparente a la radiación a 1064 nm y reflector a la radiación a 532 nm (ver fotografía B2 en el Anexo 11.B. De esta forma, se cumplen dos objetivos, se desvía el rayo láser a 532 nm hacia la atmósfera y se elimina la luz de la armónica fundamental a 1064 nm.

En la figura 7.6 se muestra el espejo de desvío a 532 nm montado en la parte superior central del telescopio.

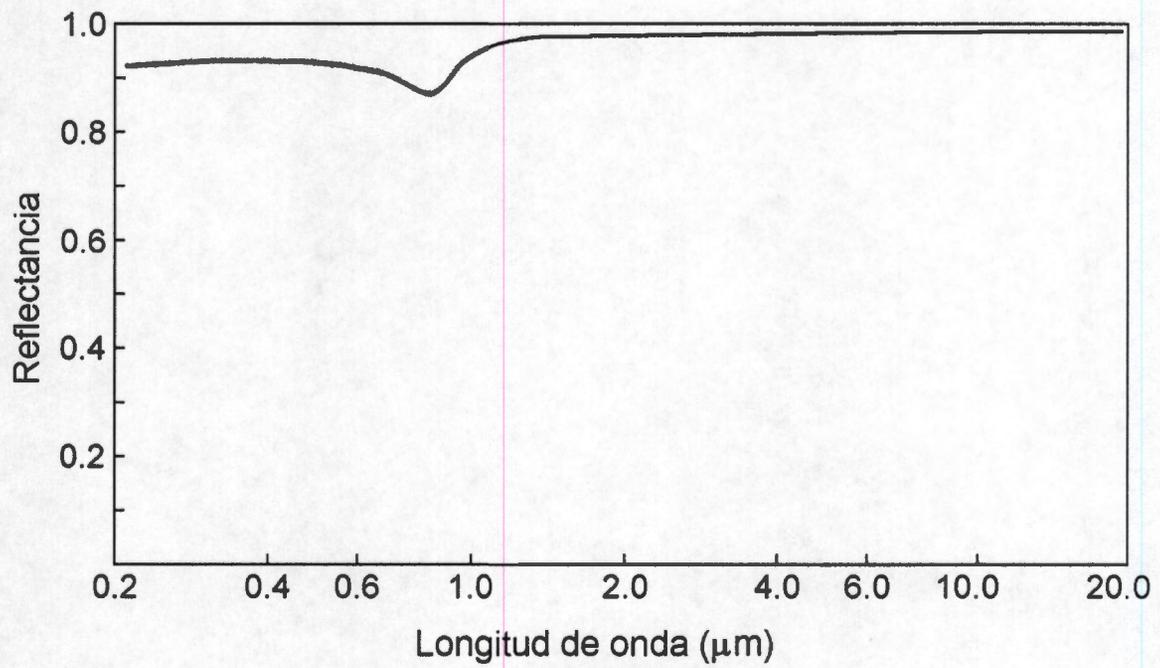


Figura 7.5. Reflectividad del aluminio puro con respecto de la longitud de onda [77].

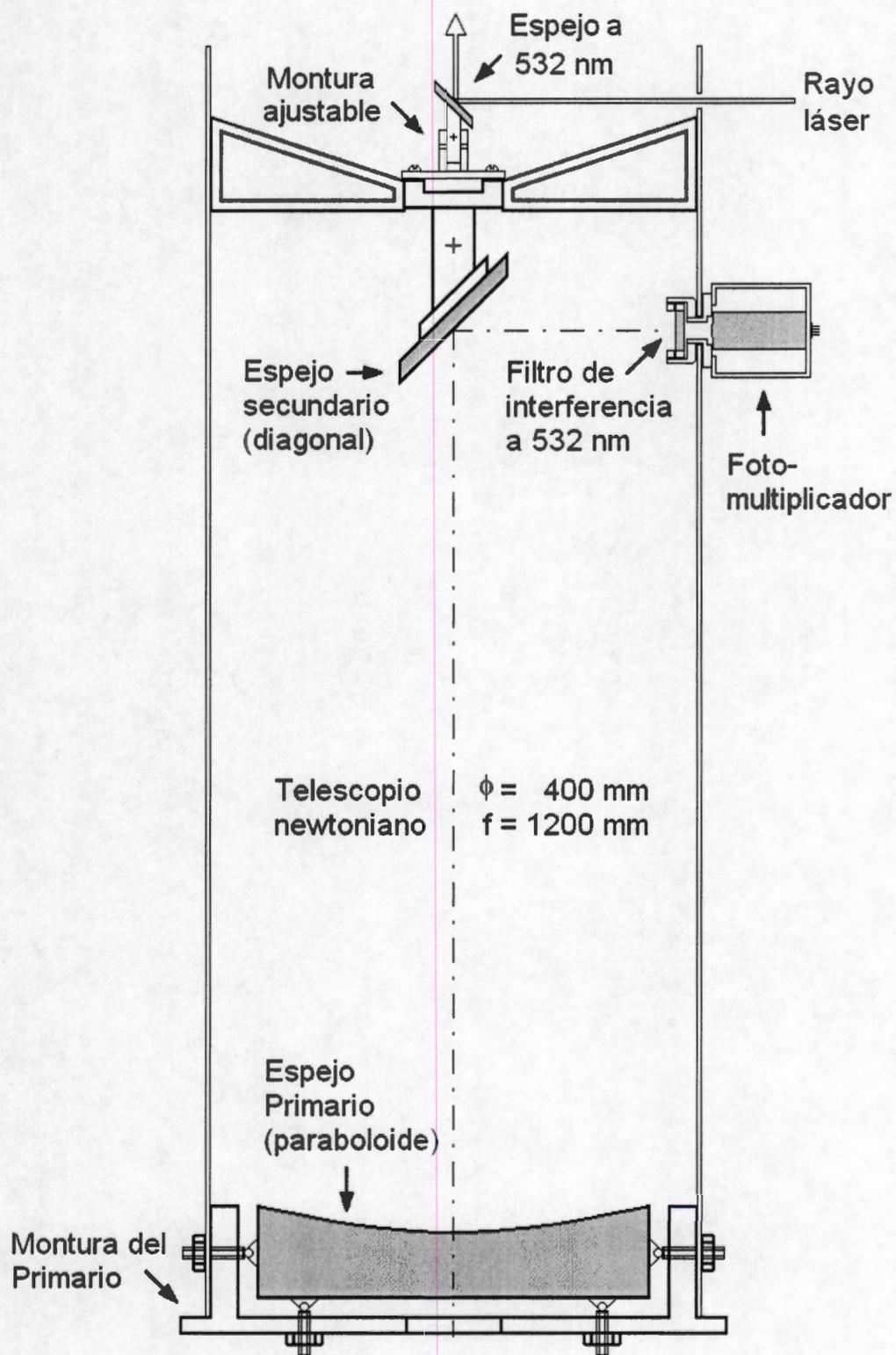


Figura 7.6. El Sistema Óptico de Recepción (telescopio) del Lidar.

7.6. Etapa de Captura, Digitalización y Operación del Lidar.

En la Figura 7.7, que representa el diagrama de bloques del sistema lidar completo, se muestran los circuitos de la etapa de captura y digitalización de las señales lidar y su interconexión con los demás componentes del sistema.

La operación del lidar es controlada por la computadora personal mediante programación en lenguaje gráfico LabView™ [79].

La Figura 7.8 muestra el diagrama de tiempos de los eventos que transcurren durante la operación del lidar. La operación del lidar se inicia con la señal de sincronía generada por la computadora a través de la interface serie (RS232C), que produce el disparo del láser. Una vez que el pulso láser empieza a propagarse por la atmósfera, la señal luminosa de retorno es recibida por el telescopio y enviada al filtro de interferencia, que solamente permite pasar al fotomultiplicador la radiación con longitud de onda de 532 nm. La salida eléctrica del fotomultiplicador (señal en intensidad de corriente) es convertida a señal de potencial (voltaje) por el amplificador Femto y es enviada directamente al digitalizador, donde se convierte en información digital que se almacena temporalmente en la memoria interna del digitalizador.

El digitalizador se encuentra programado para digitalizar un número determinado de muestras; por ejemplo: 200 muestras, lo cual a una velocidad de digitalización de 10^7 muestras/segundo le determina un alcance $R = 3,000$ m, con una resolución $L = 15$ m.

Después de que el digitalizador adquirió la señal en ese número programado de muestras y almacenó la información en su memoria interna, la computadora lee dicha información a través de la interface IEEE488 y la almacena en un archivo en el disco duro para su posterior proceso. Después de un tiempo aproximado 50 ms, tiempo suficiente para que termine el almacenamiento de la señal, la computadora inicia un nuevo ciclo de adquisición.

Se ha mencionado en la sección 5.1 que un método para obtener señales lidar limpias es el promediado de un número dado de señales. El lidar desarrollado tiene esa capacidad y para efectuarlo, el sistema se programa para que en la

memoria interna del digitalizador se realice la suma de primera señal adquirida con la nueva señal, y así sucesivamente se suman hasta que se llegue al número programado de señales promediadas (20 en este caso). Posteriormente, la computadora lee la señal promediada en la memoria interna del digitalizador y la almacena en el disco duro.

Finalmente, la computadora realiza el proceso de la señal para generar las gráficas para visualizar la estructura atmosférica, en un caso, con las señales crudas (sólo promediadas) y en otro caso, con el método de cocientes desarrollado [80]. Las gráficas que se presentan en la sección 8.2 fueron generadas de esa forma, con señales adquiridas con una velocidad de muestreo de 10^7 muestras por segundo y promediando las señales de 20 disparos del pulso láser.

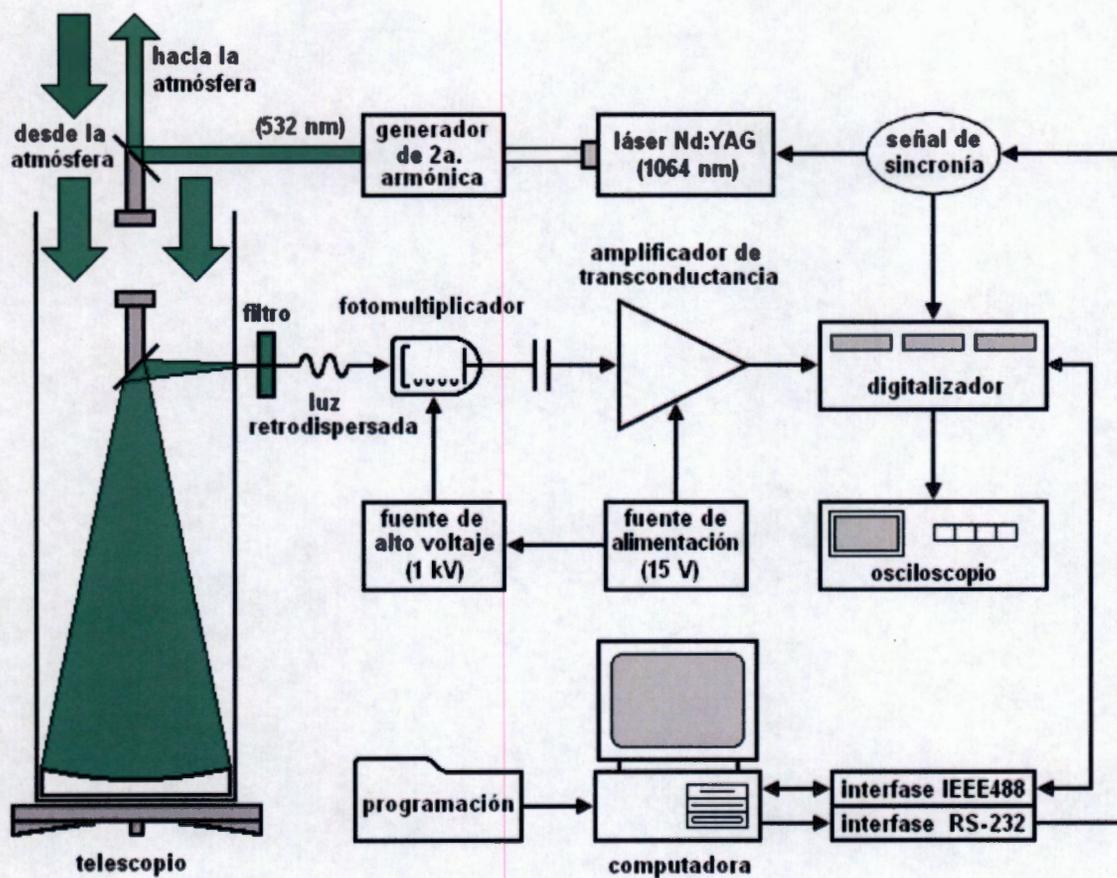


Figura 7.7. Diagrama a bloques del Lidar de Dispersión Elástica.

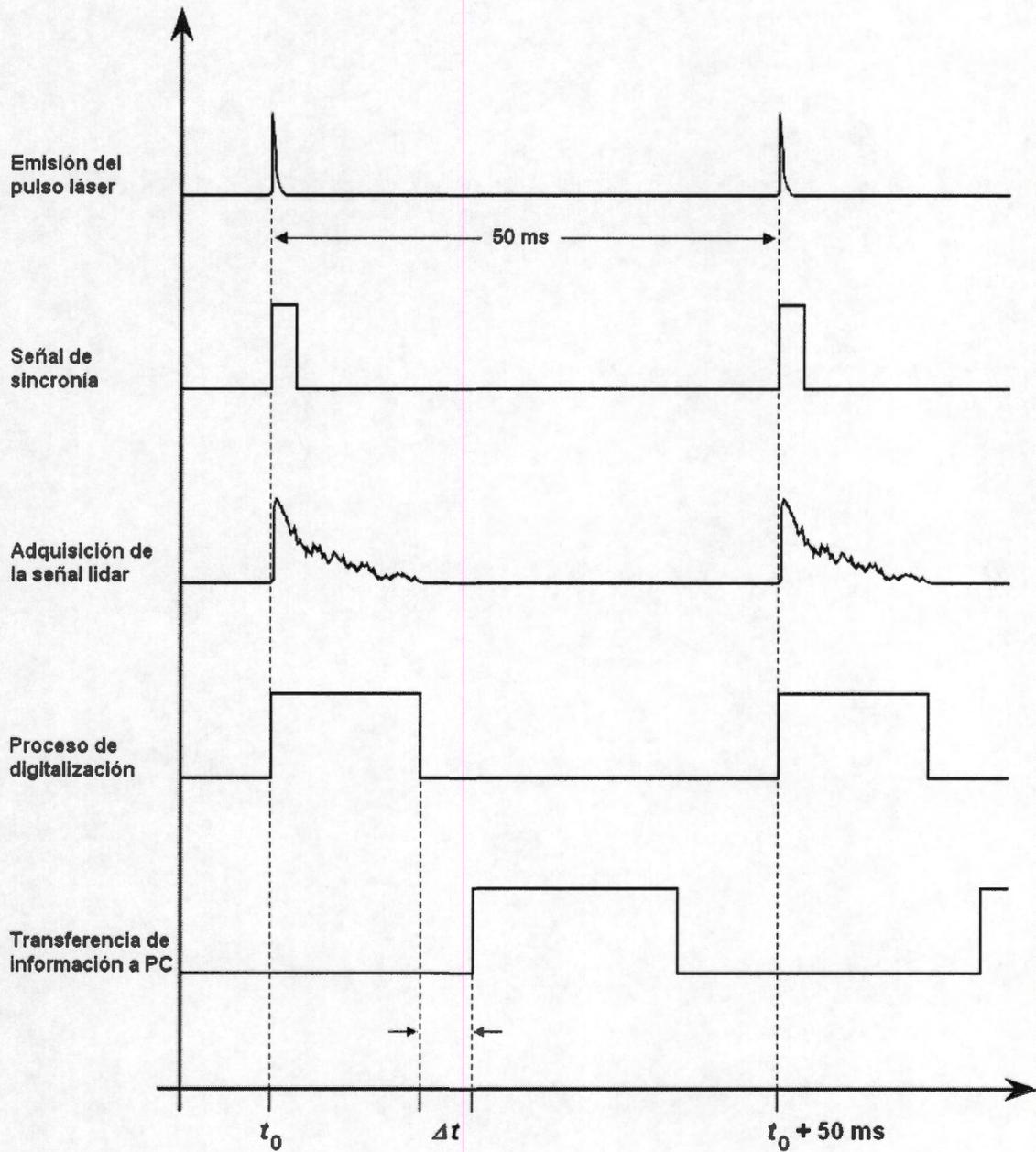


Figura 7.8. Diagrama de tiempos de operación del sistema lidar

8

RESULTADOS

8.1. Evaluación y Validación del Método de Cocientes de β .

Para evaluar el desempeño de un nuevo método o procedimiento, es necesario comparar sus resultados con los de un método establecido, basado en principios diferentes y que haya sido además aceptado por la confiabilidad de sus resultados. En el caso de métodos cuyo campo de aplicación es el estudio de la atmósfera, la situación es complicada debido a la dificultad para colocar instrumentos a diferentes alturas para comprobar la eficacia del método bajo prueba.

Una herramienta que se utiliza a menudo es la radiosonda, que consiste en un globo que se libera en la atmósfera, que porta detectores de temperatura, humedad, presión (barométrica) y en algunos, el coeficiente de atenuación de la atmósfera. Los valores de estas variables son transmitidos periódicamente por radio a una estación receptora en tierra, hasta que la señal transmitida se pierde por la lejanía de la radiosonda. Desafortunadamente, en este trabajo de investigación, no se pudo contar con el equipo de radiosonda, ni las instalaciones requeridas para localizar algún estrato o detalle definido en la atmósfera para realizar la comprobación experimental del método propuesto.

Sin embargo, en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Eléctricas, se cuenta con un sistema Lidar de Absorción Diferencial (DIAL), diseñado para detectar dióxido de azufre (SO_2) en la atmósfera. Como se describió en la sección 5.3, el sistema DIAL utiliza dos pulsos láser a diferentes longitudes de onda (λ_1 y λ_2) para capturar dos señales de retrodispersión elástica, que se procesan con la

Eq. (5.9) para obtener la localización y concentración del gas SO_2 en la atmósfera. En este caso, la concentración depende solamente de las variables $P(\lambda_1, R)$ y $P(\lambda_2, R)$ que corresponden a las potencias de la luz retroesparcida por la atmósfera, y no depende del coeficiente de retrodispersión (β), ya que este último junto con los términos constantes se cancelan. Los parámetros $\Delta\kappa$ y L son parámetros fijos del sistema.

Entonces, para probar con datos experimentales y validar el método de cocientes de coeficientes de retrodispersión (β), se utilizaron los datos de las señales lidar elásticas correspondientes a una sola longitud de onda: sea λ_1 , obtenidas con el sistema DIAL en una campaña de medición realizada en la vecindad de una central termoeléctrica que utiliza combustóleo (aceite residual de petróleo) como combustible.

Es cierto que los resultados que proporcionan el método de cocientes de β propuesto y la técnica DIAL son diferentes entre sí. En el primero, se obtiene el perfil de la estructura atmosférica, determinado por las características dispersivas globales de la atmósfera, producidas principalmente por la presencia y concentración de las partículas. Con el sistema DIAL, se obtiene el perfil de concentración del gas SO_2 . No obstante, se puede considerar que en la dinámica de una pluma producida por la combustión de combustóleo en una central termoeléctrica, el SO_2 difunde en la atmósfera en forma similar a la que difunden los demás gases y partículas que son productos de la combustión, especialmente, cerca de las bocas de las chimeneas, donde existe la mayor concentración, tanto de partículas como del gas SO_2 . Entonces, al utilizar los dos métodos diferentes para determinar la ubicación o posición de las fuentes emisoras, el resultado obtenido debe de ser el mismo. En otras palabras, como las bocas de las chimeneas son al mismo tiempo, fuentes emisoras de partículas y de moléculas de SO_2 , entonces la posición de ellas debe coincidir con los dos métodos.

En la figura 8.1 se muestra la gráfica de las señales lidar crudas obtenidas mediante un barrido acimutal realizado sobre un complejo termoeléctrico y petroquímico en el estado de Hidalgo. La gráfica es de 3 dimensiones, en la que x y y representan la posición en un plano paralelo al suelo, y z representa en color, la potencia de la señal recibida. Como se observa en la gráfica, aparentemente existe una cortina densa de partículas y contaminantes localizada

aproximadamente en una línea imaginaria que cruza el eje de las abscisas en $x = 440$ m.

En la figura 8.2 se muestra la gráfica de las mismas señales lidar con que fue elaborada la gráfica de la figura 8.1, pero ahora procesadas con la ecuación (6.4). En esta gráfica pueden apreciarse las secciones transversales de las plumas de la central, bien definidas, localizadas y se encuentran alineadas sobre una línea que cruza el eje de las abscisas en $x = 530$ m. Este resultado no concuerda con el de la gráfica de la figura 8.1, ya que hay 90 metros de diferencia entre las ubicaciones de las plumas.

Por otra parte, la Fig. 8.3 muestra la gráfica de concentraciones de SO_2 obtenida con el método de Absorción Diferencial (DIAL). Como puede observarse, al compararse las gráficas de las figuras 8.2 y 8.3, la concordancia es evidente. No obstante que el método de cocientes basado en la ecuación (6.4) utiliza información proporcionada por dispersión elástica exclusivamente a una sola longitud de onda, logra localizar las plumas con la misma exactitud que el método DIAL que utiliza radiación a dos longitudes de onda. En efecto, las plumas en donde se origina el SO_2 se encuentran alineadas sobre una línea que cruza el eje de las abscisas en $x = 530$. Esto demuestra sin lugar a dudas que el método de cocientes de β tiene la capacidad para extraer información sobre las características dispersivas de la atmósfera así como la ubicación donde éstas se encuentran.

Por lo tanto, el método entrega los resultados esperados. Es importante señalar, que una característica valiosa del método es su capacidad para revelar detalles escondidos o enmascarados en la señal lidar, como la forma de la sección transversal y la posición de las plumas. Aunque estos detalles están contenidos implícitamente en la señal, los métodos mencionados no son capaces de extraer esa información de la señal lidar. Otra ventaja del método, es que está representado por una sola ecuación, que lo hace fácil de implementar en cualquier sistema dado existente

Es importante señalar que las mediciones se realizaron en una atmósfera muy contaminada, abundante en materia particulada, típica de una región donde se ubican una central termoeléctrica, una refinería de petróleo y plantas

petroquímicas. Como se puede observar, eso no fue inconveniente para el buen desempeño del método de cocientes propuesto.

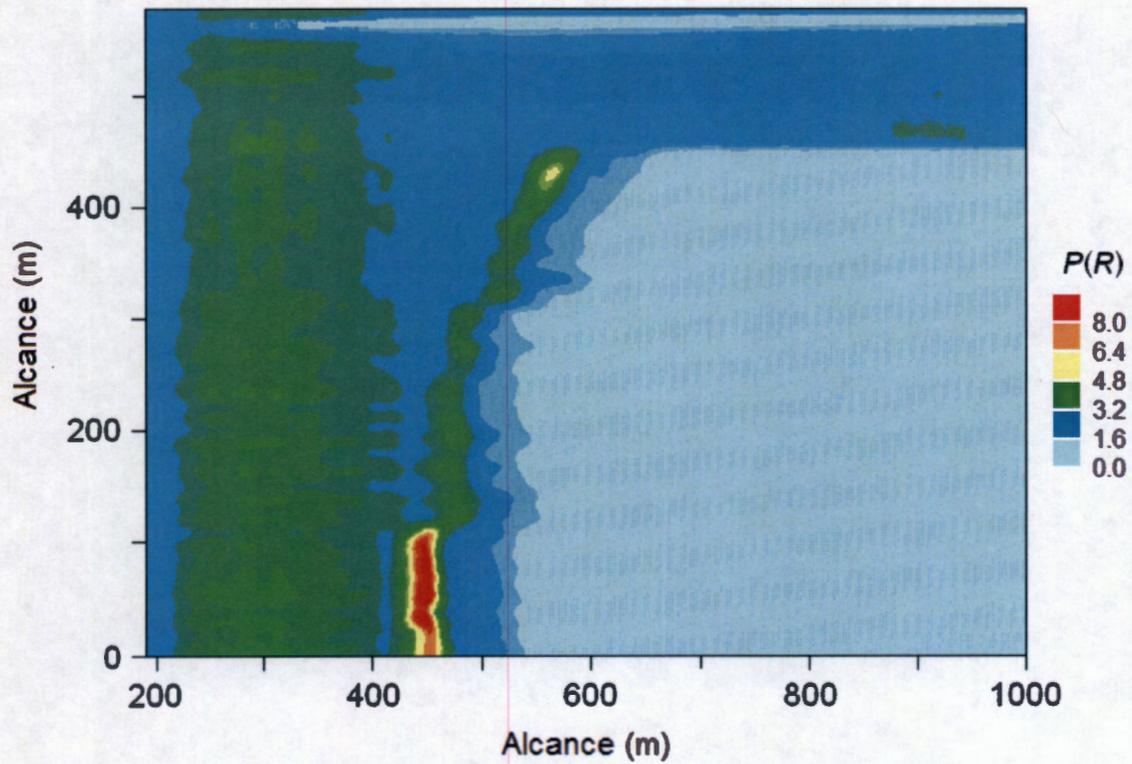


Figura 8.1. Gráfica de las señales lidar elásticas obtenidas mediante un barrido acimutal sobre las instalaciones de una central termoeléctrica.

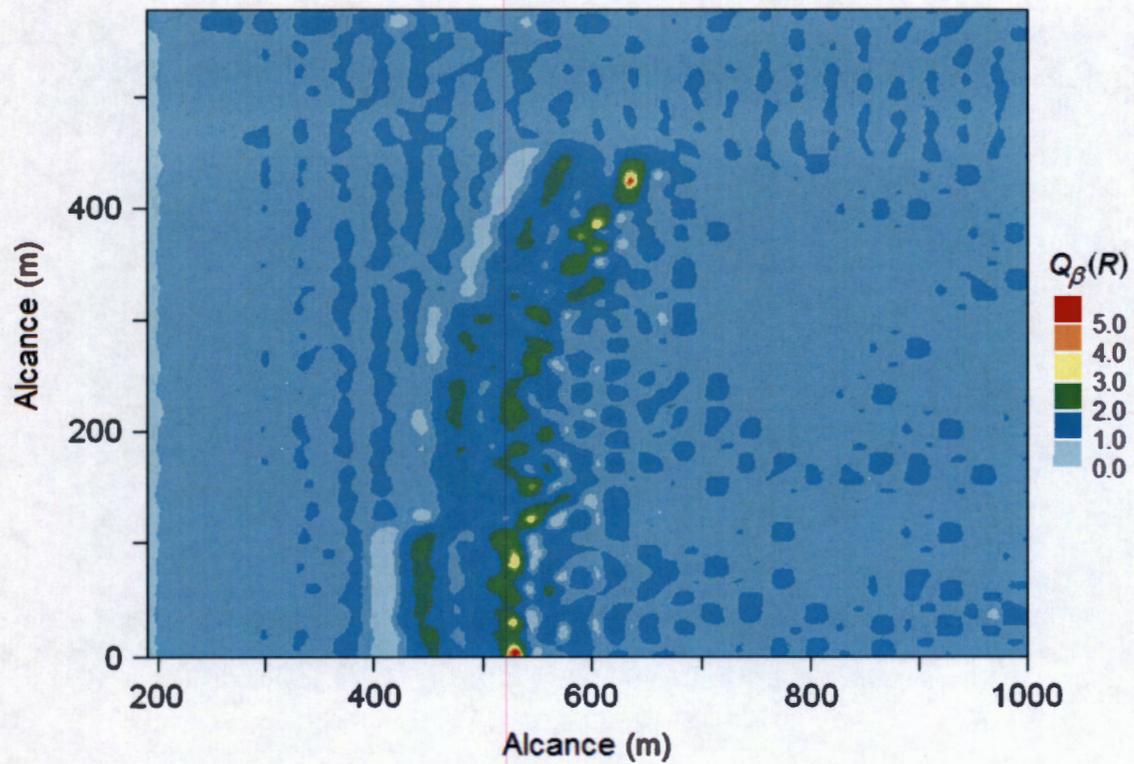


Figura 8.2. Gráfica de las señales lidar elásticas de la central termoeléctrica procesadas con la Eq. (6.4).

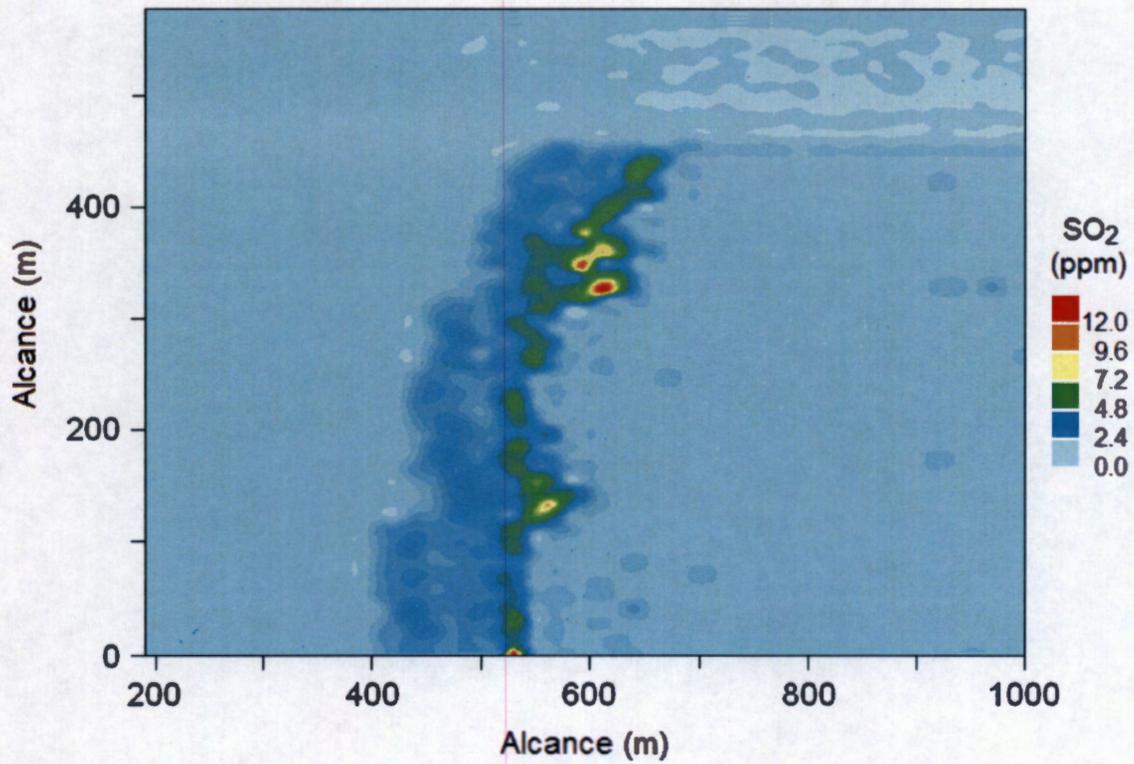


Figura 8.3. Gráfica de los perfiles de concentración de dióxido de azufre sobre la Central termoeléctrica obtenida con el sistema Lidar de Absorción Diferencial (DIAL).

8.2. Determinación del Perfil Vertical de la Estructura Atmosférica con el Lidar.

Las señales lidar que generaron las gráficas que se muestran en esta sección fueron adquiridas realizando el promedio sobre 20 disparos del pulso láser y con una resolución espacial $L = 15$ m. Se obtuvieron en mediciones realizadas en la atmósfera, en la dirección vertical (cenital), en las instalaciones del Instituto de Investigaciones Eléctricas, en Cuernavaca, Morelos.

Las gráficas tridimensionales ($x, y, color$) fueron procesadas y elaboradas con el paquete de programación gráfica LabVIEW®, de la compañía *National Instruments* [79, 80].

El alcance mínimo del lidar es de 200 metros y está determinado por la distancia más corta para la cual el telescopio puede enfocar en el fotocátodo del fotomultiplicador la luz láser esparcida por la atmósfera. Por esa razón, en todas las gráficas que se muestran, la distancia efectiva de medición comienza a los 200 m.

En la figura 8.4 se muestra una gráfica de las señales lidar crudas obtenida el 28 de Noviembre de 2003, con un alcance de 3000 m. En la parte derecha de la figura se observa un estrato atmosférico con un espesor de 100 m (aproximadamente) localizado a 400 m de altura. En la parte izquierda y centro, se observa una zona turbia grande que se extiende desde una altura de 1000 m hasta una altura de casi 3000 metros. Por otra parte, en la figura 8.5 se muestra la gráfica de las señales lidar de la figura anterior, pero ahora procesadas con el Método de Cocientes de β . En la parte derecha de la gráfica se observa que en efecto, hay un estrato atmosférico localizado a 400 m, pero en la parte izquierda y centro, la atmósfera se encuentra prácticamente limpia. También se puede observar que hay un estrato atmosférico aproximadamente entre 200 y 250 m de altura, que permanece prácticamente fijo durante las dos horas que dura la medición.

Si se comparan las gráficas 8.4 y 8.5 se pueden explicar sus diferencias. Hay que recordar, como se mencionó en la sección 4.2 que la atmósfera atenúa rápidamente la potencia del rayo láser; así, a distancias cercanas, cualquier característica o inhomogeneidad, se verá mucho más intensa que una similar que se encontrase a mayores distancias. Por otro lado, y por conservación de la energía, cuando el rayo láser encuentra zonas con mayor coeficiente de retrodispersión, se esparce más intensamente, pero lo hace a expensas de la fracción de luz que se sigue propagando. Como se puede comprobar en la parte derecha de la figura 8.4; al incidir la luz láser en el estrato, pierde energía, de forma que al propagarse después del estrato, la luz que se va esparciendo tiene menos intensidad que la que se va esparciendo en el lado izquierdo de la gráfica, por ejemplo entre los 1000 y 3000 metros de altura. Eso produce, que se localice aparentemente una zona contaminada en dicha región. Como se aprecia, ese problema no se tiene con la gráfica procesada con el método de cocientes de la figura 7.5.

Las figuras 8.6, 8.8, 8.10 y 8.12 muestran distintas gráficas de señales lidar sin procesar; las figuras 8.7, 8.9, 8.11 y 8.13 muestran las gráficas ya procesadas con el método propuesto. Con lo anterior, se pone de manifiesto la capacidad del lidar desarrollado para estudiar la estructura de la atmósfera.

Un estudio formal de las características de la atmósfera se encuentra fuera de los objetivos de este trabajo, por lo que una interpretación de las gráficas mostradas conviene dejarla a juicio de los expertos.

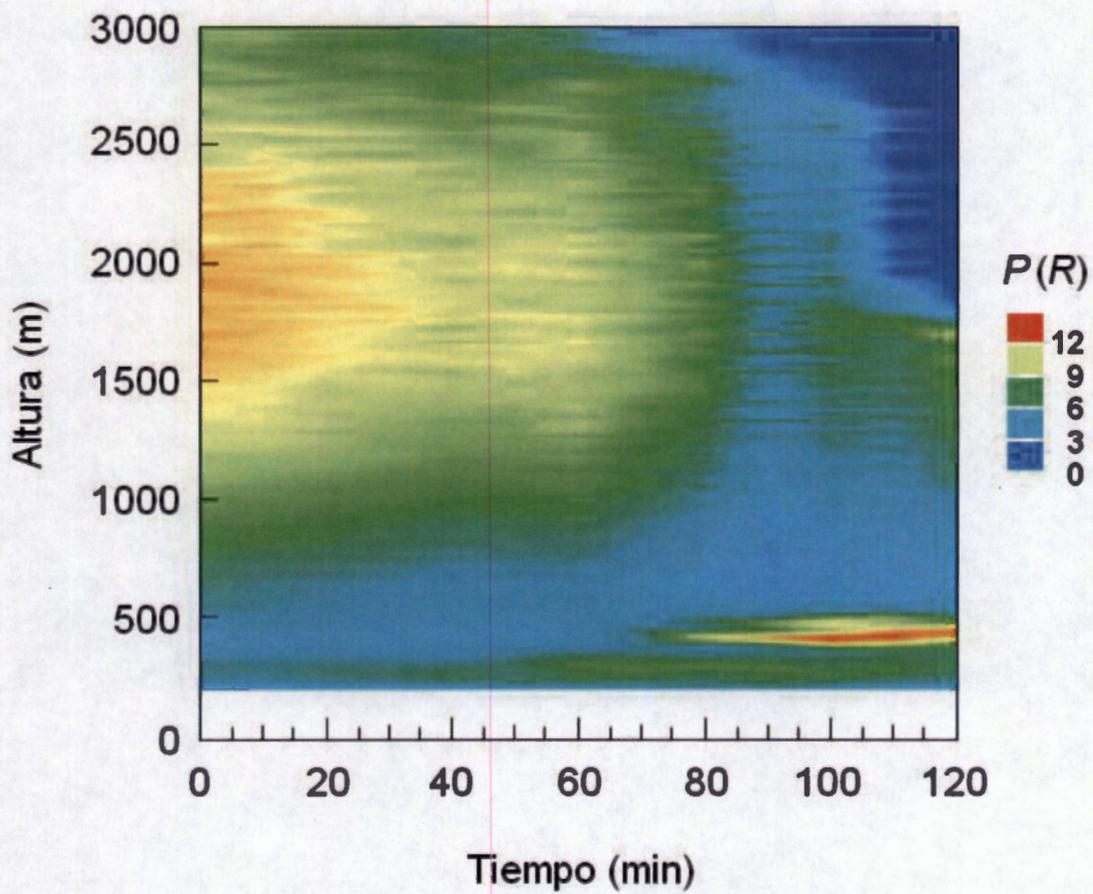


Figura 8.4. Gráfica altura-tiempo de señales lidar crudas, obtenidas el 28 de Noviembre de 2003, con alcance de 3000 m.

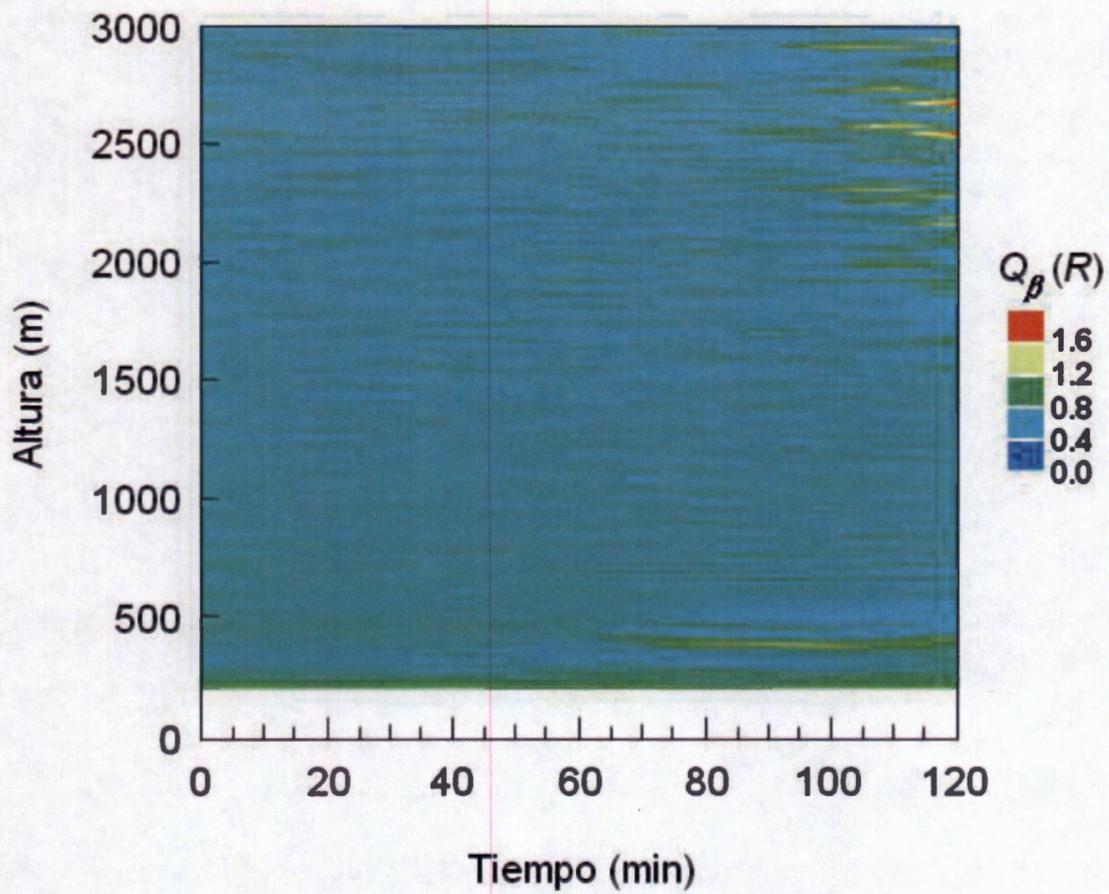


Figura 8.5. Gráfica altura-tiempo de las señales lidar de la Figura 8.4, procesadas con el Método de Cocientes.

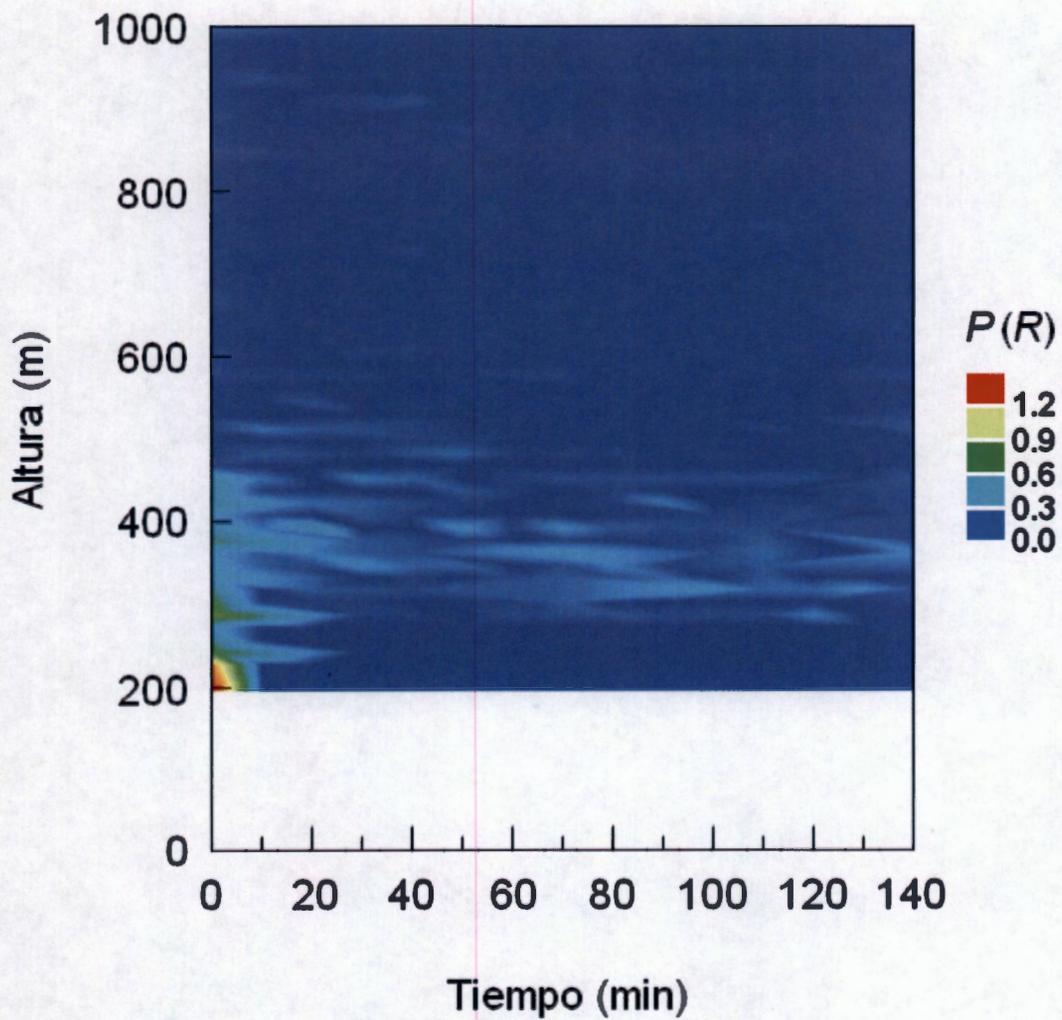


Figura 8.6. Gráfica altura-tiempo de señales lidar crudas, obtenidas el 7 de Diciembre de 2003, con un alcance de 1000 m.

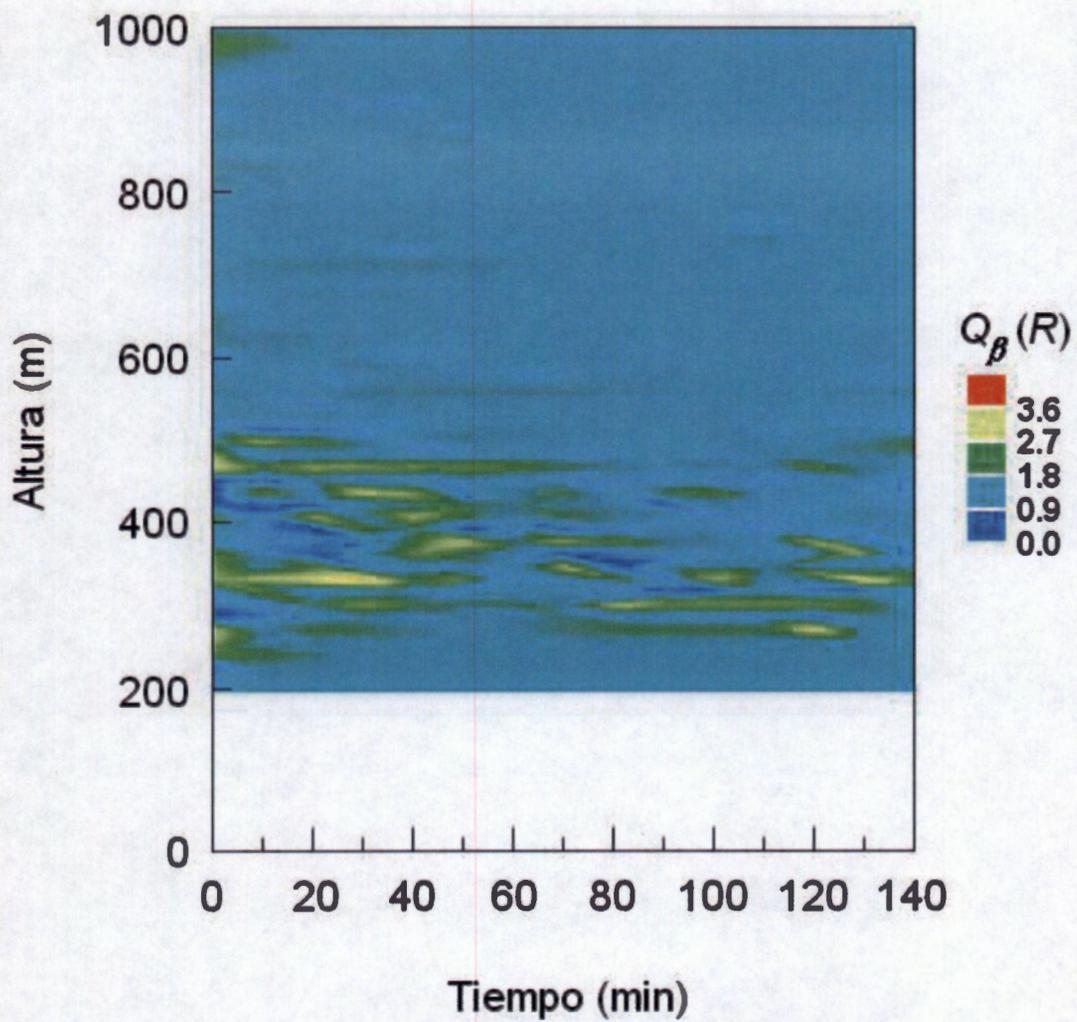


Figura 8.7. Gráfica altura-tiempo de las señales lidar de la Figura 8.6, procesadas con el Método de Cocientes.

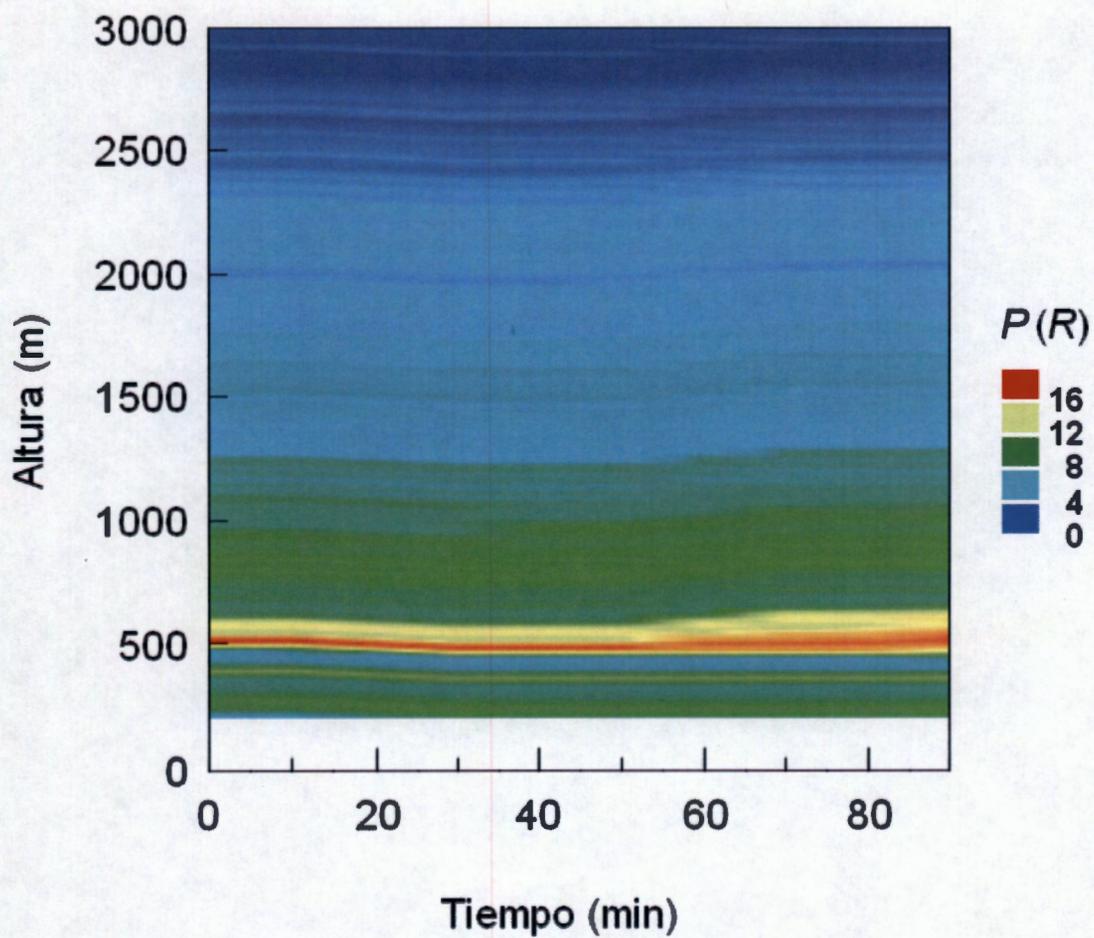


Figura 8.8. Gráfica altura-tiempo de señales lidar crudas, obtenidas el 11 de Diciembre de 2003, con un alcance de 3000 m.

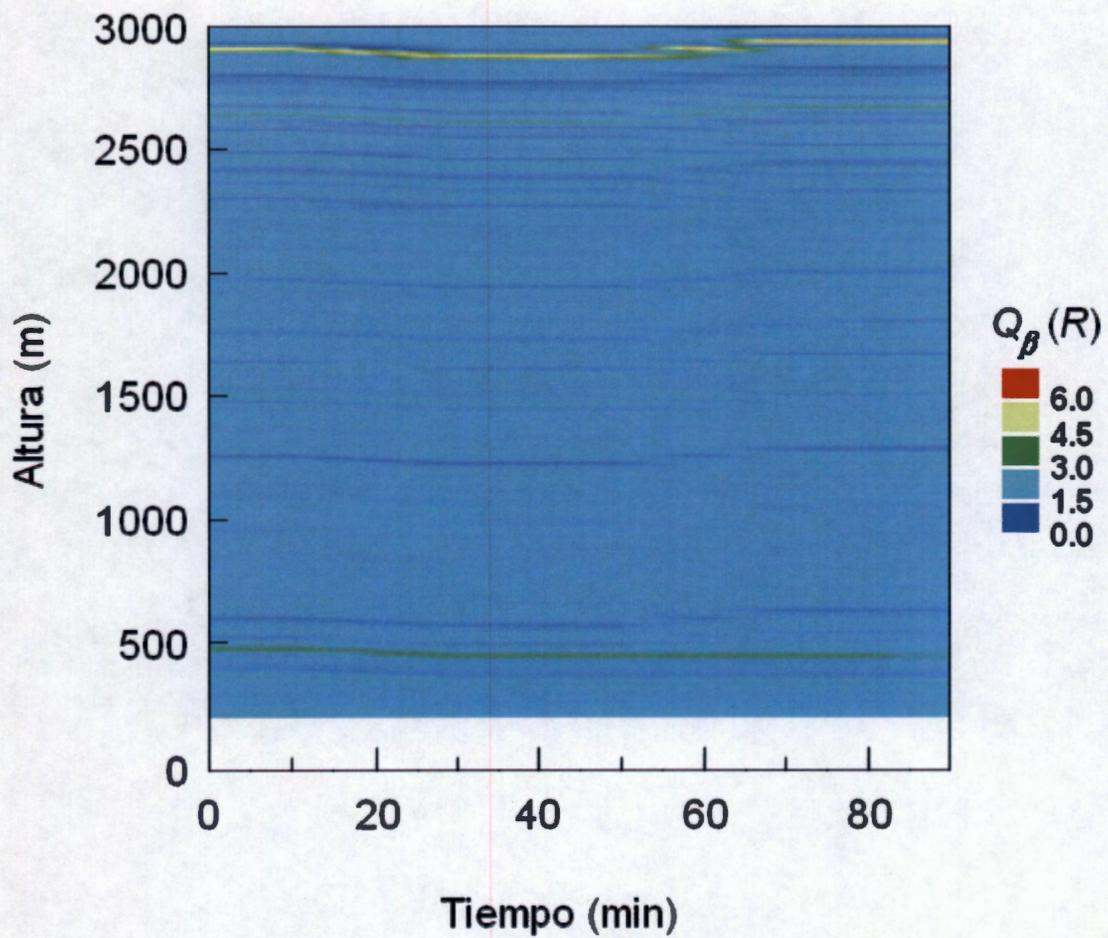


Figura 8.9. Gráfica altura-tiempo de las señales lidar de la Figura 8.8, procesadas con el Método de Cocientes.

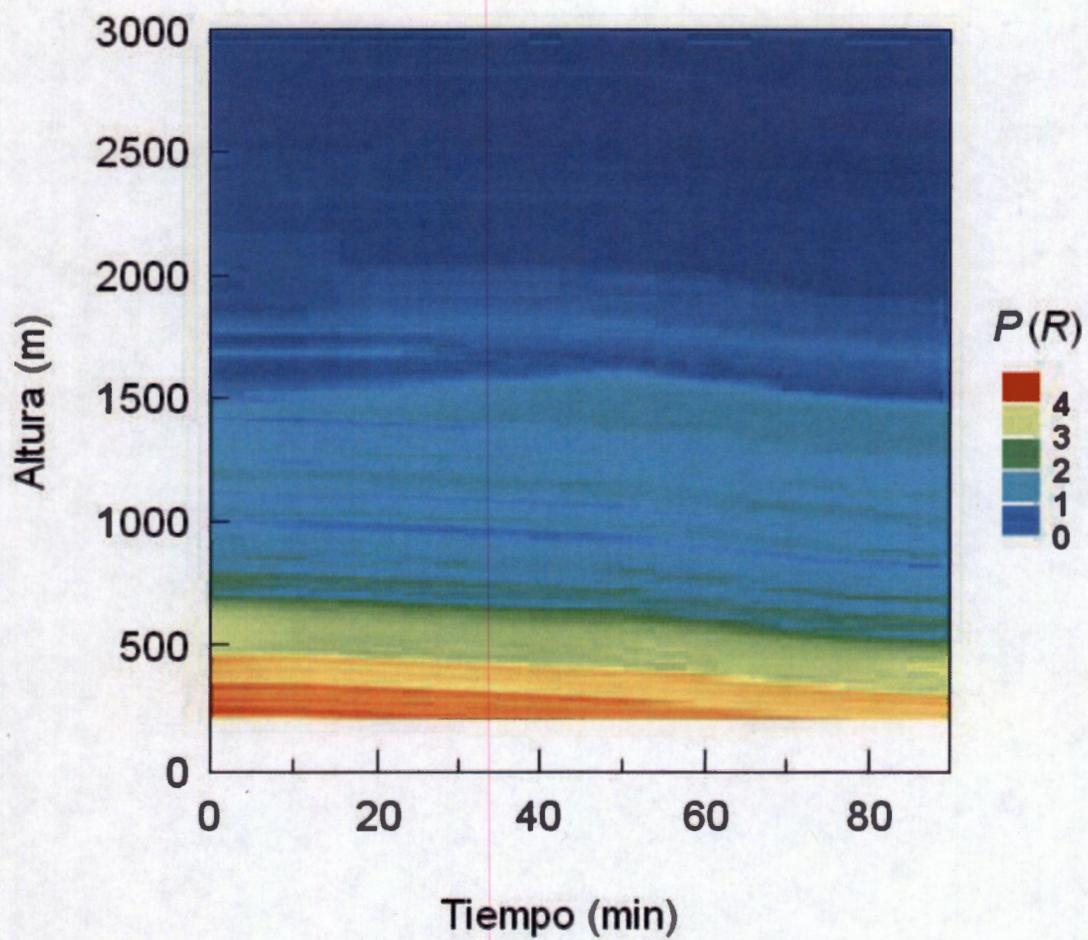


Figura 8.10. Gráfica altura-tiempo de señales lidar crudas, obtenidas el 12 de Diciembre de 2003, con un alcance de 3000 m.

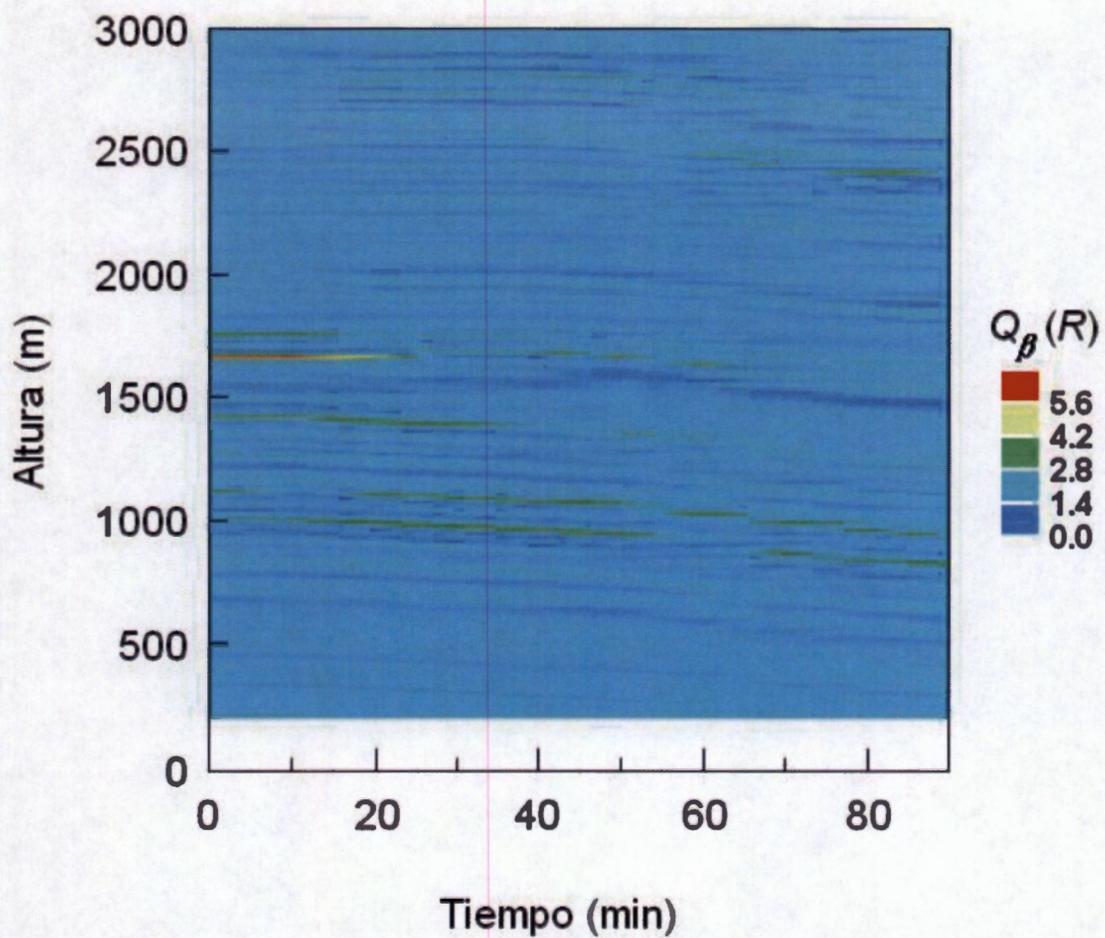


Figura 8.11. Gráfica altura-tiempo de las señales lidar de la Figura 8.10, procesadas con el Método de Cocientes.

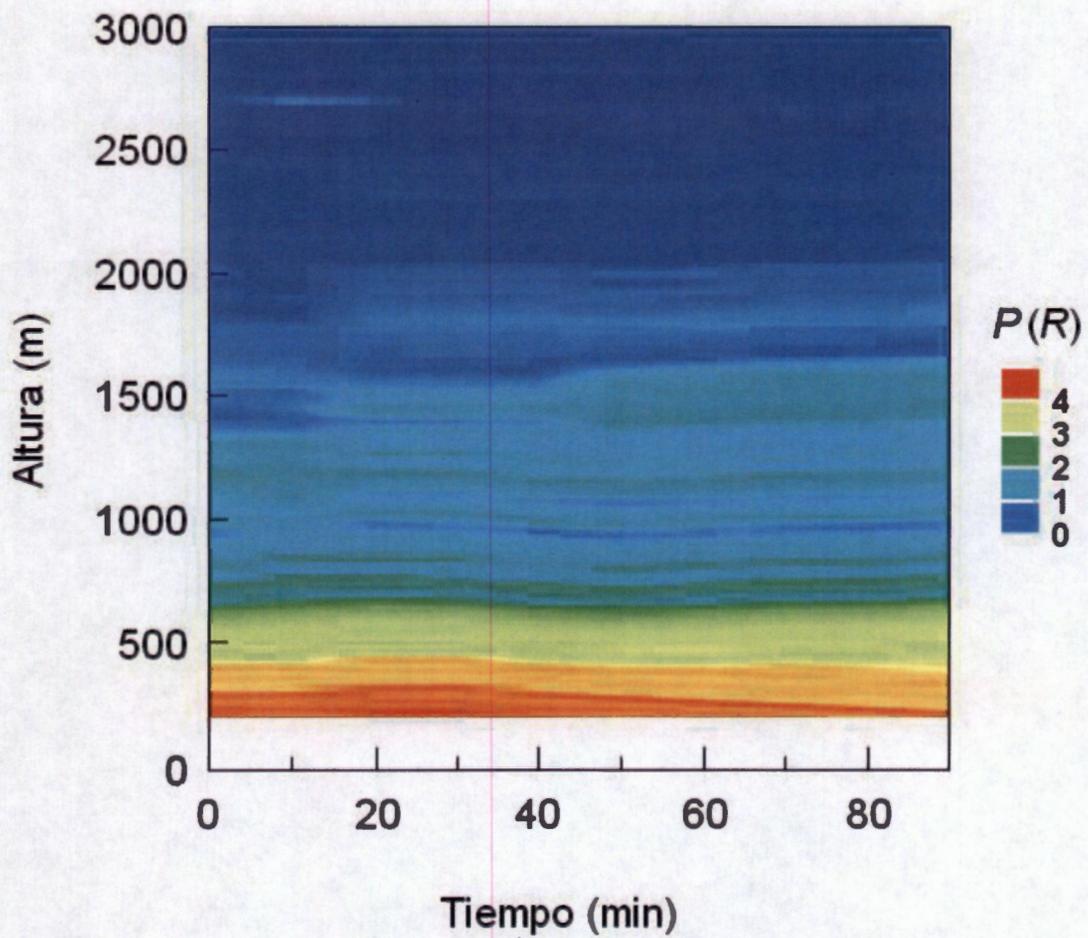


Figura 8.12. Gráfica altura-tiempo de señales lidar crudas, obtenidas el 13 de Diciembre de 2003, con un alcance de 3000 m.

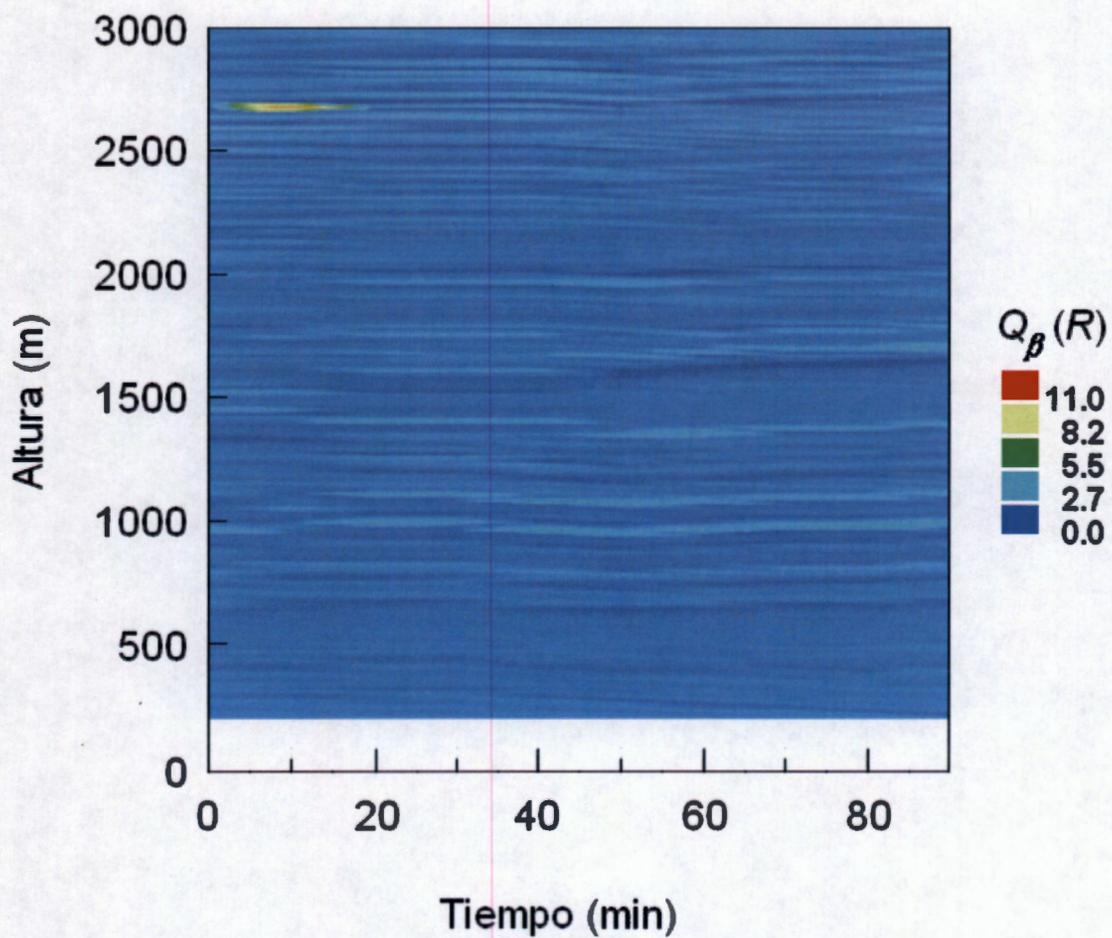


Figura 8.13. Gráfica altura-tiempo de las señales lidar de la Figura 8.12, procesadas con el Método de Cocientes.

8.3. Compensación de las Señales Lidar por la Altura en la Determinación del Perfil Vertical de la Atmósfera.

Una de las ventajas de los sistemas lidar modernos consiste en que la información obtenida durante los sondeos de la atmósfera queda almacenada en forma digital y puede ser usada posteriormente para procesarse con programas nuevos o complementarios para extraer información adicional o para una mejor presentación de la información.

Se ha visto en las secciones anteriores que las gráficas basadas en las señales lidar crudas no proporcionan la información completa sobre las características de la atmósfera, ya que el decaimiento de la potencia de la luz esparcida por la atmósfera con respecto de la distancia al cuadrado, enmascara características que aunque son importantes no se destacan porque se encuentran alejadas del lidar. Por otra parte, la información que entrega el método de cocientes aquí desarrollado no disminuye con el cuadrado de la distancia y su principal capacidad consiste en que muestra las características de la atmósfera en función de sus características dispersivas, independientemente de la distancia a la que éstas se encuentran. Lo cual es muy conveniente cuando se realizan barridos en planos paralelos o casi paralelos al suelo.

Sin embargo, las mediciones del sistema en la atmósfera, se realizaron en la dirección cenital (vertical) de la atmósfera, en la que existe una disminución de la densidad del aire con respecto de la altitud; que constituye además, parte de su estructura. Para hacer más reales y representativos los resultados presentados en las gráficas de la sección anterior con las mediciones en la dirección cenital, a continuación se presenta el siguiente procedimiento.

La variación de la presión del aire en la atmósfera con respecto de la altitud se puede estimar a través de la *ecuación hidrostática* [81]:

$$\frac{dp}{dz} = -g\rho, \quad (8.1)$$

donde p es la presión, g es la aceleración de la gravedad, ρ es la densidad del aire y z es la altitud. La densidad de un gas se relaciona con la presión mediante la ecuación [82]:

$$P(z) = \frac{\rho \mathfrak{R} T(z)}{M(z)}, \quad (8.2)$$

donde \mathfrak{R} es la constante universal de los gases ($8.314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$), $T(z)$ es la temperatura absoluta del aire y $M(z)$ es el peso molecular promedio del aire (28.966 mol^{-1} de la mezcla de gases).

Sustituyendo la ecuación (8.2) en la ecuación (8.1) se obtiene:

$$\frac{dp}{p} = -\frac{gM(z)}{\mathfrak{R}T(z)} dz. \quad (8.3)$$

A altitudes bajas ($z \leq 5,000 \text{ m}$) y considerando aire sin humedad, el peso molecular y la temperatura se pueden suponer constantes con respecto de z . Entonces la Ec. (8.3) puede integrarse, dando como resultado:

$$p(z) = p_0 \exp\left(-\frac{gMz}{\mathfrak{R}T}\right),$$

y con la ec. (8.2):

$$\rho(z) = p_0 \frac{M}{\mathfrak{R}T} \exp\left(-\frac{M}{\mathfrak{R}T} g z\right). \quad (8.4)$$

Sustituyendo los valores de las constantes, siendo $p_0 = 8.89 \times 10^4 \text{ (Pa)}$ la presión atmosférica a la altitud de la Cd. de Cuernavaca:

$$\rho(z) = 1.033 \text{ (kg/m}^3\text{)} \exp\left(-1.14 \times 10^{-4} z\right). \quad (8.5)$$

Para $z = 0$:

$$\rho(0) = 1.033 \text{ (kg/m}^3\text{)}, \quad (8.6)$$

y haciendo $h = -1.14 \times 10^{-4}$,

$$\Rightarrow \rho(z) = \rho(0) \exp hz. \quad (8.7)$$

Entonces, la ecuación (6.4) toma la forma:

$$\Rightarrow Q_{\beta}^{\rho}(R) = \frac{\rho(R) \beta(R+L)}{\rho(0) \beta(R)} = k \frac{\rho(R)}{\rho(0)} \left(\frac{R+L}{R} \right)^2 \frac{P(R+L)}{P(R)},$$

Donde además de haberse multiplicado los términos de la ecuación (6.4) por $\rho(R)$ se ha dividido entre la constante $\rho(0)$ para que el primer segmento de la señal lidar, cuando $R = 0$, $\rho(R) = \rho(0)$, permanezca inalterado al aplicar esta nueva ecuación.

Por lo tanto:

$$Q_{\beta}^{\rho}(R) = \frac{\beta(R+L)}{\beta(R)} \exp hR = k \left(\frac{R+L}{R} \right)^2 \frac{P(R+L)}{P(R)} \exp hR. \quad (8.8)$$

El término exponencial en la Eq. (8.8) atenúa la señal lidar con respecto de la distancia a una razón igual a la que cambia la densidad de la atmósfera como función de la altitud.

Las tres gráficas $P(R)$, $Q_{\beta}(R)$ y $Q_{\beta}^{\rho}(R)$ de la figura 8.14 ilustran lo anterior. Como se observa, la gráfica $Q_{\beta}^{\rho}(R)$ representa la señal lidar corregida con la densidad atmosférica como función de la altura (R) y proporciona una visualización real de la estructura atmosférica.

En las Figuras 8.15, 8.16, 8.17, 8.18 y 8.19 se muestran las gráficas señales lidar procesadas con la Eq. (8.8), correspondientes a las señales lidar crudas de las Figuras 8.4, 8.6, 8.8, 8.10 y 8.12, respectivamente.

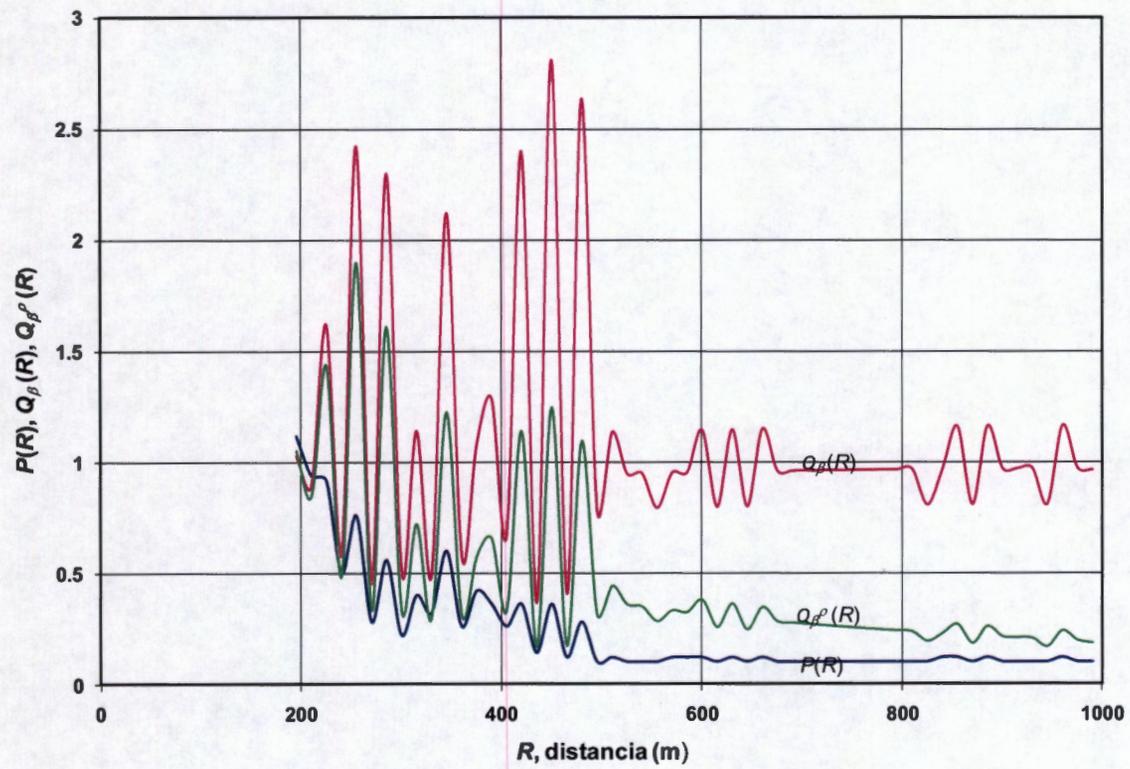


Figura 8.14. Gráfica de la señales $P(R)$, $Q_{\beta}(R)$ y $Q_{\beta}^{\rho}(R)$.

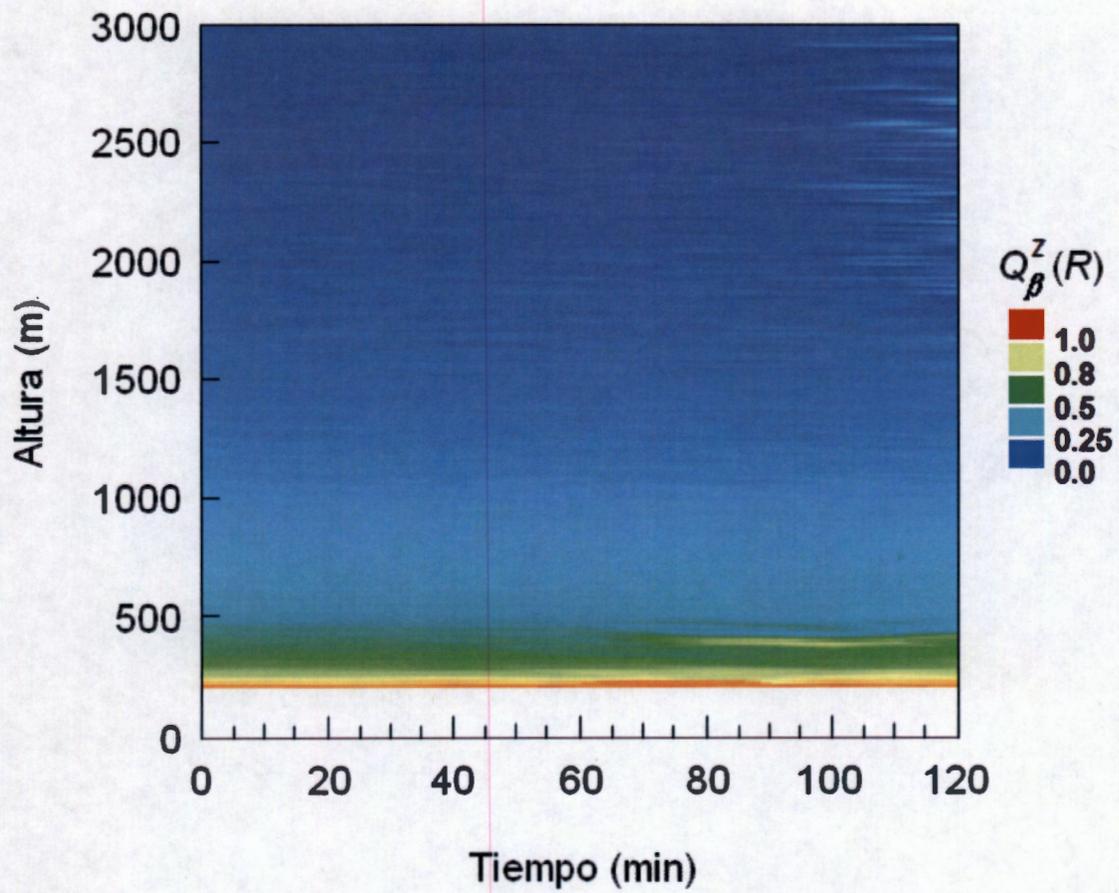


Figura 8.15. Gráfica altura-tiempo de las señales lidar de la Figura 8.4, procesadas con la ecuación (8.8).

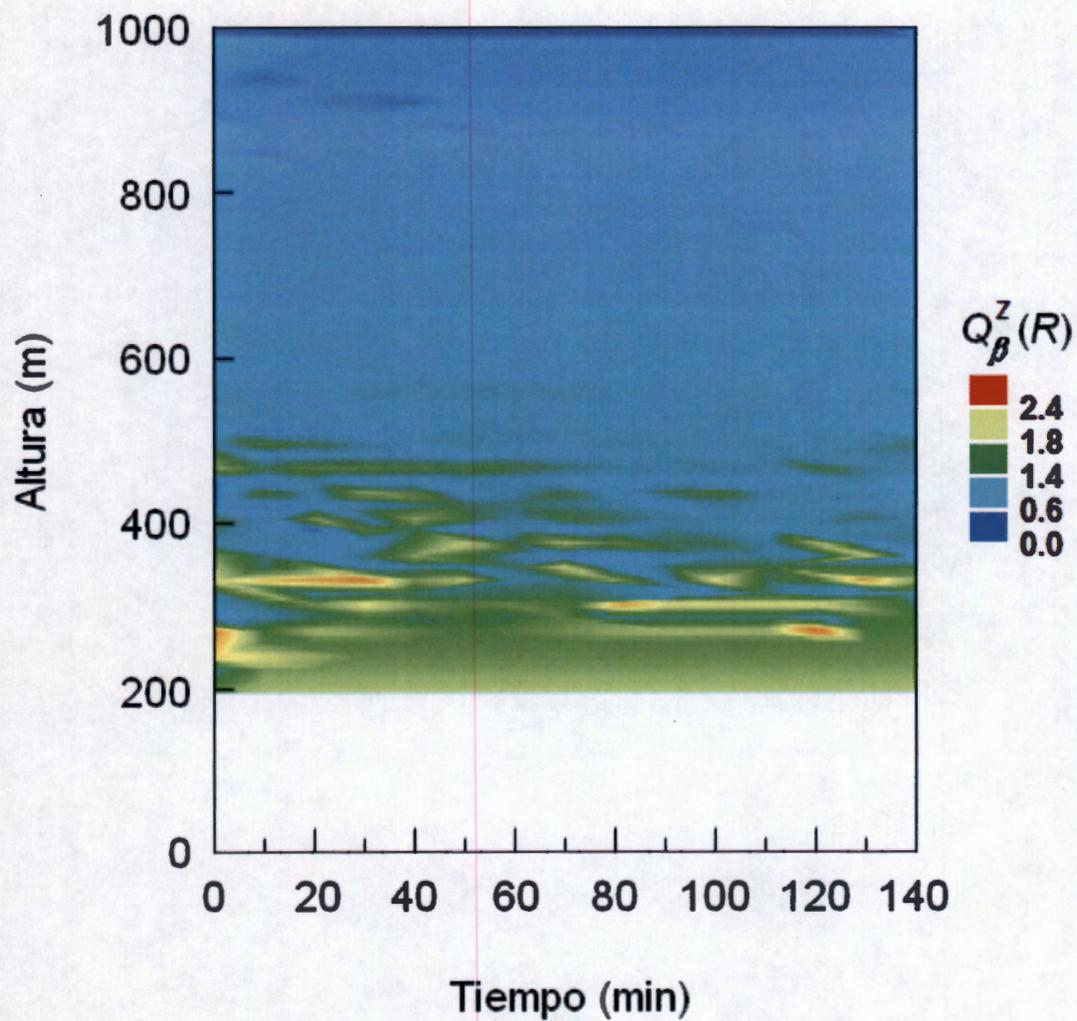


Figura 8.16. Gráfica altura-tiempo de las señales lidar de la Figura 8.6, procesadas con la ecuación (8.8).

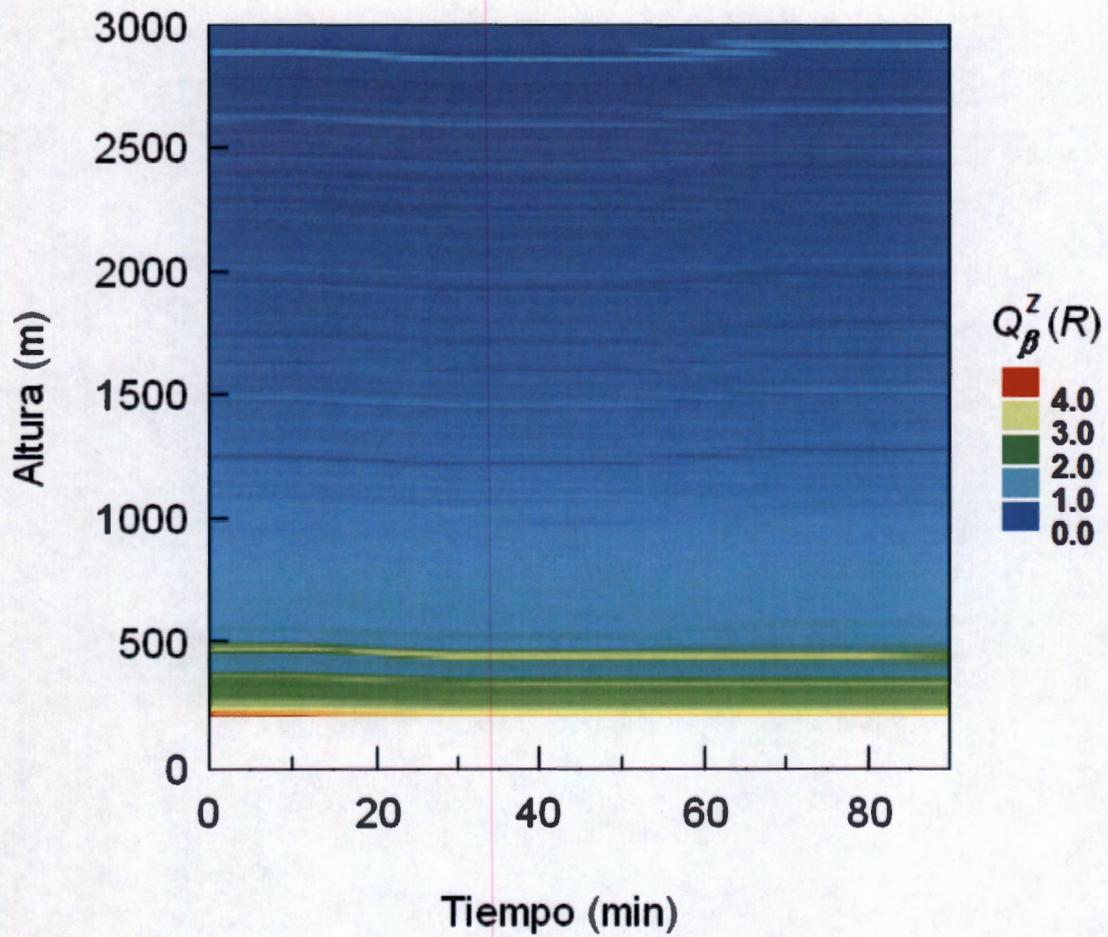


Figura 8.17. Gráfica altura-tiempo de las señales lidar de la Figura 8.8, procesadas con la ecuación (8.8).

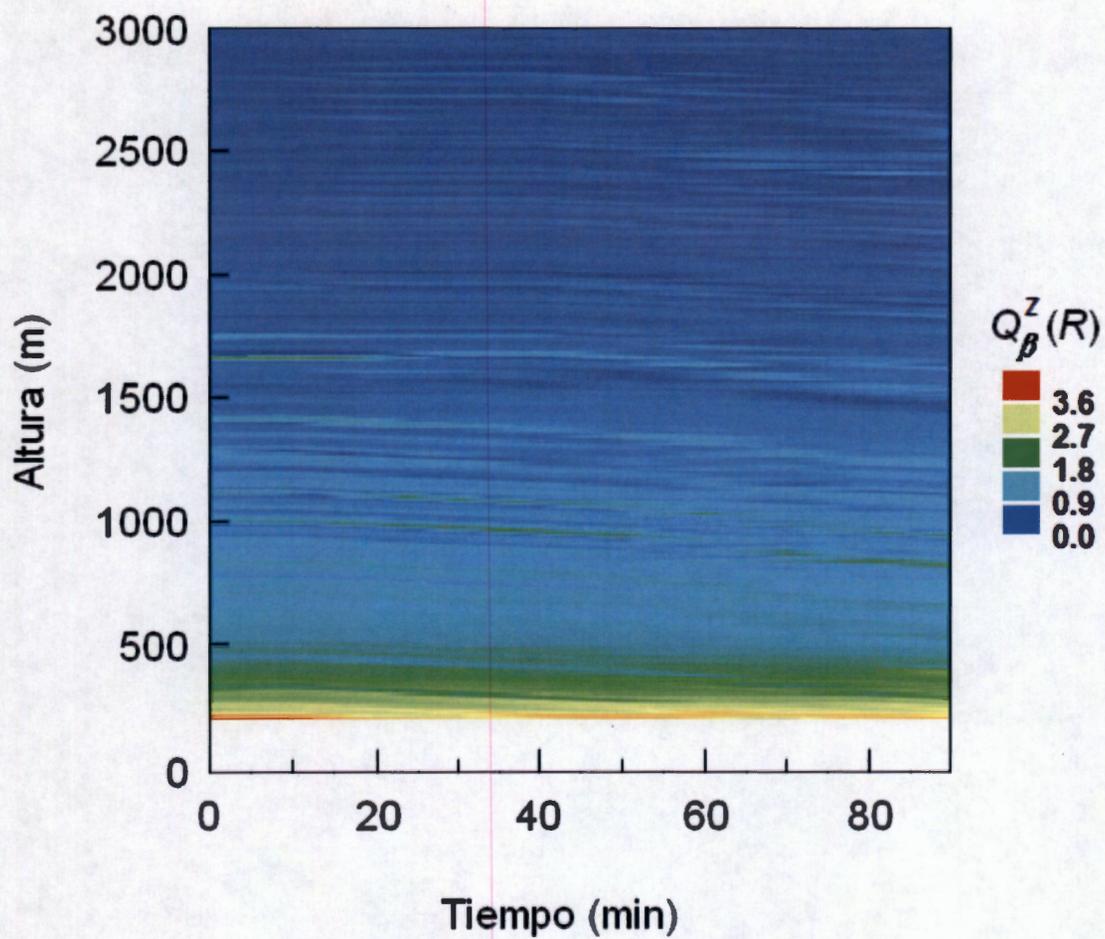


Figura 8.18. Gráfica altura-tiempo de las señales lidar de la Figura 8.10, procesadas con la ecuación (8.8).

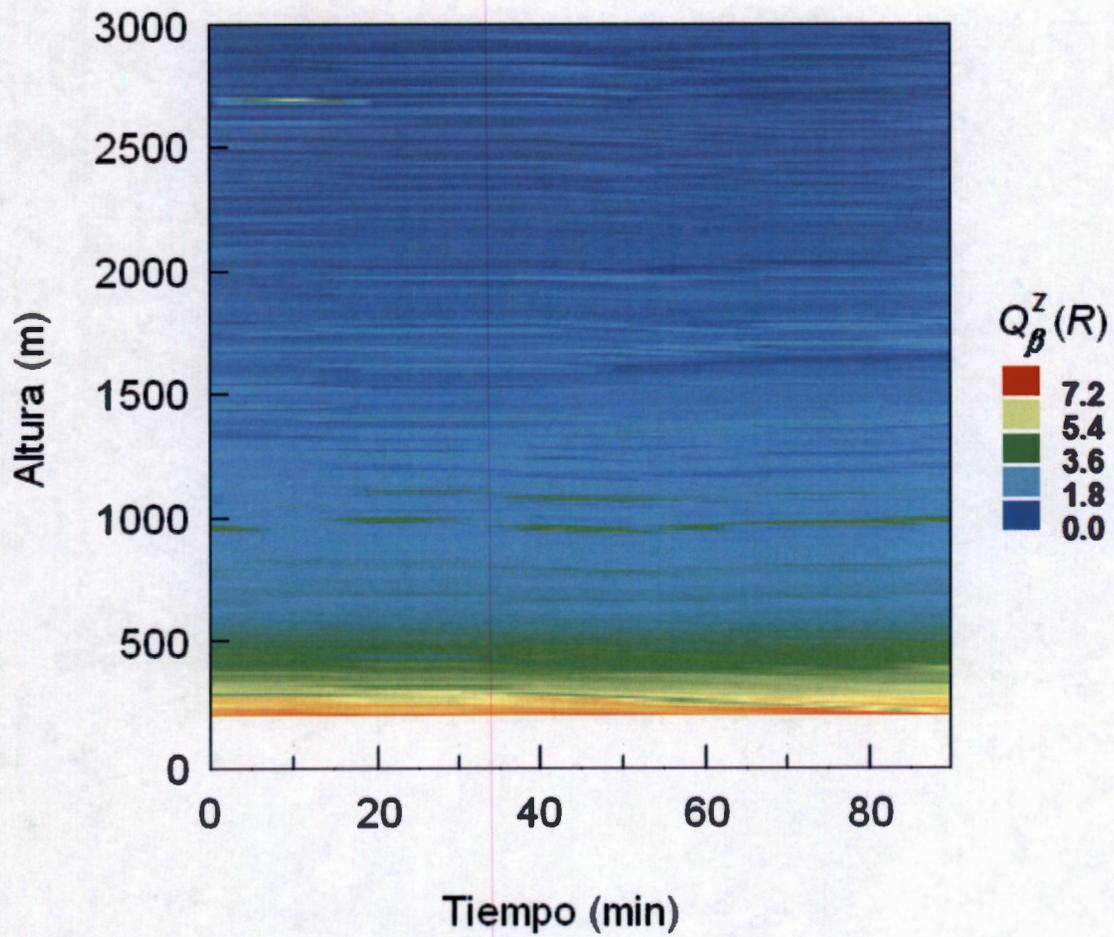


Figura 8.19. Gráfica altura-tiempo de las señales lidar de la Figura 8.12, procesadas con la ecuación (8.8).

9

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

9.1. Conclusiones.

Se ha desarrollado un lidar de dispersión elástica que ha demostrado su aplicabilidad en estudios de la estructura atmosférica. Tiene la capacidad para determinar el perfil de la estructura atmosférica en la dirección cenital (vertical), al localizar y determinar la altura y grosor de los diferentes estratos o capas de la atmósfera, así como su evolución espacial y temporal.

En forma paralela al desarrollo del lidar, se ha desarrollado un método que permite una interpretación clara de las señales lidar elásticas de retorno atmosféricas. El método proporciona los detalles de la estructura atmosférica y sus pruebas en situaciones reales han entregado mejores resultados que el método de corrección por el cuadrado de la distancia. Es conveniente destacar la capacidad que tiene este método para revelar los detalles ocultos o enmascarados en la señal lidar. Aunque estos detalles contienen información que está implícita en la señal lidar, los métodos tradicionales no permiten en ocasiones la extracción de tal información, como la forma y posición de las características atmosféricas. El uso de este método, sin embargo, claramente vence estas dificultades, proporcionando una localización precisa de las fuentes contaminantes y permitiendo su separación e identificación individual, aún en atmósferas muy contaminadas. Su robustez ha sido demostrada con los casos experimentales discutidos.

El método ha demostrado también que al usar radiación láser a una sola longitud de onda (532 nm) es capaz de discernir y localizar los detalles de la atmósfera, como lo muestran las Figuras 8.2 y 8.3; resultados comparables con el Método del Lidar de Absorción Diferencial (DIAL), que necesita radiación láser a dos longitudes de onda para lograrlo.

Para una visualización más realista de la estructura atmosférica, el método de cocientes ha sido complementado con la variación de la densidad de la atmósfera como función de la altitud, lo cual muestra la versatilidad del método.

Durante el desarrollo de este trabajo, se publicaron dos artículos en revistas arbitradas; en el primero, se establecen las ecuaciones de esparcimiento de la luz láser en la atmósfera y se describe una forma de corregir la señal lidar con el cuadrado de la distancia; se presentan también algunas gráficas experimentales de la aplicación de esa forma de corrección. En el segundo artículo se describe el método de cocientes de beta, que fue desarrollado durante el trabajo de investigación en esta tesis, y se realiza una comparación de los resultados de su aplicación con los del método de absorción diferencial, para demostrar que los resultados del método de cocientes son congruentes. Se muestran también las gráficas experimentales obtenidas con la aplicación del método.

Adicionalmente, se presentaron dos trabajos en congresos nacionales [83, 84], relacionados con el desarrollo del sistema lidar.

Existe una gran variedad de sistemas lidar en el mundo, así como varios procedimientos para analizar la señal lidar, el enfoque en el desarrollo de los sistemas y métodos, depende en gran medida de la información que se espera obtener con dichos sistemas. El autor de esta tesis considera que esta modesta contribución representa un paso en el desarrollo de los sistemas lidar en México.

9.2. Trabajos Futuros.

El sistema lidar de dispersión elástica, fruto de este trabajo, es un prototipo y constituye la primera etapa de una línea de investigación que podrá irse complementando a partir de los resultados mostrados en este trabajo. En proyectos futuros el sistema podrá ser perfeccionado con nuevos sistemas ópticos

y electrónicos que le permitirán realizar sondeos en la atmósfera a mayores altitudes y con una mejor resolución. Podrá completarse también con los sistemas mecánicos para proporcionarle la capacidad de movimiento para sondear la atmósfera hacia todas las direcciones en la atmósfera, para realizar barridos acimutales, cenitales o sobre un plano específico. A este respecto, se tiene el diseño de dicho sistema mecánico, el cual se muestra en la figura 9.1, pero cuya construcción no fue posible por la escasez de recursos económicos.

Todas las mediciones con el sistema lidar que se reportan en este trabajo se realizaron en la Cd. de Cuernavaca, Mor. Desafortunadamente, no fue posible trasladar al sistema lidar a otras zonas de nuestro país para realizar mediciones en atmósferas más contaminadas y con estructuras con mayor contraste, o con más dinámica. De haberse realizado así, los resultados serían, seguramente, más interesantes. Esas mediciones quedarán pendientes para proyectos futuros.

Se puede considerar que el lidar de esparcimiento elástico es un sistema básico, cuyo costo de desarrollo es de alrededor de un millón de pesos (sin considerar recursos humanos). Sin embargo, puede complementarse posteriormente con los instrumentos para detectar el corrimiento Doppler y usarse para medir velocidad de viento y su distribución en la atmósfera; o el esparcimiento Raman, para determinar compuestos específicos como el vapor de agua en la atmósfera. O evolucionar hacia sistemas aún más sofisticados como el lidar de absorción diferencial o el lidar de fluorescencia.

Actualmente se ha empezado a utilizar láseres con pulsos de alta energía con duración de alrededor de unos cuantos femtosegundos (10^{-15} s), que además de proporcionar una resolución espacial (L) muy alta, consiguen inducir la emisión espontánea de luz en los gases y compuestos de la atmósfera en un amplio espectro de longitudes de onda; lo que permite identificar espectroscópicamente esos compuestos y además, su distribución espacial. Con esos nuevos avances y descubrimientos se abre la posibilidad de un sinfín de usos y aplicaciones del lidar.

El logro de las metas mencionadas depende en gran parte de los recursos económicos y humanos que se puedan conseguir para llevar los sistemas lidar a una aplicación cotidiana en nuestro país y a los niveles de avance requeridos para competir internacionalmente. El autor de esta tesis considera que con este

prototipo, ya en funcionamiento, se podrán abanderar las acciones para recurrir a las diferentes instancias para conseguir esos recursos.

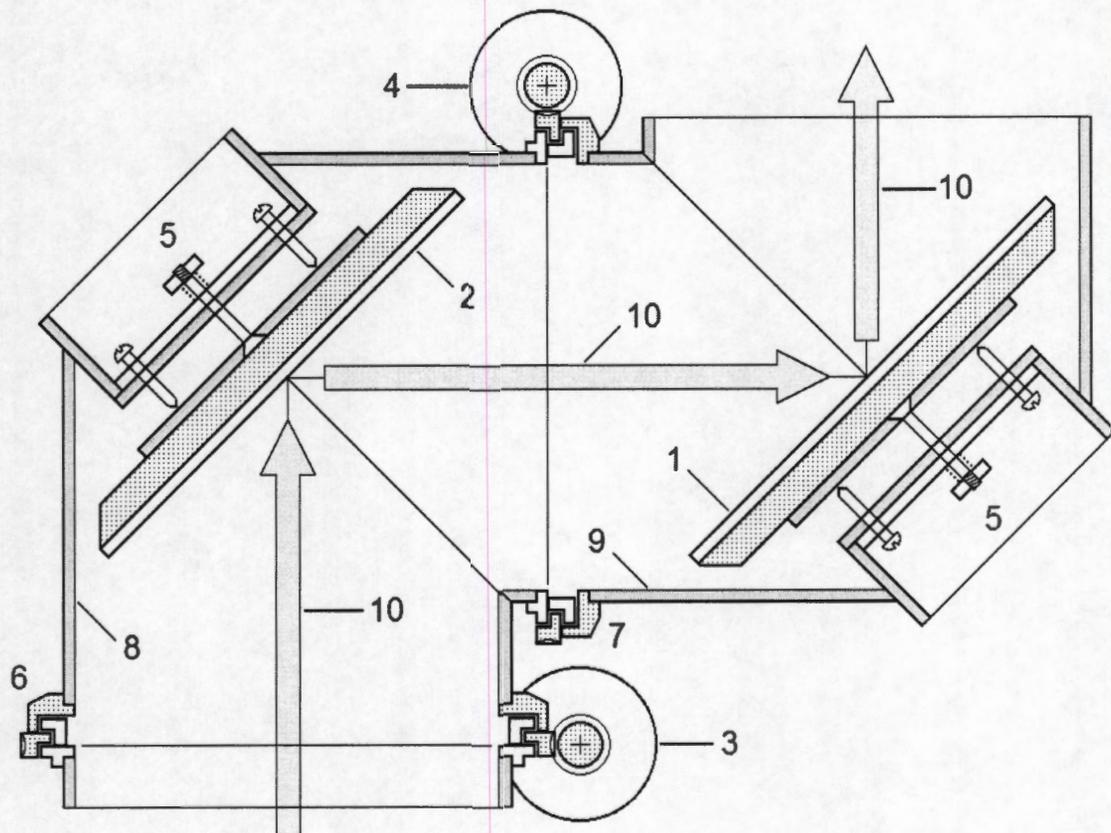


Figura 9.1. Esquema del sistema mecánico de movimiento acimutal-cenital para la exploración de la atmósfera, (1) espejo de desvío cenital; (2) espejo de desvío acimutal; (3) motor para el movimiento acimutal; (4) motor para el movimiento cenital; (5) mecanismo de alineación de los espejos; (6) cojinete acimutal; (7) cojinete cenital; (8) tubo de alojamiento acimutal; (9) tubo de alojamiento cenital; (10) dirección de la luz láser.

BIBLIOGRAFÍA

1. Synge, E. H. (1930), "A Method for Investigating Higher Atmosphere", *Phyl. Mag*, **52**, 1014-1020.
2. Hulbert, E. O. (1937), "Observations of a Searchlight Beam to an Altitude of 28 kilometers", *J. Opt. Soc. Am.* **27**, 377
3. Elterman, L. (1954), "Seasonal Trends of temperature, Density, and Pressure to 67.6 km Obtained with the Searchlight Probing Technique", *J. Geophys. Res.* **59**, 3.
4. Maiman, T. H. (1960), "Stimulated Optical Radiation in Ruby", *Nature*, **187**, 493-505.
5. McClung, F. J. and R. W. Hellwarth (1962), "Giant Optical Pulsations from Ruby", *J. Appl. Phys.*, **33**, 828-829.
6. Fiocco, G. and L.D. Smullin (1963), "Detection of Scattering Layers in The Upper Atmosphere (60-140 km) by Optical Radar", *Nature*, **199**, 1275-1276.
7. Ligda, M. G. H. (1963), "Meteorological Observations with a Pulsed Laser Radar", *Proc. Conf. Laser Technol., 1st*, San Diego, California, 63-72.
- 8, Collis, R. T. H., and M. G. H. Ligda (1966), "Note on Lidar Observations of Particulate Matter in the Stratosphere", *Journal of Atmospheric Science*, **23**, 255-257.

9. Collis, R. T. H. (1966), "Lidar: A new Atmospheric Probe", *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **92**, 220-230.
10. Instituto Mexicano del Petróleo (1990), "Estudio Global de la Calidad del Aire en la Cd. de México", Boletín Descriptivo del Proyecto EGCA, Subdirección General de Capacitación y Desarrollo Profesional, División Editorial.
11. Maldonado R., J. L., W. Córdova M, L. E. Regalado, H. Barbosa G. (2002), "Detección de Contaminantes, Sistema Lidar", *Ciencia y Desarrollo*, **164**, 66-76.
12. Carswell, A. I. (1983), "Lidar Measurements of the Atmosphere", *Canadian Journal of Physics*, **61**, 378-395.
13. Northend, C. A., R. C. Honey, and W. E. Evans (1966), "Laser Radar (Lidar) for Meteorological Observations", *Rev. Sci. Instrum.*, **37**, 393-400.
14. Hamilton, P. M. (1969), "The Application of a Pulsed-light Rangefinder (lidar) to the Study of Chimney Plumes", *Phil. Trans. Roy. Soc. Lond.*, **265**, 153-172.
15. Anfossi, D., P. Bacci and A. Longhetto (1972), "An Application of Lidar Technique to the Study of the Nocturnal Radiation Inversion", *Atmospheric Environment*, **8**, 537-541, Pergamon Press.
16. McElroy, J. L., and M. R. McGown (1992), "Application of Airborne Lidar in Particulate Air Quality Problem Delineation, Monitoring Network Design and Control Strategy Development", *Air Waste Manage. Assoc.*, **42**, 1186-1192.
17. Mason, J. B. (1975), "Lidar Measurement of Temperature: a New Approach", *Appl. Optics*, **14**, 76-78.
18. Cohen, A., J. A. Cooney, and K. N. Geller (1976), "Atmospheric Temperatures Profiles from Lidar Measurements of Rotational Raman and Elastic Scattering", *Appl. Optics*, **15**, 2896-2901.

19. Bacci, P., G. Elisei and A. Longhetto (1974), "Lidar Measurement of Plume Rise and Dispersion at Ostiglia Power Station", *Atmospheric Environment*, **8**, 1177-1186.
20. Egeback, A. L., K. A. Fredriksson, and H. M. Hertz (1984), "Dial Techniques for the Control of Sulphur Dioxide Emissions", *Appl. Optics*, **23**, 722-729.
21. Hoff, R. M. and F. A. Froude (1979), "Lidar Observation of Plume Dispersion in Northern Alberta", *Atmospheric Environment*, **13**, 35-43.
22. Whaley, H. and G. K. Lee (1978), "An Assessment of Plume Dispersion Parameters Measured in Fall and Winter at Tar-Sand Refinery Complex", *Air Pollution Control Association*, **28**, No. 6.
23. McElroy, J. L. (1987), "Estimation of Pollutant Transport and Concentration Distributions Over Complex Terrain of Southern California Using Airborne Lidar", *JAPCA*, **37**, 1046-1051.
24. Moore, G. E., L. B. Milich and M. K. Liu (1988), "Plume Behaviors Observed Using Lidar and SF₆ Tracer at a Flat and Hilly Site", *Atmospheric Environment*, **22**, 1673-1688.
25. Gelbwachz, J. A. (1996), "Lidar for Remote Measurements of Ozone in the Exhaust Plumes of Launch Vehicles", *Appl. Opt.*, **33**, 7151-7156.
26. Pawloski, J. N. and D. G. Iverson (1998), "Use Optical Remote Sensing Techniques to Monitor Facility Releases", *Hydrocarbon Processing*, **77**, 125-130.
27. Bender, P. L., D. G. Currie, S. K. Poultney, C. O. Alley, R. H. Dicke, D. T. Wilkinson, D. H. Eckhardt, J. E. Faller, W. M. Kaula, J. D. Mulholland, H. H. Plotkin, E. C. Silverberg, and J. G. Williams (1973), "The Lunar Laser Ranging Experiment", *Science*, **182**, 4109, 229-238.

28. U. S. Environmental Protection Agency (1995), 40 Code of Federal Regulations, Part 60, Appendix A, Alternate Method 1: Determination of the Opacity of Emissions From Stationary Sources Remotely by Lidar, 662-665.
29. Johnson, W. B. (1969), "Lidar Observations of the Diffusion and Rise of Stack Plumes", *J. Appl. Meteorol.* **8**, 443.
30. Weichel, H. (1990), *Laser Beam Propagation in the Atmosphere*, SPIE Optical Engineering Press, Volume TT3.
31. Leonard, D. A. (1967), "Observation of Raman Scattering from the Atmosphere Using a Pulsed Nitrogen Ultraviolet Laser", *Nature*, **216**, 142-143.
32. Ansmann, A., M. Riebesell, and C. Weitkamp (1990), "Measurement of Atmospheric Aerosol Extinction Profiles with a Raman Lidar", *Optics Letters*, **15**, 746-748.
33. Uthe, E. E. (1983), "Application of Surface-based and Airborne Lidar Tracking of Fluorescence Tracers for Atmospheric Transport and Diffusion Studies", *Journal of Air Pollution Control Association*, **33**, 1149-1155.
34. Uthe, E. E. (1991), "Elastic Scattering, Fluorescent Scattering, and Differential Absorption Lidar Observations of Atmospheric Tracers", *Optical Engineering*, **30**, 66-71.
35. Congeduti, F., G. Fiocco, A. Adriani, C. Guarrella (1981), "Vertical Wind Velocity Measurements by a Doppler Lidar and Comparisons with a Doppler Sodar", *Applied Optics*, **20**, 2048-2054.
36. Boudle, D. A., J. Rothermel, J. M. Vaughan, and M. J. Post (1991), Aerosol Backscatter Measurements at 10.6 μm with Airborne and Ground Based CO_2 Doppler Lidars over the Colorado High Plains, *Journal of Geophysical Research*, **96**, 5327-5344.
37. Malacara, D. (1977), *Optica*, versión en español de *Optics*, de E. Hecht y A. Zajac, 485-488.

38. Van de Hulst, H. C. (1981), *Light Scattering by Small Particles*, Dover Publications, Inc., New York, 63-100.
39. Mie, G. (1908), "Beiträge zur Optik Trüber Medien, Speziell Kolloidaler Metallösungen" (Una Contribución a la Óptica de Medios Turbios, en Solución de Metal Coloidal Especial), *Ann. Phys.* **25**, 377-445.
40. Van de Hulst, H. C. (1981), *Light Scattering by Small Particles*, Dover Publications, Inc., New York, 3.
41. Svelto, O (1979), *Principles of Lasers*, Plenum Press, New York & London.
42. Bohren, C. F. and D. R. Huffman (1983), *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, John Wiley & Sons, 28.
43. Shettle, E. P., and R. W. Fenn (1979), Models of Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effect of Humidity Variations on their Optical Properties, U. S. Air Force Geophysics Laboratory, TR-79-214, Bedford, Mass.
44. Kovalev, V. A., and W. A. Eichinger (2004), *Elastic Lidar*, Wiley-Interscience, John Wiley and Sons, 34.
45. Bohren, C. F. and D. R. Huffman (1983), *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, John Wiley & Sons, 72.
46. Dietze, G. (1957), *Einführung in die Optik der Atmosphäre* (Introducción a la Óptica de la Atmósfera), Leipzig: Geest & Portis, 194.
47. Born, M., and E. Wolf (1986), *Principles of Optics*, 6th (corrected) Ed., Pergamon Press, 662-633.
48. Bohren, C. F. and D. R. Huffman (1983), *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, John Wiley & Sons, 10.

49. Measures, R. M. (1984), *Laser Remote Sensing, Fundamentals and Applications*, John Wiley and Sons, 240.
50. Jenkins, F. A. and H. E. White (1976), *Fundamentals of Optics*, 4th. Edition, McGraw-Hill.
51. Measures, R. M. (1984), *Laser Remote Sensing, Fundamentals and Applications*, John Wiley and Sons, 243.
52. Inaba, H. (1976), "Detection of Atoms and Molecules by Raman Scattering and Resonance Fluorescence", *Laser Monitoring of the Atmosphere* (E. D. Hinkley, Ed.), Springer-Verlag, 153-236.
53. Menut, L., C. Flamant, J. Pelon, and P. H. Flamant (1999), "Urban Boundary-layer Height Determination from Lidar Measurements over the Paris Area", *Applied Optics*, **38**, 945-954.
54. Faye, G., J. Kasparian, and R. Sauerbrey (2001), "Modifications to the Lidar Equation Due to Nonlinear Propagation in Air", *Applied Physics B*, **73**, 157-163.
55. Castrejón-García, R., J. R. Varela, J. R. Castrejón-Pita, and A. Morales (2002), "The Laser Backscattering Equations and their Application to the Study of the Atmospheric Structure", *Revista Mexicana de Física*, **48**, 513-518.
56. Castrejón-García, R. y M. Muriel-García (1995), *Ing. Química*, Septiembre, España, 137-142.
57. Castrejón-García, R., A. Aguilar-Soto y M. Ley-Koo (1996), *Contaminación Ambiental* (L. García-Colín y J. R. Varela-Ham, Editores), 1a. Ed., El Colegio Nacional, ISBN 970-640-045-1, 78-100.
58. Castrejón-García, R. y M. Muriel-García (1996), "Las Técnicas de Detección Remota con Láser y su Aplicación en el Estudio de Contaminantes en la Atmósfera", *Ciencia*, **47**, 205-214.

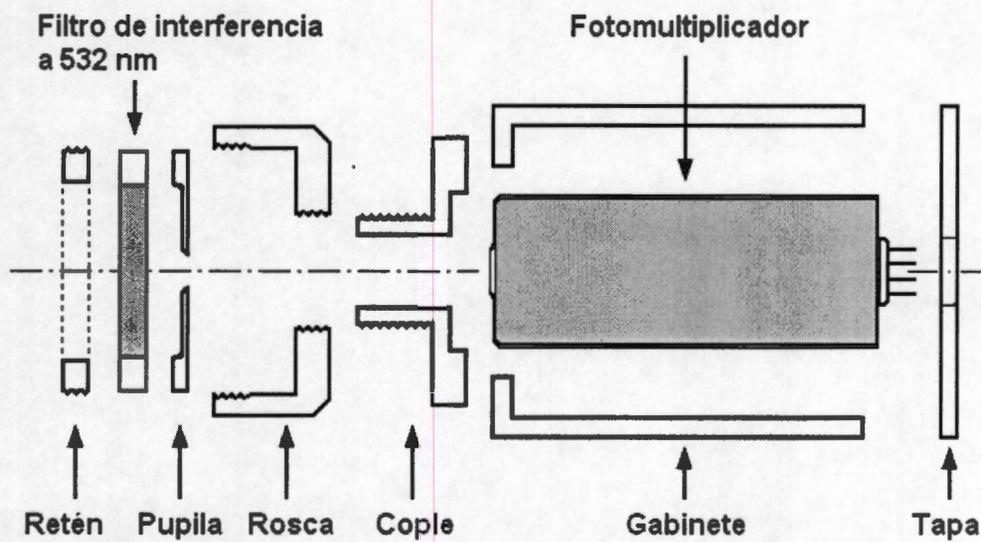
59. Killinger, D., and N. Menyuk (1981), "Remote Probing of the Atmosphere using a CO₂ DIAL System", *IEEE J. Quantum Electronics*, **9**, 1917-1929.
60. Pelon, J., and G. Megie (1982), "Ozone Monitoring of the Troposphere and Lower Atmosphere", *J. Geophys. Res.*, Vol. 87, 4947-4955.
61. Werner, J., K. W. Rothe, and H. Walther (1983), "Monitoring of the Stratospheric Ozone Layer by Laser Radar", *Appl. Phys. B*, Vol. 32, **3**, 113-118.
62. Corio, W., S. Draghi, A. Ferrario, M. Garbi, E. Zanzottera, G. Bocchiola, and A. Marzorati (1985), "Laser Remote Sensing of Gases", Technical Report, Centro Informazione Studi Esperienze, Milano, Italia.
63. Collis, R. T. H. and P. B. Russell (1976), "Lidar Measurements of Particles and Gases by Elastic Backscattering and Differential Absorption", *Laser Monitoring of the Atmosphere* (E. D. Hinkley, Ed.), Springer-Verlag, 105.
64. Brassington, D. J. (1981), "Sulphur Dioxide Absorption Cross Section Measurements from 290 nm to 713 nm", *Appl. Optics*, **20**, 3774.
65. Castrejón-García, R., J. R. Varela, A. A. Castrejón –Pita y J. R. Castrejón-Pita (2006), "Development and evaluation of an alternative method for processing elastic-lidar return signals", *International Journal of Modern Physics B*, **20**, **2**, 141-150.
66. Continuum (1999), Nd:YAG Surelite Laser, Operation and Maintenance Manual, Continuum, CA, U. S. A.
67. Hudson, R. D. (1969), *Infrared System Engineering*, John Wiley & Sons, 115.
68. Bertone, N., and P. Webb (1996), Noise and Stability in PIN Detectors, EG&G Optoelectronics Canada.
69. Burle Technologies Inc. (1990), "Photomultipliers", PA, USA

70. Philips Components (2000), *Photomultipliers Data Handbook*, The Netherlands.
71. Hamamatsu (2002), *Photosensor Modules*, Vol. 1E.
72. Melles Griot (2002), *Interference Filter*, Application Note No. 03FIV311.
73. Femto Messtechnik GmbH (2002), *Femto Amplifier Overview*, Berlín, Alemania.
74. Driscoll, W. G. and W. Vaughan, Editors (1980), *Handbook of Optics*, McGraw-Hill Book Co., 4.21-4.30
75. Hamamatsu (2003), *Final Test Sheet Type H6780-01*.
76. Cornejo-Rodríguez, A. (2001), Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Comunicación personal.
77. Driscoll, W. G. and W. Vaughan, Editors (1980), *Handbook of Optics*, McGraw-Hill Book Co., 7.148, 8.92.
78. Laud, B. B. (1985), *Laser and Non-linear Optics*, Halsted Press, John Wiley & Sons, 165-174.
79. National Instruments (2004), *NI Developer Suite, Software and Hardware Manuals*, National Instruments Corp.
80. Castrejón-García, R., W. Arenas-Martínez y J. R. Calderón-Cruz (2005), "Proceso de Señales Lidar", Derecho de Autor No. 03-2005-030111233300-01, Instituto Nacional del Derecho de Autor.
81. Jacobson, M. Z. (1999), *Fundamentals of Atmospheric Modeling*, Cambridge University Press, 25-26.
82. Brimblecombe, P. (1986), *Air, Composition and Chemistry*, 1st. Edition, Cambridge University Press, 2-12.

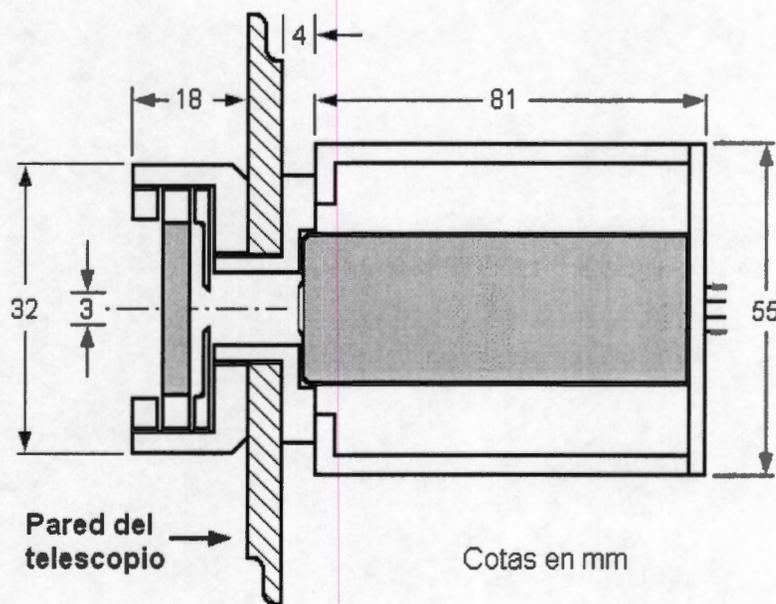
83. Castrejón-García, R. y J. R. Varela (2007), "Diseño y pruebas de un lidar de dispersión elástica", *Memorias del VI Simposio de Contaminación Atmosférica*, El Colegio Nacional y la Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, 211-217.
84. Castrejón-García, R., J. R. Varela, A. Morales Mori, A. A. Castrejón-Pita y J. R. Castrejón-Pita (2005), "Método para interpretar señales de un lidar de dispersión elástica", XLVIII Congreso Nacional de Física, Guadalajara, Jal., Sesión 2SE7.

11

ANEXOS



(a)



(b)

Figura A2. Detalle del alojamiento del fotomultiplicador. (a) vista sin ensamblar; (b) vista ensamblado y acoplado a la pared del tubo del telescopio.

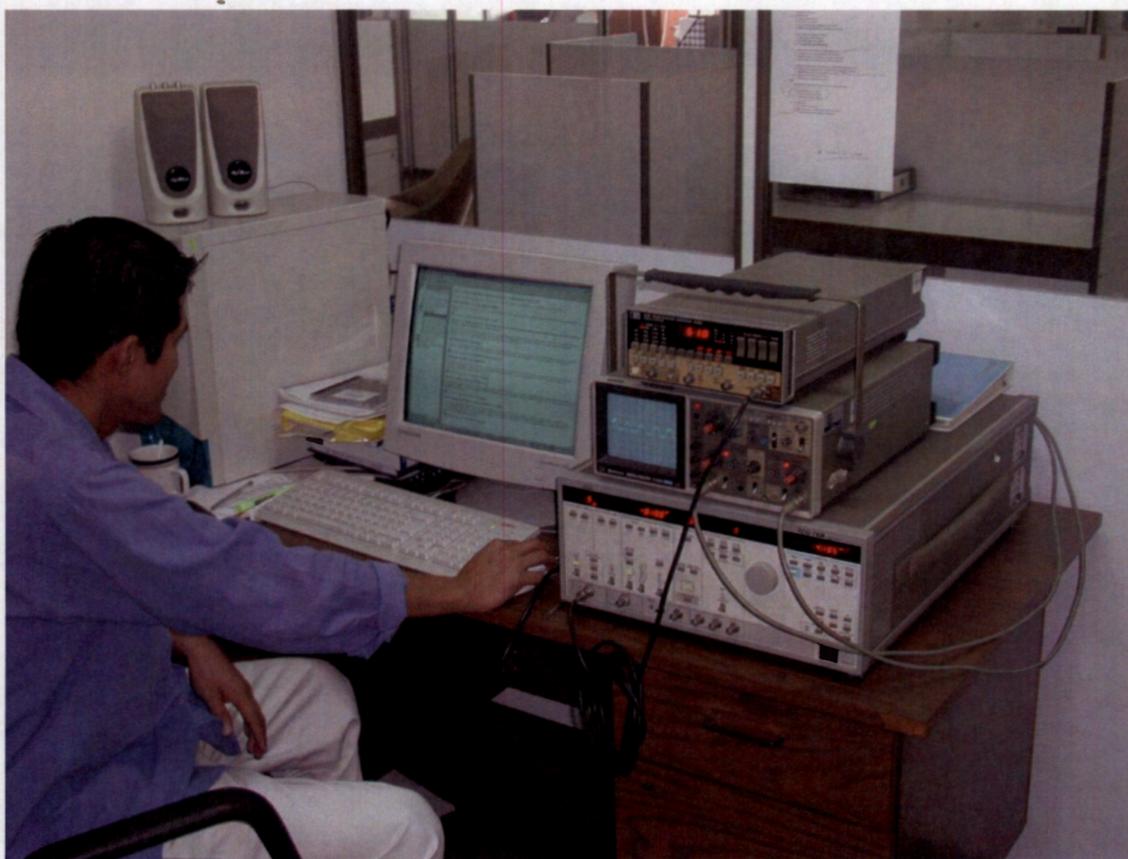
11.B. Fotografías del Sistema.



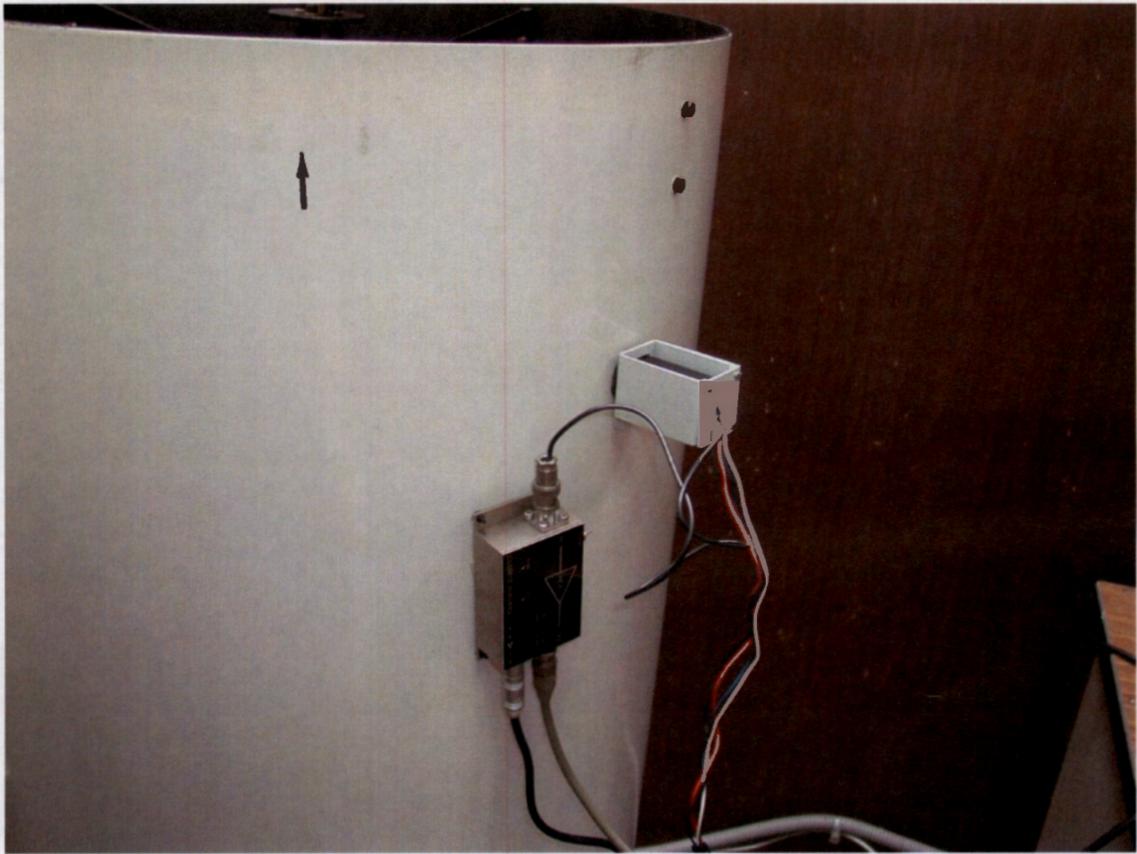
Fotografía B1. Vista general del sistema Lidar.



Fotografía B2. Vista de la parte superior del telescopio.



Fotografía B3. Aspecto del sistema de adquisición y digitalización.



Fotografía B4. Vista del fotomultiplicador y amplificador de transimpedancia.