

Un proyecto de:



**EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE
CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA
EN LAS ZONAS URBANAS DEL
VALLE DE ABURRÁ**

**Convenio de
Asociación No. 243 de
2012**

Informe Final
julio de 2013



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN
LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Convenio de Asociación No. 243 de 2012
EVALUAR Y MONITOREAR LA CALIDAD DEL AIRE EN EL VALLE DE ABURRÁ

UN PROYECTO DE:

ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ
Carlos Mario Montoya Serna. Med. MSc.
Director

Gloria Amparo Alzate Agudelo I.C. MSc.
Subdirector Ambiental

Universidad Nacional de Colombia
GRUPO DE INVESTIGACIÓN LASERES Y ESPECTROSCOPIA ÓPTICA - GLEO
CENTRO DE INVESTIGACIONES DEL CLIMA DE COLOMBIA (CICLICO)

EQUIPO DE TRABAJO:

*Director: **ÁLVARO E. BASTIDAS GUSTIN, Ph.D***
*Codirector: **CARLOS DAVID HOYOS ORTIZ, Ph.D***
*Otros Investigadores: **CARMEN ELENA ZAPATA SÁNCHEZ, MSc.***

INTERVENTORÍA

Mauricio Correa Ochoa I.S. Msc.
Grupo de Ingeniería y Gestión Ambiental, GIGA
Universidad de Antioquia

COORDINACIÓN

Gloria Estela Ramírez Casas I.Q. Msc.
Profesional Universitaria
Área Metropolitana del Valle de Aburrá



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN 1

1 OBJETIVOS 3

1.1 OBJETIVO GENERAL 3

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS 3

2 ESTACIÓN LIDAR – UNAL 4

2.1 CONFIGURACIÓN GENERAL DEL SISTEMA 4

2.2 OPTIMIZACIÓN DE OPERATIVIDAD DEL SISTEMA LIDAR 7

2.3 RESOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL 10

2.4 ANÁLISIS DE SEÑALES LIDAR E IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS MATEMÁTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPA DE MEZCLA Y LA ESTRATIFICACIÓN DE LA BAJA TROPOSFERA... 12

2.5 PROCESO DE INCLUSIÓN Y RECONOCIMIENTO DEL SISTEMA LIDAR-UNAL COMO ESTACIÓN CONTRIBUTIVA DEL GLOBAL ATMOSPHERE WATCH PROGRAMME-GAW Y DEL WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION-WMO 14

2.6 REPORTE DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN SEGÚN EL MARCO DEL CONVENIO CA 243 DE 2012 15

2.6.1 *Estimación de la Capa de Mezcla Atmosférica y Subcapas de Aerosoles..... 15*

2.6.2 *Registros Preliminares de Distribución de Tamaños de Aerosoles 25*

2.6.3 *Perfiles del coeficiente de extinción atmosférico..... 30*

2.6.4 *Perfiles de espesores ópticos - AOT..... 32*

2.6.5 *Perfiles de humedad relativa..... 34*

2.6.6 *Perfiles de temperatura..... 36*

2.6.7 *Perfiles de la velocidad horizontal del viento 38*

3 ESPECTRO- RADIOMÉTRO 41

3.1 CONFIGURACIÓN GENERAL DEL SISTEMA..... 41

3.2 OPTIMIZACIÓN DE OPERATIVIDAD DEL ESPECTRO-RADIÓMETRO 43

3.3 ESTADO ACTUAL..... 43

4 IMPACTADOR DE PARTICULAS 44



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

4.1	IMPACTADOR DE PARTICULAS	44
4.2	CONFIGURACIÓN GENERAL DEL SISTEMA.....	44
4.3	ESTADO ACTUAL.....	46
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	47
6	ANEXO I.....	57
6.1	COMPARACIÓN DE MEDIDAS LIDAR-UNAL CON LIDAR SATELITAL CALIPSO (CALIOP).....	57
6.2	PERFILES DE HUMEDAD RELATIVA.....	61
6.3	PERFILES DE TEMPERATURA.....	64
6.4	PERFILES DE PRESIÓN	67
6.5	ANÁLISIS Y CONCLUSIONES.....	69
7	BIBLIOGRAFÍA.....	70

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN
LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Configuración de la óptica para la detección simultánea a 532nm y 355nm.	4
Figura 2.2. Panel de control del sistema LIDAR. Control digital de ganancias de PMT's, temperatura, alto voltaje y potencia óptica del láser.....	5
Figura 2.3. Fotografías del Sistema LIDAR-UNAL, operando a dos longitudes de onda: 532 nm, (Aerosoles), y 355 nm, (especies moleculares), en forma simultánea en virtud de la instalación de un segundo sistema de registro LICEL y el panel de control diseñado en GLEO..	6
Figura 2.4. Estabilidad del sistema LIDAR-UNAL. Izquierda: Energía promedio del láser en función del tiempo; Derecha: Potencia promedio del láser en función del tiempo.....	7
Figura 2.5. Espectros de reflectancia del espejo primario del telescopio Newtoniano. Izquierda: Reflectancia en el espectro visible; Izquierda: Reflectancia en el espectro ultravioleta	8
Figura 2.6. Primeros registros LIDAR a 532nm y 355nm.....	9
Figura 2.7. Registro de Nubes a 1789 m y 9580 m sobre Medellín. Registro LIDAR a 532nm el 23/02/2013.....	10
Figura 2.8. Perfil LIDAR a 532nm. La secuencia muestra la recuperación de señal LIDAR hasta los 10000 metros de altura sobre el sistema.	11
Figura 2.9. Estratificación vertical de la concentración de partículas y altura de sistemas nubosos, obtenidos en forma automática mediante algoritmo desarrollado por GLEO con base en el uso iterativo de las funciones de Haar combinadas con la primera derivada de funciones Gaussianas.	12
Figura 2.10. Estandarización de la operatividad el sistema LIDAR: Apartes del comunicado oficial donde se reconocen las estaciones LIDAR de la Red Latino-Americana de Lidar, ALINE, como contribuyentes al World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch Programme. La estación LIDAR- UNAL forma parte activa de ALINE.	14
Figura 2.11. Capa de Mezcla, días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013	16
Figura 2.12. Diagrama de concentraciones de partículas en código de colores y perfiles de concentración característicos.....	188



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 2.13. Perfil LIDAR de acumulación de partículas dentro de la capa límite..... 20

Figura 2.14. Porcentaje de concentración de partículas en la vertical sobre Medellín. Diagramas obtenidos de datos LIDAR, acompañados con datos meteorológicos de la estación 203-UNAL-SEDE AGRONOMÍA de SIATA, procesados mediante algoritmos exclusivos para el tema de estudio. 21

Figura 2.15. Diagramas de porcentajes de concentraciones de partículas. Naranja: día sin carro en Medellín; Dark Cian: seis días antes del día sin carro; Azul: ocho días después del día sin carro..... 24

Figura 2.16. Distribución del número de partículas en función del diámetro..... 30

Figura 2.17. Distribución granulométrica del material particulado atmosférico en función del número de partículas, la superficie y la masa (según Dr. H. C. Hasson).....30

Figura 2.18. Distribución de tamaño de partícula de Aerosol de los días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013..... 28

Figura 2.19. Perfiles de extinción LIDAR de los días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013. 30

Figura 2.20. Perfiles de espesor óptico de aerosoles de los días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013. 32

Figura 2.21. Humedad relativa días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013..... 34

Figura 2.22. Perfiles de Temperatura de los días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013..... 36

Figura 2.23. Velocidad horizontal del viento, en los días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013. 39

Figura 3.1. Configuración del espectro-radiómetro 41

Figura 3.2. Diagrama del sistema de control asociado al registro de espectros..... 41

Figura 3.3. Ilustración de la configuración óptica del espectro-radiómetro..... 42

Figura 3.4. Izquierda: tarjeta de control; Derecha: tarjeta acoplada al sistema opto-mecánico 42



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 3.5. Registros espectrales en el rango de 250 a 758 nanómetros: Izquierda - Espectro de una lámpara de filamento o incandescente, (tungsteno). Derecha - espectro de una lámpara de descarga en gas de Nitrógeno..... 43

Figura 4.1. Izquierda: Configuración del Impactor de Partículas; Derecha: Fotografía del Impactor de Partículas..... 44

Figura 4.2. Arriba: Componentes principales en las etapas del colector de partículas; Abajo: Muestra de primeros ensayos de recolección de partículas..... 45

Figura 4.3. Impactor de Partículas GLEO operando simultáneamente con Estación PM2.5 Bloque 19-A Universidad nacional.....45

Figura 5.1. Señal Lidar Raw a 532nm..... 458

Figura 5.2. Señal Lidar Libre de Ruidos..... 459

Figura 5.3. Señal Lidar Corregida en Rango..... 50

Figura 5.4. Logaritmo Natural de la Señal Lidar Corregida en Rango51

Figura A.1. Sistema satelital “A-Train” de la NASA.....58

Figura A.2. Trayectorias diurnas de CALIPSO58

Figura A.3. Trayectoria diurna de CALIPSO sobre el territorio Colombiano59

Figura A.4. Trayectoria diurna de CALIPSO sobre el Valle de Aburrá60

Figura A.6.1.Humedad relativa días 28 de Mayo, 13 de Junio, 15 de Julio y 31 de Julio de 2013.....61

Figura A.6.2. Perfiles de Temperatura de los días 28 de Mayo, 13 de Junio, 15 de Julio y 31 de Julio de 2013.....64

Figura A.6.3. Perfiles de Presión de los días 28 de Mayo, 13 de Junio, 15 de Julio y 31 de Julio de 2013.....67



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN
LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

INTRODUCCIÓN

El sistema de Sensado Remoto Atmosférico LIDAR de la Universidad Nacional Sede Medellín, LIDAR-UNAL, ha entrado en operación desde el 20 de Diciembre de 2012, con capacidad de enviar hacia la atmosfera tres rayos láser en forma simultánea:

- Rayo láser Infrarrojo de 1064 nanómetros de longitud de onda.
- Rayo láser verde de 532 nanómetros de longitud de onda.
- Rayo láser ultravioleta de 355 nanómetros de longitud de onda.

Luego de un periodo prudente de pruebas, ajustes, y calibraciones, realizadas en el mes de Diciembre del 2012, el sistema LIDAR-UNAL se encuentra disponible para realizar tareas de exploración y monitoreo de las primeras capas de atmósfera en la ciudad de Medellín, (baja Troposfera), proporcionando información directa del coeficiente de extinción atmosférica, la distribución de tamaño de partículas suspendidas en la atmósfera, altura de la capa límite, PBL, concentración de partículas discriminadas en altura. Además, como productos derivados de estos, a futuro se podrán obtener perfiles de temperatura, presión, humedad relativa, vapor de agua, agua líquida, especies químicas, y velocidad del viento en columna de atmosfera.

El primer tema de investigación respecto a la atmosfera del Valle de Aburrá se centra en la identificación de las primeras capas cercanas a la superficie terrestre y su comportamiento en el tiempo, en función de la concentración y los tamaños de las partículas suspendidas en el aire, hasta la frontera con la atmosfera libre o PBL. Para este objetivo se vienen implementando los algoritmos matemáticos de evaluación y derivación de parámetros que permitan discriminar capas atmosféricas por tamaño y concentración de partículas.

Tal como se han venido presentando en los informes parciales, y gracias al trabajo de rediseño, implementación tecnológica, desarrollo y estandarización de protocolos, algoritmos matemáticos propios para el análisis de resultados del sondeo lidar en Medellín, los resultados actuales de estratificación de partículas, los perfiles de densidad del aire, las



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

concentraciones, y los estimativos de las alturas de capa rugosa, capa de mezcla, capa mezclada y capa límite, se obtienen de forma automática y en tiempo real.

Sin embargo, el GLEO continúa con el trabajo de articulación de las mediciones lidar con otros equipos y técnicas que paralelamente se vienen implementando en el laboratorio: Espectroradiómetro, Impactor de partículas con análisis espectrofotométrico, fotometría solar, y decodificación, análisis, e interpretación de datos satelitales relacionados. Es importante resaltar la disponibilidad de equipos estándar instalados junto a la estación LIDAR-UNAL, por parte de la institución de Sistema de Alerta Temprana – SIATA y del Laboratorio de Calidad del Aire – CALAIRE de la Facultad de Minas, Universidad Nacional, que proporcionan la información complementaria del comportamiento de variables meteorológicas y de calidad del aire.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

1 OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Presentar los avances del trabajo realizado hasta el momento de los equipos de sensado remoto activos y pasivos, utilizados para el monitoreo de la calidad del aire en la zona urbana de Medellín.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Controlar y estabilizar las variables involucradas en la operatividad de la estación LIDAR-UNAL: potencia del láser, temperatura de estabilización y ganancia de foto-detectores.
- Optimizar el sistema LIDAR-UNAL para su operatividad regulada a tres longitudes de onda de forma simultánea.
- Desarrollar algoritmos matemáticos para la determinación de valores de variables de densidad atmosférica a partir de mediciones LIDAR.
- Realizar el reporte de los productos de investigación según el Convenio CA 243 de 2012.
- Definir la métrica de medidas espectrales y calibración general del espectrorradiómetro.
- Colimar la luz solar para direccionarla hacia el espectrorradiómetro.
- Diseñar y acoplar el impactor de aerosoles de tres etapas para recolección de partículas con tamaños 2,5micras: adecuar del sistema de vacío, adaptar el sistema de switch eléctrico, acoplar el manómetro, adaptar un fluxómetro de masa.
- Desarrollar el protocolo de análisis de los filtros recolectores de partículas PM2.5 con esfera integrante y espectrofotómetro.
- Implementar un método de medida espectrométrica de los filtros contenedores de partículas, con base en el método de esfera óptica integradora.

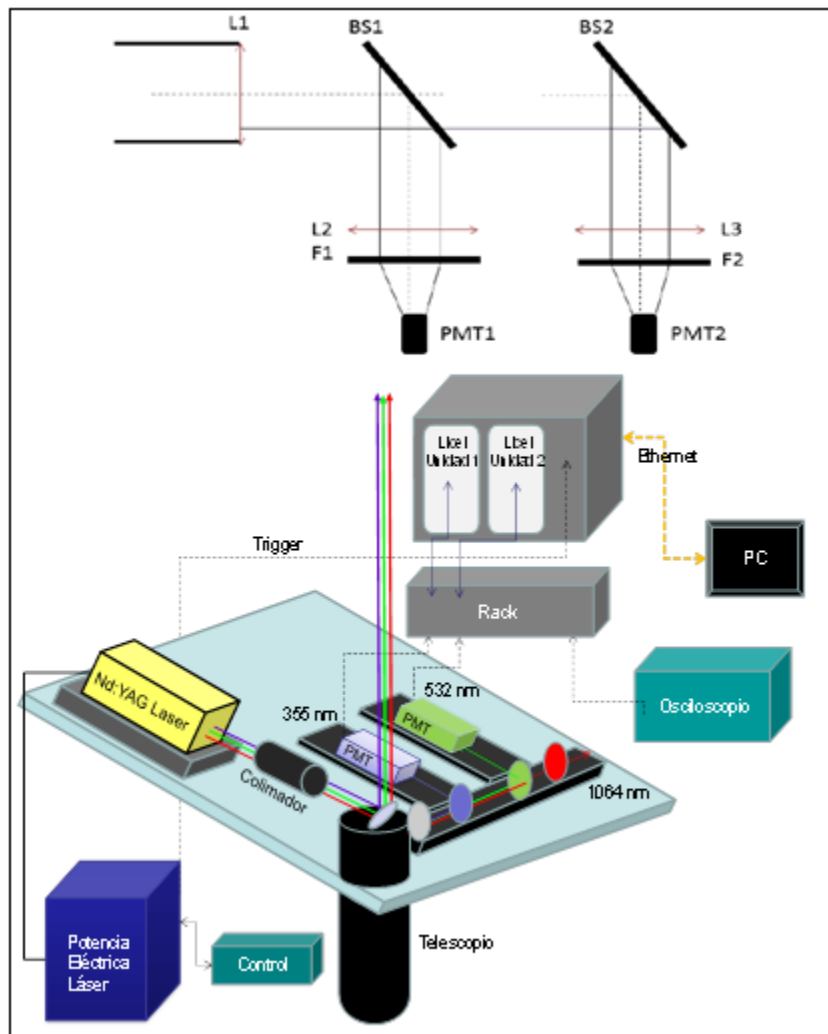
EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

2 ESTACIÓN LIDAR – UNAL

2.1 CONFIGURACIÓN GENERAL DEL SISTEMA

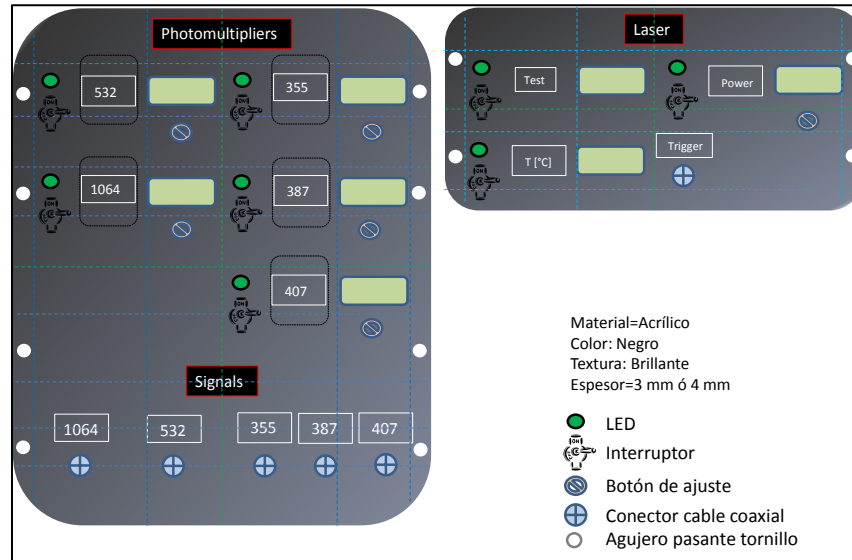
Rediseño del sistema LIDAR-UNAL e implementación de dos sondas de luz láser: 532nm y 355nm para realizar estudios de la calidad del aire en Medellín.

Figura 2.1 Configuración de la óptica para la detección simultánea a 532nm y 355nm.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 2.2. Panel de control del sistema LIDAR. Control digital de ganancias de PMT's, temperatura, alto voltaje y potencia óptica del láser

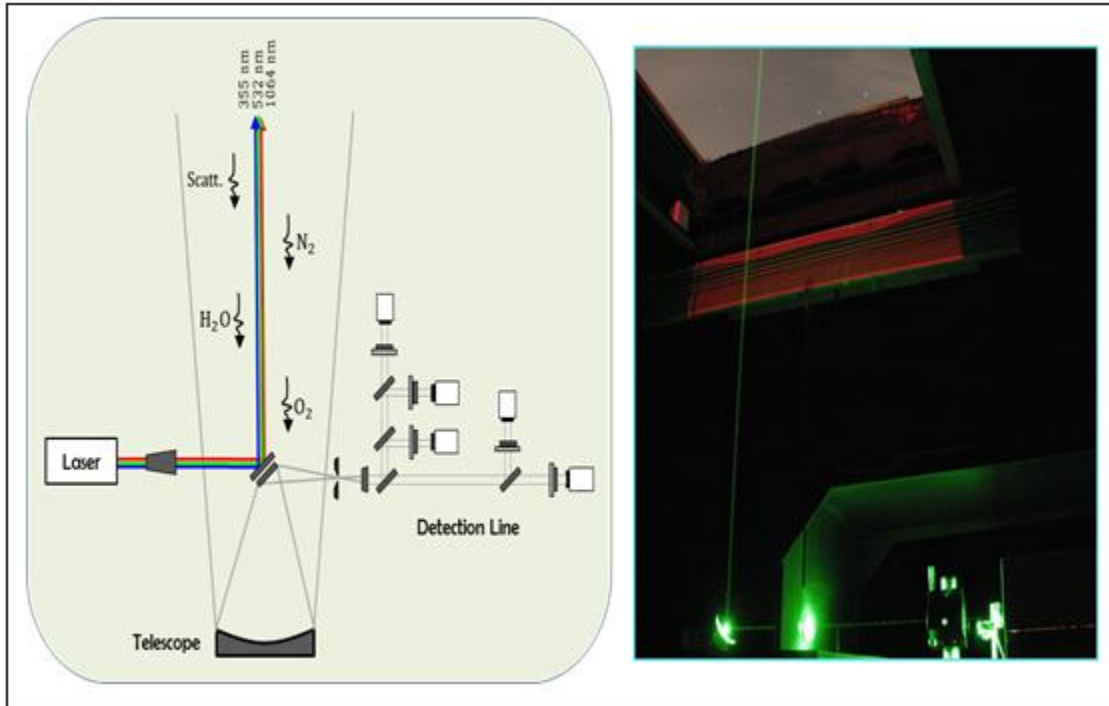


**EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN
LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ**

Figura 2.3. Fotografías del Sistema LIDAR-UNAL, operando a dos longitudes de onda: 532 nm, (Aerosoles), y 355 nm, (especies moleculares), en forma simultánea en virtud de la instalación de un segundo sistema de registro LICEL y el panel de control diseñado en GLEO

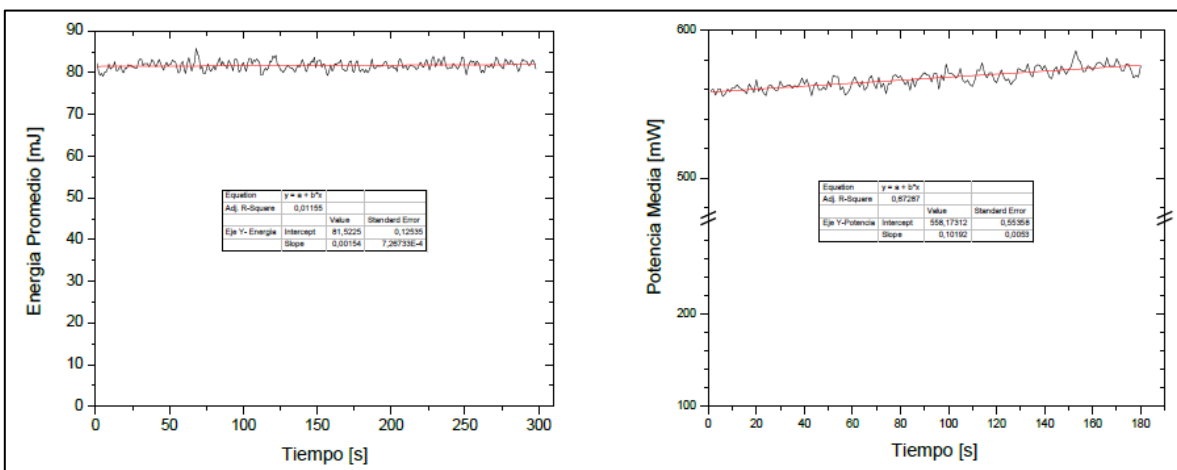


EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



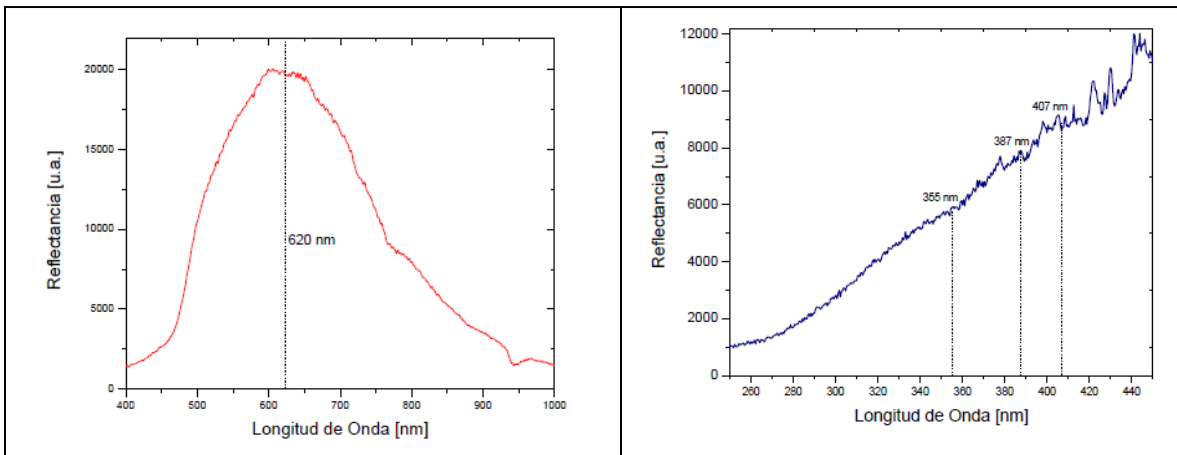
2.2 OPTIMIZACIÓN DE OPERATIVIDAD DEL SISTEMA LIDAR

Figura 2.4. Estabilidad del sistema LIDAR-UNAL. Izquierda: Energía promedio del láser en función del tiempo; Derecha: Potencia promedio del láser en función del tiempo



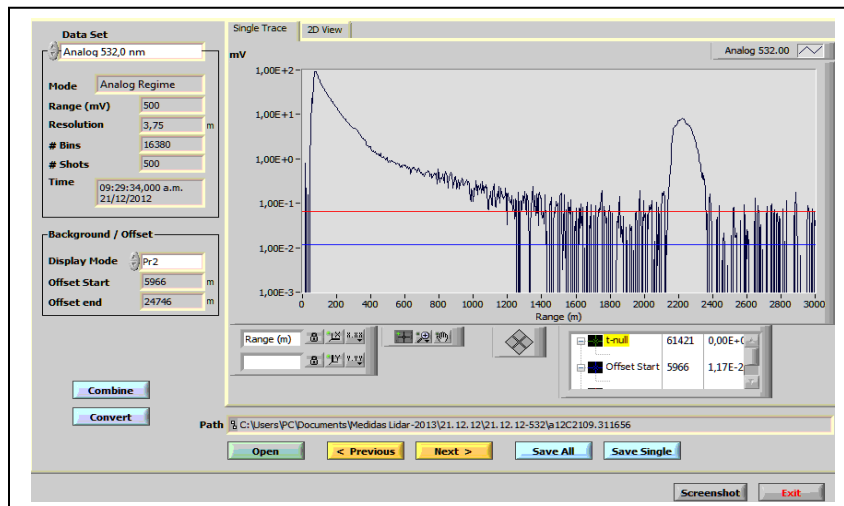
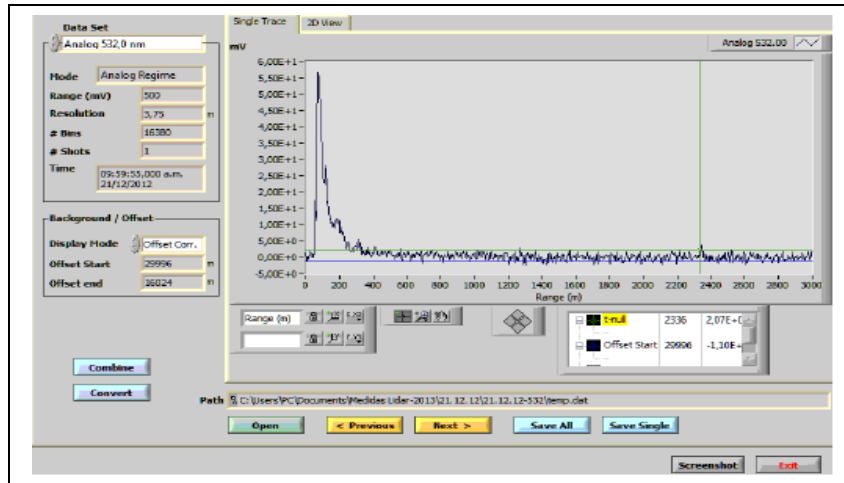
EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 2.5. Espectros de reflectancia del espejo primario del telescopio Newtoniano. Izquierda: Reflectancia en el espectro visible; Izquierda: Reflectancia en el espectro ultravioleta

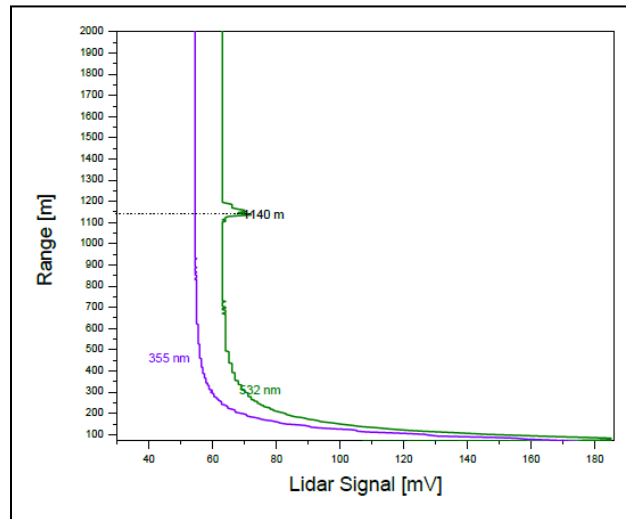


EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 2.6. Primeros registros LIDAR a 532nm y 355nm



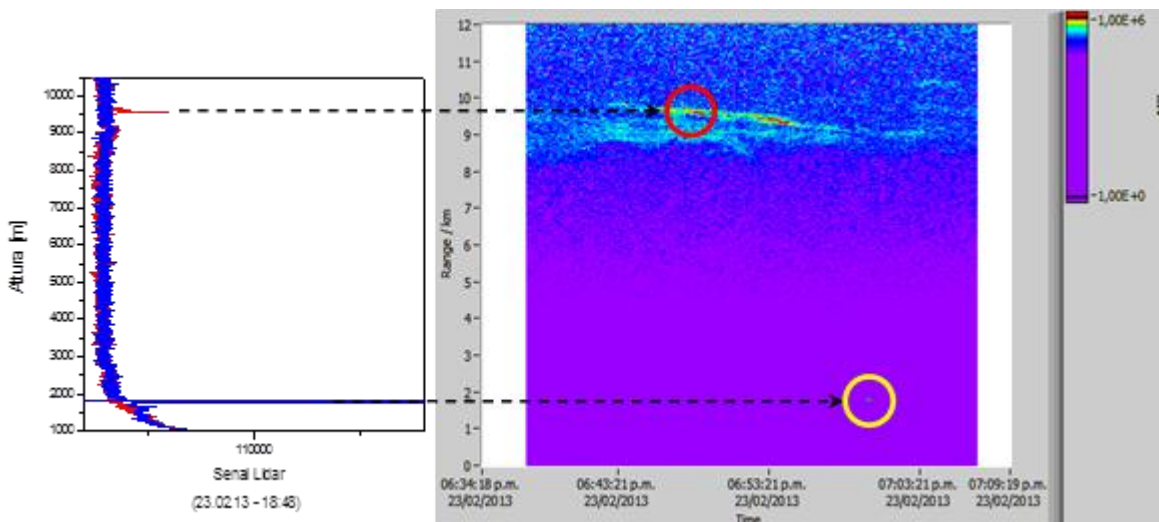
EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



2.3 RESOLUCIÓN ESPACIAL Y TEMPORAL

Monitoreo con sistema LIDAR de la atmósfera en Medellín cubriendo alturas en vertical de hasta 10000 metros sobre la estación y desarrollo de metodología para el registro paralelo de datos meteorológicos suministrados por la estación 203-UNAL-SEDE AGRONOMÍA de SIATA:

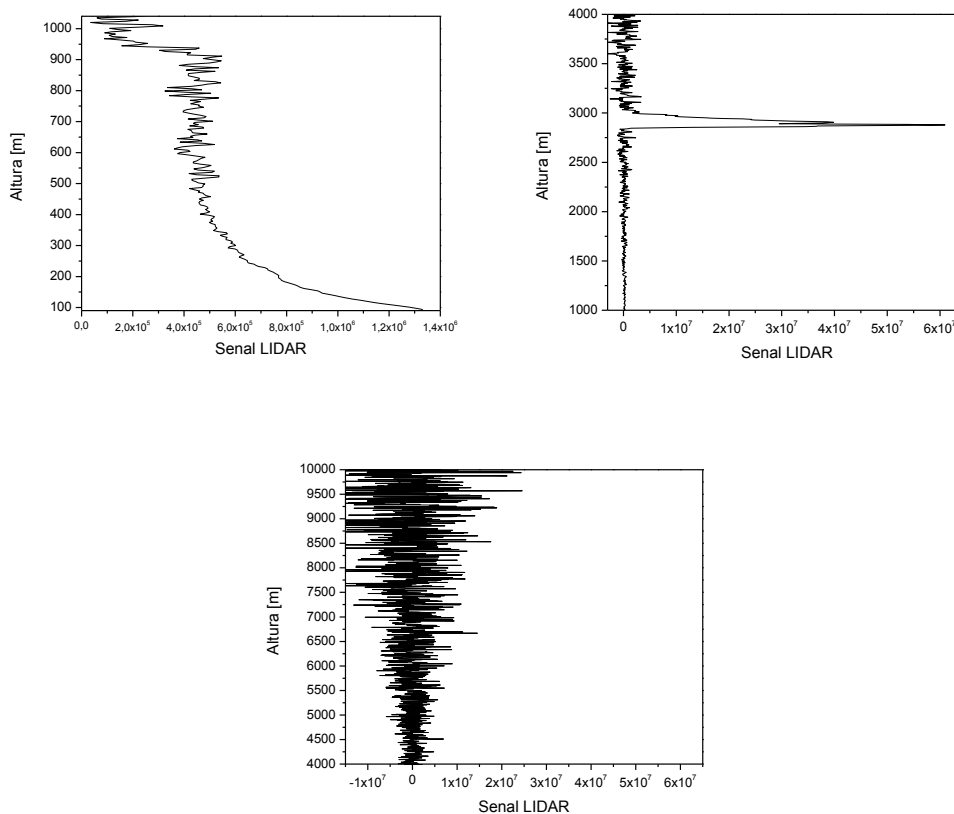
Figura 2.7. Registro de Nubes a 1789 m y 9580 m sobre Medellín. Registro LIDAR a 532nm el 23/02/2013.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Registros de perfiles atmosféricos con LIDAR. Avances en la implementación de algoritmos para la estratificación de la baja tropósfera a partir de datos LIDAR. Proceso de optimización y estandarización de la operatividad el sistema LIDAR:

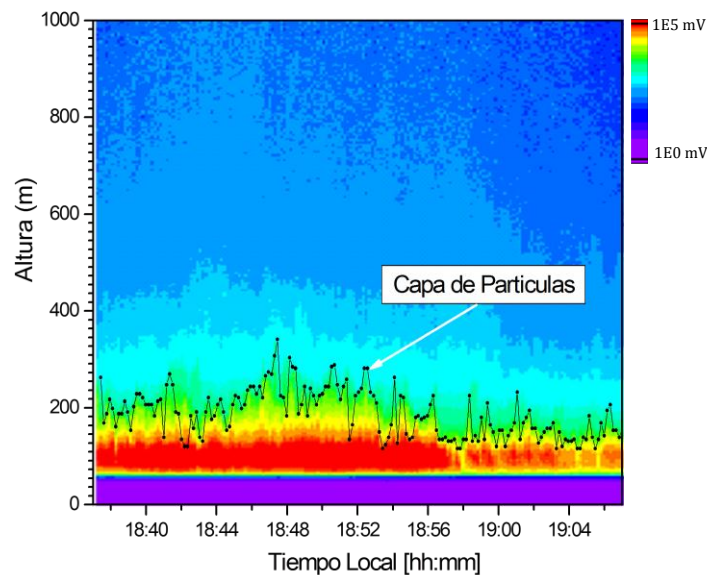
Figura 2.8. Perfil LIDAR a 532nm. La secuencia muestra la recuperación de señal LIDAR hasta los 10000 metros de altura sobre el sistema.



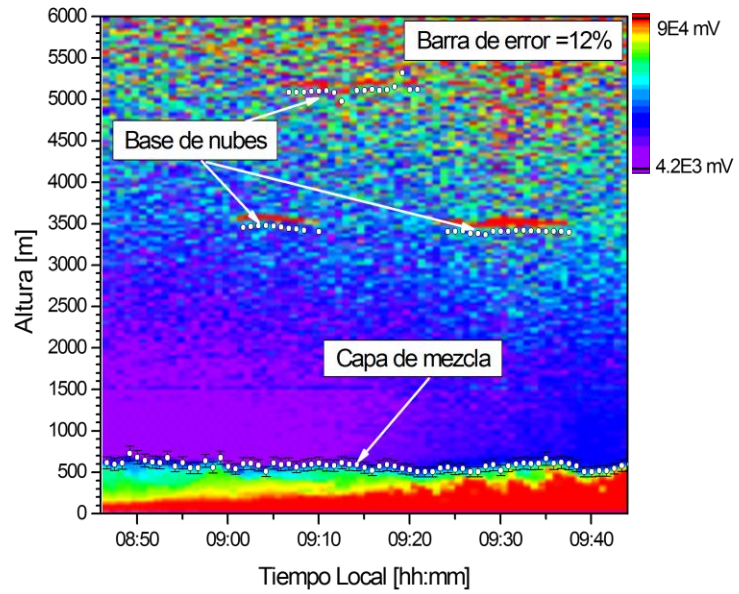
EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

2.4 ANÁLISIS DE SEÑALES LIDAR E IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS MATEMÁTICOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA CAPA DE MEZCLA Y LA ESTRATIFICACIÓN DE LA BAJA TROPOSFERA

Figura 2.9. Estratificación vertical de la concentración de partículas y altura de sistemas nubosos, obtenidos en forma automática mediante algoritmo desarrollado por GLEO con base en el uso iterativo de las funciones de Haar combinadas con la primera derivada de funciones Gaussianas.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN
LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

2.5 PROCESO DE INCLUSIÓN Y RECONOCIMIENTO DEL SISTEMA LIDAR-UNAL COMO ESTACIÓN CONTRIBUTIVA DEL GLOBAL ATMOSPHERE WATCH PROGRAMME-GAW Y DEL WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION-WMO

Figura 2.10. Estandarización de la operatividad el sistema LIDAR: Apartes del comunicado oficial donde se reconocen las estaciones LIDAR de la Red Latino-Americana de Lidar, ALINE, como contribuyentes al World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch Programme. La estación LIDAR-UNAL participa también de la red ALINE.

LETTER OF AGREEMENT

between

Latin America Lidar Network
- hereinafter referred to as "ALINE" -

and

World Meteorological Organization
Global Atmosphere Watch Programme
- hereinafter referred to as "WMO/GAW" -

- hereinafter jointly referred to as the "Parties" -


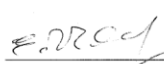
related to

**the recognition of ALINE as a contributing network
for the World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch Programme**

List of stations

Site	Latitude/Longitude (degrees)	Altitude a.s.l. (m)	station GAW status
Buenos Aires, Argentina ¹	34.555269 S, 58.50615 W	20	Regional
Bariloche, Argentina ²	41.14730 S, 71.16398 W	842	contributing
Comodoro Rivadavia, Argentina	43.23601 S, 65.32659 W	58	contributing
La Paz, Bolivia	16.538 S, 68.068 W	3420	contributing
Manaus, Brazil	2.891 S, 59.970 W	100	contributing
São Paulo, Brazil	23.4608 S, 46.2345 E	740	contributing
Concepcion, Chile	36.84 S, 73.02 W	170	contributing
Medellín, Colombia	6.1355 N, 75.3405 W	1538	contributing

¹GAW Buenos Aires and Observatorio are the same stations
²La Paz and Chacaltaya GAW stations are not the same stations.

Signature:  Signature: 

Date: 26/3/2013 Date: 02/04/2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN
LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

2.6 REPORTE DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN SEGÚN EL MARCO DEL CONVENIO CA 243 DE 2012

Todos los perfiles que se reportan a continuación fueron logrados a través de una Campaña de mediciones Lidar realizada en los meses de Enero a Marzo de 2013. Cada reporte de las variables de interés se obtuvo a partir de un muestreo consecutivo de tres periodos por día, con un registro estadístico de 500 perfiles atmosféricos por escena.

El desarrollo de la campaña: *“Monitoreo Lidar de la baja Troposfera de Medellín”*, se realizó de acuerdo al siguiente cronograma y protocolo:

Cronograma																						
ENERO	2	3	4	8	9	10	11	12	14	15	16	17	18	21	22	23	24	25	28	29	30	31
FEBRERO	1	4	5	6	7	8	11	12	13	14	15	18	19	20	21	22	25	26	27	28		
MARZO	1	4	5	6	7	8	11	12	13	14	15	18	19	20	21	22	26	27				
	Días medidos																					
Número total de pulsos LIDAR utilizados: 900600																						
Tiempo total de medición: 25.02 h																						

Protocolo diario de mediciones LIDAR

Hora	Longitud de Onda λ [nm]	Modo	Prom/Perfiles	Resol. Esp. [m]	Resol. Temp. [s]	Ganancia PMT	Muestreo
08:30 - 10:00	532	Análogo	500	3.75	2.5×10^{-8}	10^6	40 MHz
13:30 - 15:30							
16:30 - 18:30							

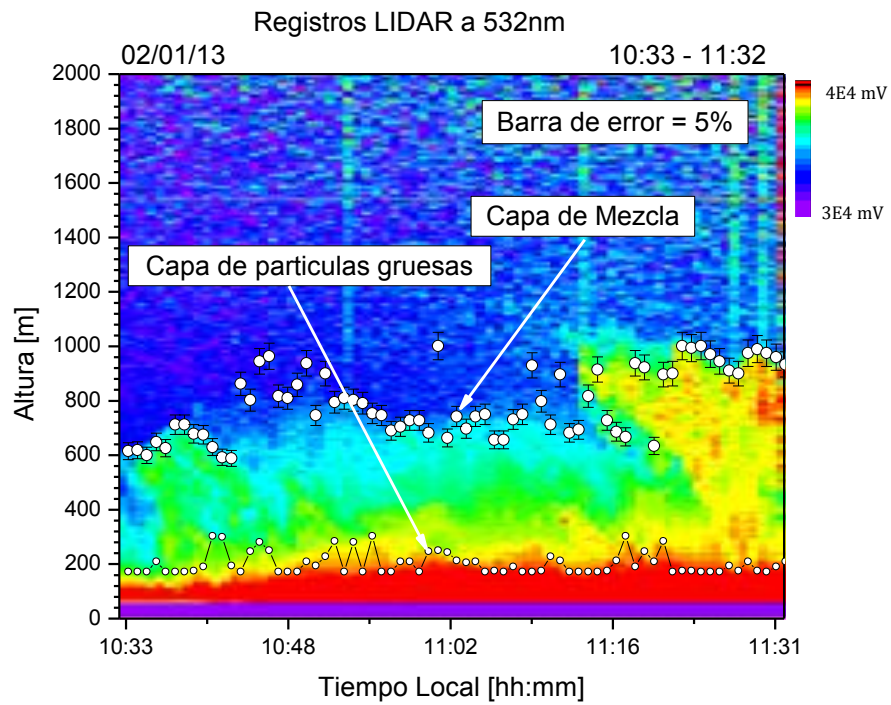
Los días de realización de medidas, estuvieron sujetos a favorables condiciones climáticas y ausencia de lluvias. En este contexto los escasos resultados logrados, permiten reportar únicamente los resultados preliminares de la mencionada Campaña.

2.6.1 Estimación de la Capa de Mezcla Atmosférica y Subcapas de Aerosoles

Las alturas reportadas en los gráficos y perfiles son reportadas sobre la estación LIDAR-UNAL. Los perfiles a continuación tienen una resolución de 3.75 m.

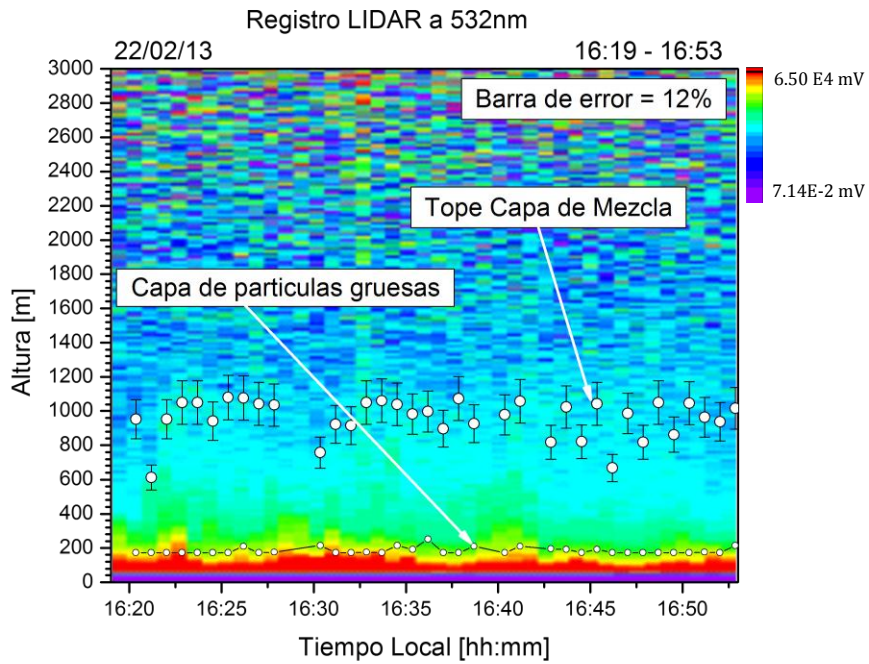
EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 2.11. Capa de Mezcla, días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013

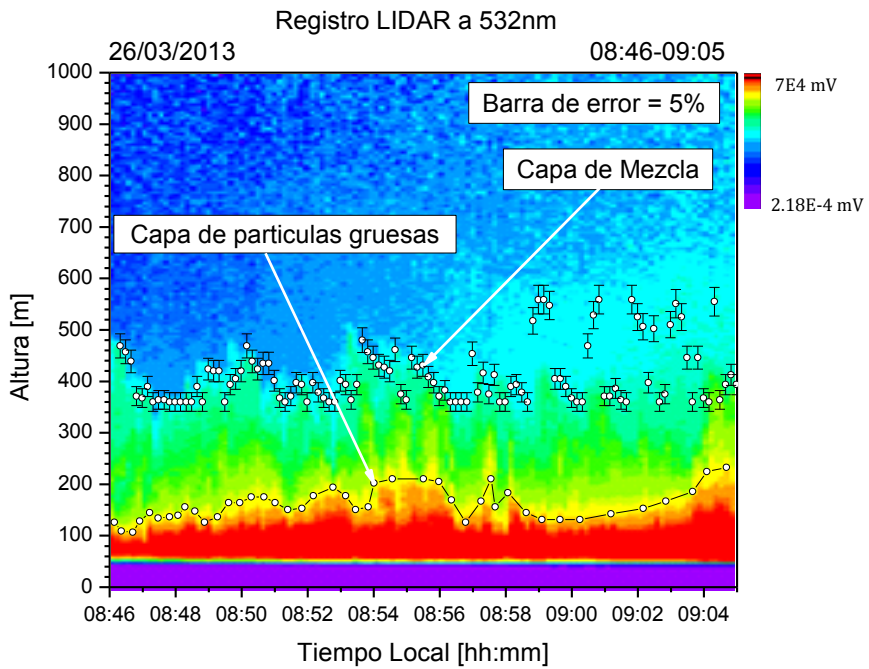


a) 02 de enero de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



b) 22 de febrero de 2013

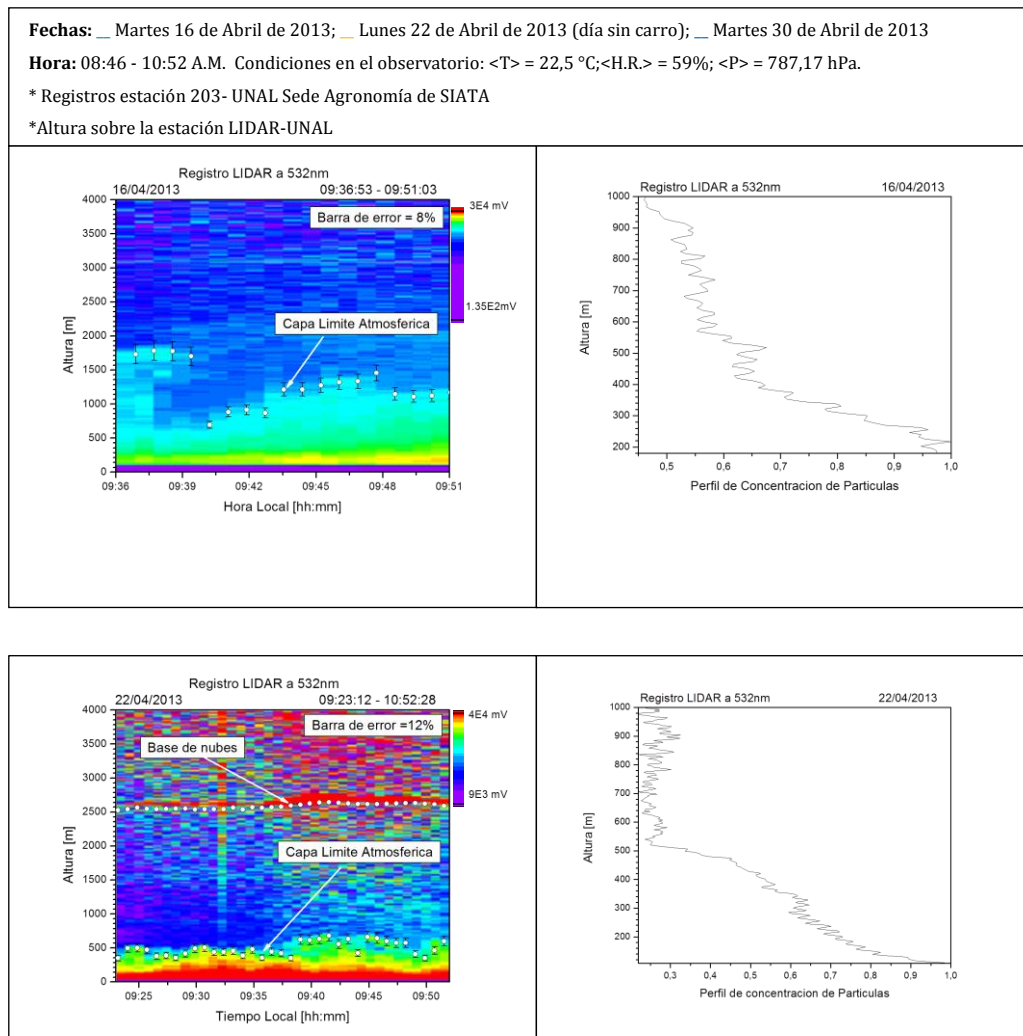


c) 26 de Marzo de 2013

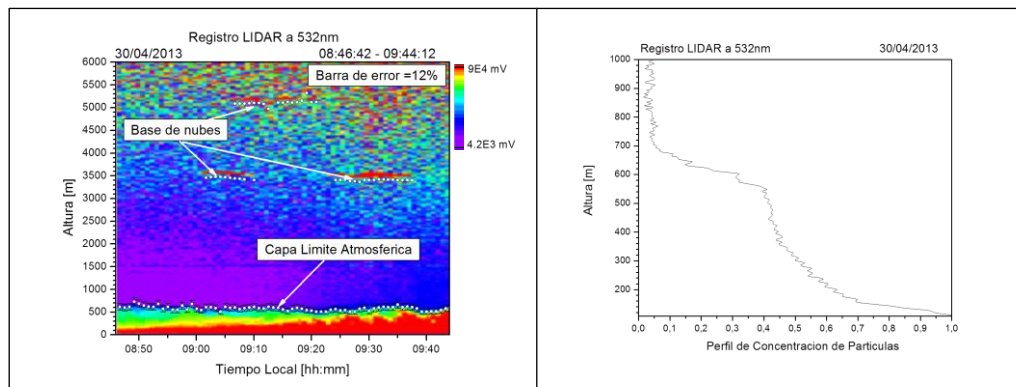
EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Reporte LIDAR - Día sin Carro en Medellín, Lunes 22/04/2013

Figura 2.12. Diagrama de concentraciones de partículas en código de colores y perfiles de concentración característicos.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



Diagramas de Concentración de Partículas Bajo la Capa Límite

Método

El sistema LIDAR-UNAL viene operando desde el mes de Diciembre de 2012 con el propósito de monitorear la estructura de la baja troposfera en la zona urbana de Medellín. El cronograma de mediciones para Enero-Marzo de 2013, fue escogido estratégicamente para asegurar horarios y condiciones ambientales similares día por día, procurando siempre lograr registros LIDAR bajo cielo despejado, y condiciones de humedades relativas en el rango de 48% a 60% y temperaturas entre los 22°C y los 28°C, según la información proporcionada por la Estación SIATA 203-UNAL Agronomía, la cual está ubicada junto al LIDAR-UNAL, terraza del Edificio 19A del campus de la Sede Medellín.

En la Figura 2.12 se presenta el registro LIDAR en código de color. Según la barra de colores del lado superior derecho, el color rojo representa las máximas concentraciones de partículas atmosféricas más próximas a la superficie terrestre, y en contraste, los colores azul y violeta representan las concentraciones menores de partículas a mayores alturas respecto al suelo.

La denominada Capa Límite Atmosférica, que se abreviará como CL en este documento, envuelve el conjunto de subcapas correspondientes a partículas distribuidas en la altura vertical según sus propiedades físicas como forma, tamaño, y masa. Los perfiles lidar representan registros que corresponden a muestras de aire dentro de un volumen definido por la porción de atmósfera interceptada por el mismo sistema LIDAR, tal como se ilustra en la Figura 2.13. En esta ocasión, el protocolo de mediciones lidar se centra en el monitoreo de

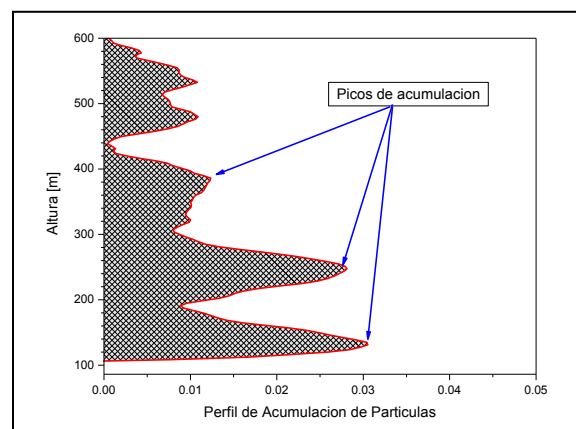
EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

las subcapas bajo la CL que es bien definida por el lidar en espacio y en tiempo. De esta forma, el volumen muestreado por el lidar encierra un cierto número de partículas de similares características correspondiente a un porcentaje de referencia del 100%. El número de partículas asociado a cada subcapa de aire, son entonces representadas como una fracción poblacional, es decir en concentraciones porcentuales, que en este caso se especificarán así: *Concentración porcentual de partículas = Concentración de Partículas [%]*. [keikichi Naito, et al, *The vertical distribution of aerosol in the lower atmosphere observed by a lidar, Meteorology and Geophysics, vol. 19, N° 4, 615-625, (1968)*].

Los diagramas estadísticos reportados en este informe como diagramas de barras de concentraciones porcentuales en función de la altura, incluyen el proceso de extrapolación del número de partículas a nivel suelo.

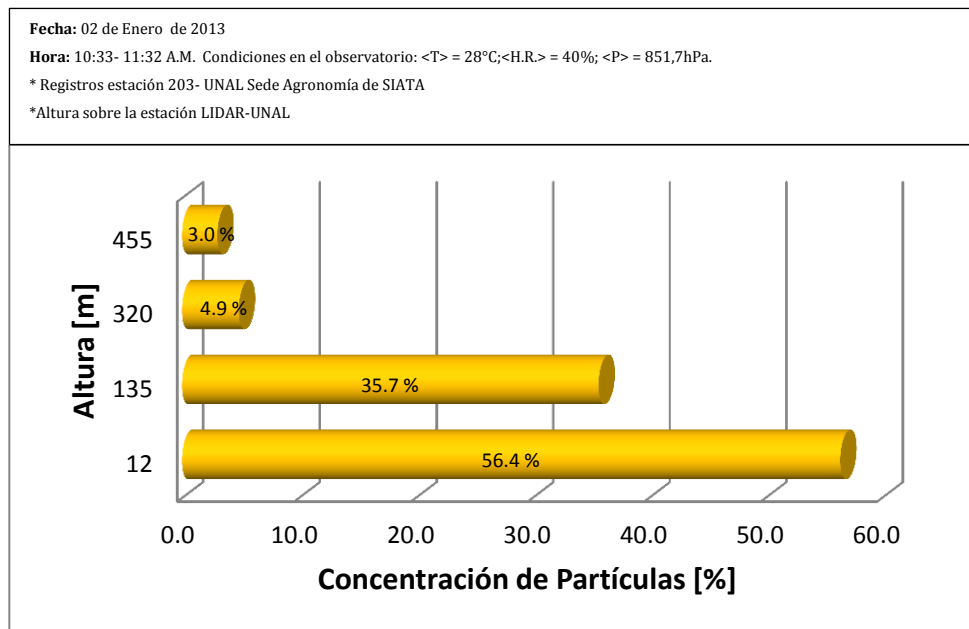
El tipo algoritmo matemático desarrollado para esta tarea, comprende el uso iterativo de las funciones de Haar combinadas con la primera derivada de funciones Gaussianas [Baars et al. 2008; Brooks 2003; Morille et al. 2007].

Figura 2.13. Perfil LIDAR de acumulación de partículas dentro de la CL.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 2.14. Porcentaje de concentración porcentual de partículas según su distribución en altura vertical sobre Medellín. Diagramas obtenidos de datos LIDAR, acompañados con datos meteorológicos de la estación 203-UNAL-SEDE AGRONOMÍA de SIATA, procesados mediante algoritmos exclusivos para el tema de estudio.



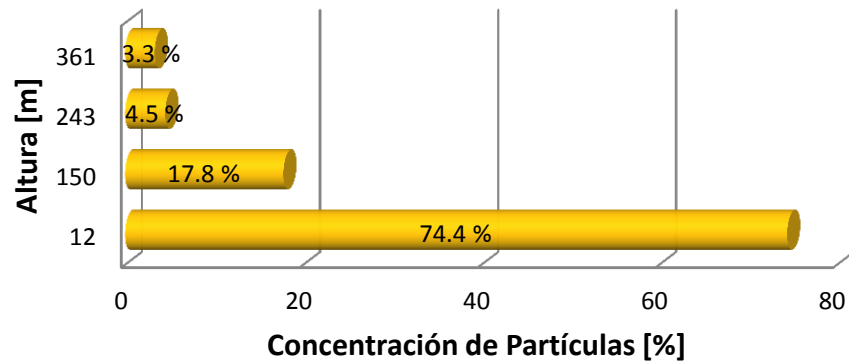
EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Fecha: 22 de Febrero de 2013

Hora: 16:19 - 16:53 Condiciones en el observatorio: <T> = 27°C; <H.R.> = 39%; <P> = 848.4.

* Registros estación 203- UNAL Sede Agronomía de SIATA

* Altura sobre la estación LIDAR-UNAL

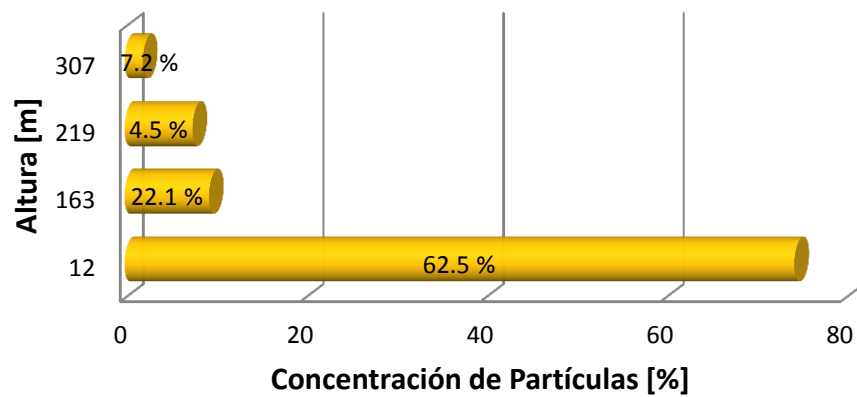


Fecha: 26 de Marzo de 2013

Hora: 08:46 - 09:05 A.M. Condiciones en el observatorio: <T> = 273°C; <H.R.> = 40.7%; <P> = 851.0hPa.

* Registros estación 203- UNAL Sede Agronomía de SIATA

* Altura sobre la estación LIDAR-UNAL



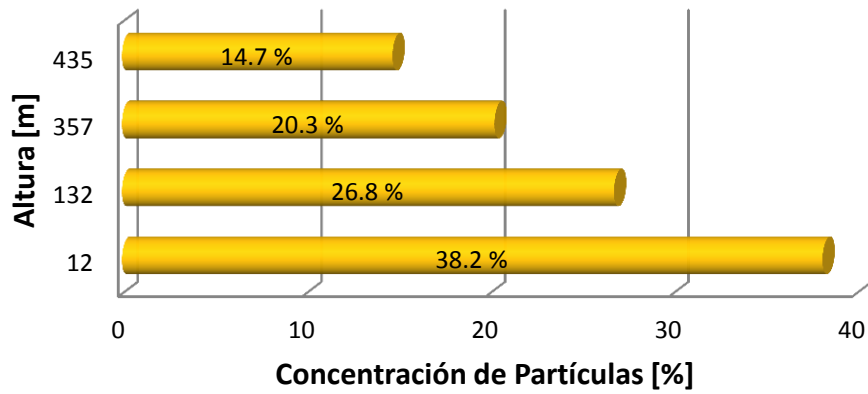
EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Fecha: 22 de Abril de 2013 (DÍA SIN CARRO)

Hora: 08:46 - 10:52 A.M. Condiciones en el observatorio: <T> = 22,5 °C; <H.R.> = 59%; <P> = 787,17 hPa.

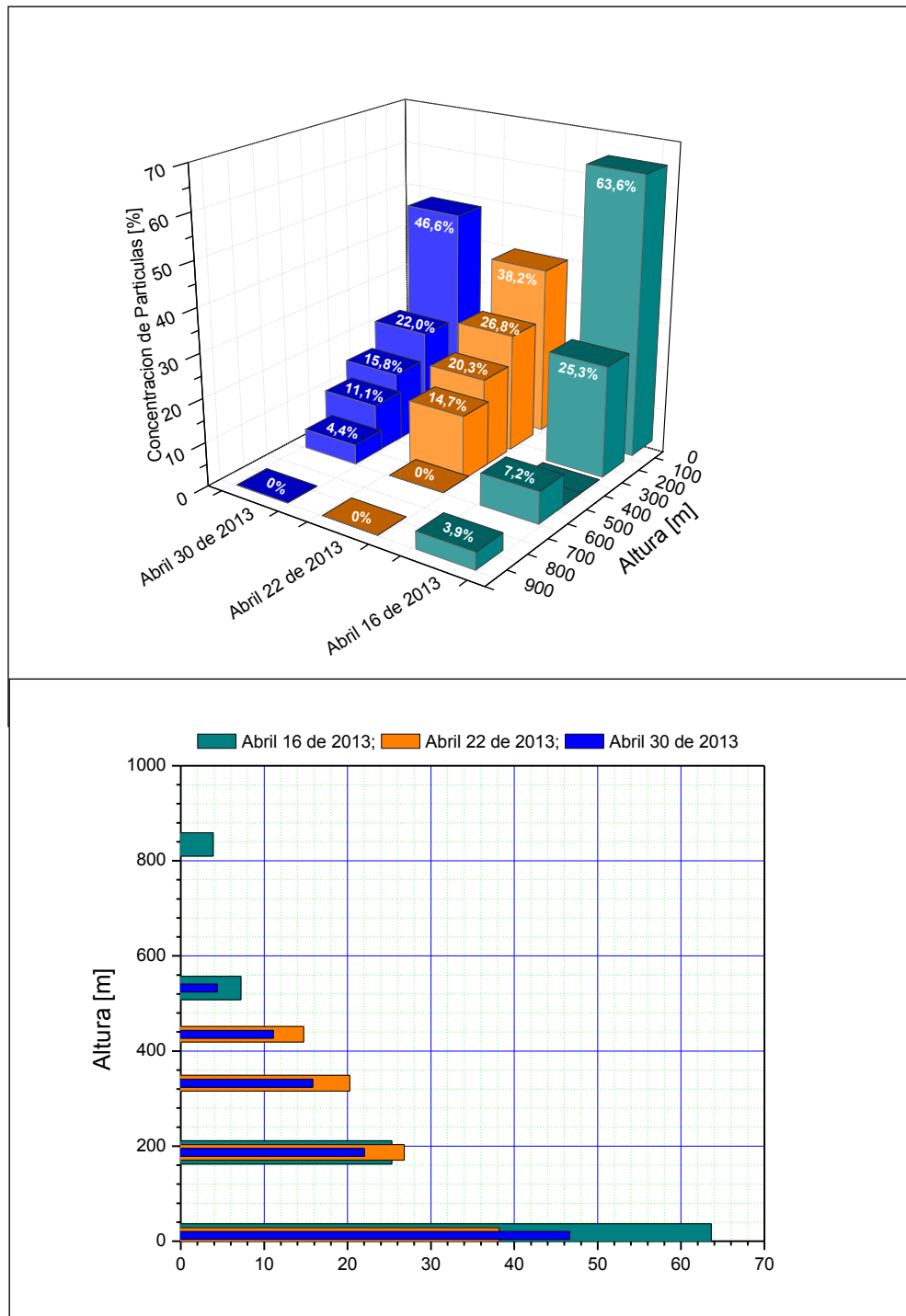
* Registros estación 203- UNAL Sede Agronomía de SIATA

* Altura sobre la estación LIDAR-UNAL



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 2.135. Diagramas de porcentajes de concentraciones de partículas. Naranja: día sin carro en Medellín; Dark Cian: seis días antes del día sin carro; Azul: ocho días después del día sin carro.

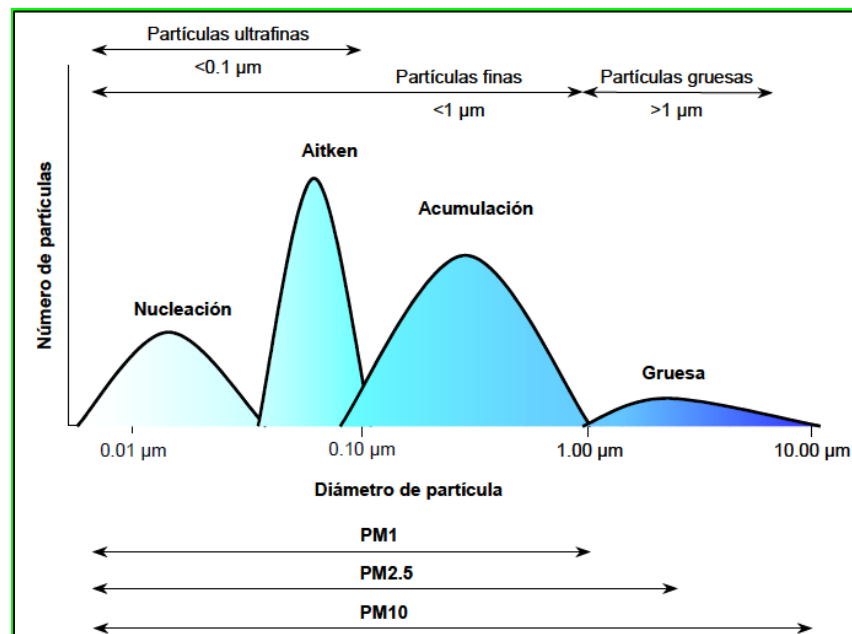


EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

2.6.2 Registros Preliminares de Distribución de Tamaños de Aerosoles

El diámetro de las partículas atmosféricas en suspensión varía desde nanómetros (nm) hasta decenas de micras (μm). Generalmente se identifican diferentes rangos de tamaños de partícula denominados “modas”, que están relacionados en su mayoría con el mecanismo de formación de las partículas: nucleación, Aitken, acumulación y moda gruesa [Warneck, 1988; EPA, 1996; Seinfeld y Pandis, 1998, Figura 2.16]. En general, la granulometría y la composición química del material particulado suelen ser características del foco emisor. La denominación de las partículas incluidas en determinados rangos granulométricos varía en función del ámbito de estudio, ya sea en ciencias atmosféricas o en epidemiología y calidad del aire. Así, como se verá más adelante, se denomina “partículas finas” en ciencias atmosféricas a aquellas partículas de diámetro $<1\mu\text{m}$, mientras que en epidemiología esta definición abarca hasta las partículas de diámetro $<2.5\mu\text{m}$. Consecuentemente, en estudios epidemiológicos se hace referencia a partículas gruesas a partir de $2.5\mu\text{m}$ de diámetro, mientras que en ciencias de la atmósfera se consideran gruesas las partículas de diámetro $>1\mu\text{m}$.

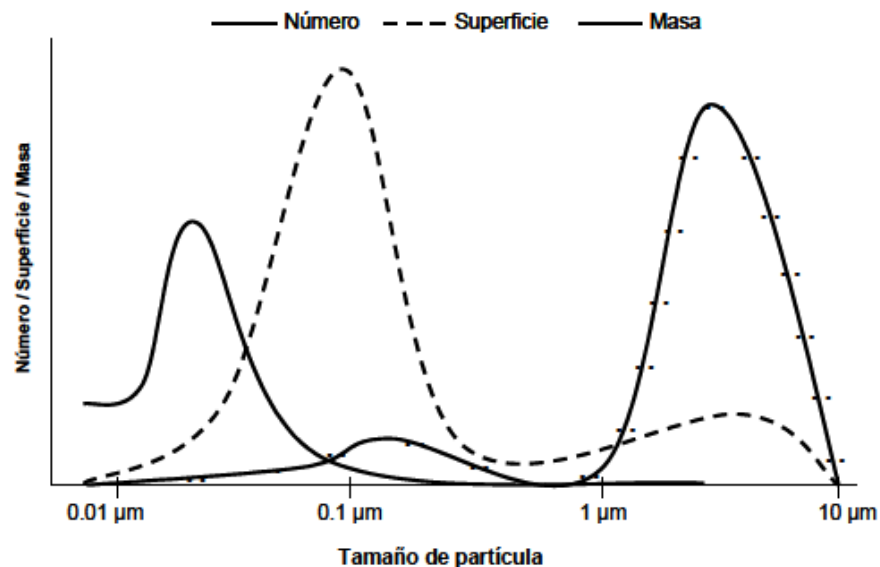
Figura 2.16. Distribución del número de partículas en función del diámetro.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

En la Figura 2.17 se muestra un ejemplo que representa la distribución del material particulado en función del número, superficie y masa de las partículas. Los resultados que en ella se presentan provienen de un estudio llevado a cabo por el Dr. Hans C. Hasson durante dos semanas en una estación de tráfico en Estocolmo. En primer lugar, las partículas de las modas de nucleación y Aitken dominan el número de partículas. La distribución en función de la superficie, por otra parte, muestra un máximo en torno a 0.1 μm lo cual indica que en este diámetro se produce la acumulación de masa de forma más efectiva por procesos de coagulación y condensación. Sin embargo, también se detecta un incremento en la superficie en las partículas gruesas. Por último, la distribución de la masa se concentra en la moda gruesa.

Figura 2.17. Distribución granulométrica del material particulado atmosférico en función del número de partículas, la superficie y la masa (según Dr. H. C. Hasson)



El tamaño de una partícula se puede caracterizar geoméricamente por su radio r , y la distribución de tamaños por una función definida como,

$$n(r) = \frac{dN(r)}{dr} \tag{2.1}$$

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Que representa el número de partículas por unidad de volumen cuyos radios están comprendidos entre r y $r+dr$. Normalmente es útil definir también una función de distribución de tamaños de partículas en forma logarítmica,

$$n(\text{Ln}[r]) = \frac{dN(r)}{d\text{Ln}(r)} \quad (2.1)$$

la cual representa el número de partículas cuyos radios están comprendidos entre r y $r+d\text{Ln}r$ en un determinado volumen. Se hace notar que estas magnitudes parten de la restricción de ser medidas integradas a todo el espesor de la columna de atmósfera, como es el caso de las medidas radiométricas de irradiancia directa y radiancia a nivel del suelo. La dependencia con la altura se resume implícitamente con un parámetro llamado altura patrón o altura de escala. Con ello la distribución numérica tendrá unidades de cm^{-2} . En este informe, en los productos de la inversión de la señal lidar se utilizan unidades dimensionales de distancia en micras- μm .

Puede expresarse también la cantidad de partículas en suspensión en la atmósfera por medio de la llamada distribución de superficie ec. (2.3), o la de volumen total de aerosoles por unidad de volumen de aire sobre la unidad de superficie para las medidas columnares, ec. (2.4). [Natalia Prats, *Utilización del fotómetro Cimel (AERONET) para el análisis de parámetros microfísicos y radiativos del aerosol atmosférico en el suroeste de la Península Ibérica, Tesis doctoral, Universidad de Valladolid, (2009)*]:

$$s(r) = \frac{sdN(r)}{dr} \quad (2.3)$$

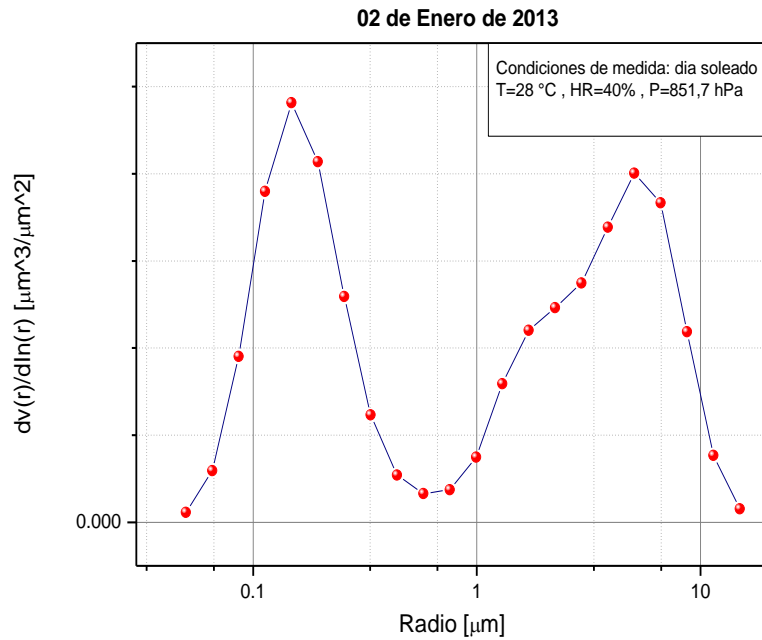
o

$$v(r) = \frac{vdN(r)}{dr} \quad (2.4)$$

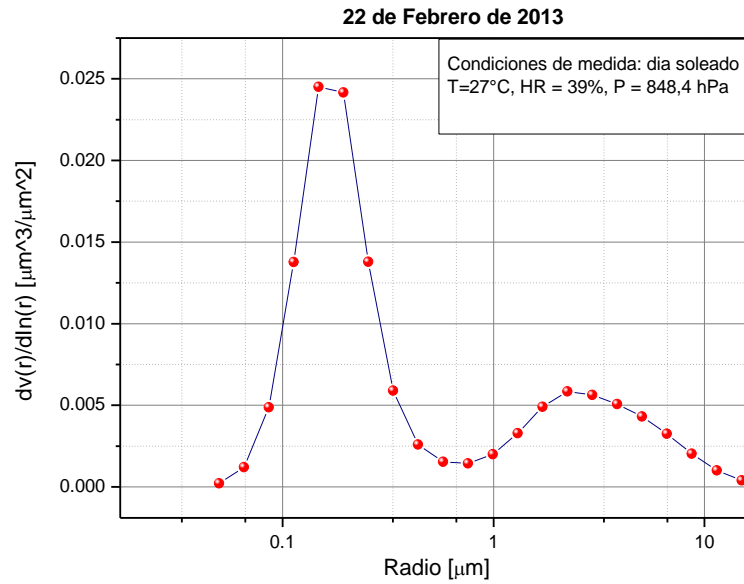
Las Figuras 2.18 representan la función de distribución de partículas según su tamaño representado por el radio r , e integrada en la columna de atmósfera definida por el LIDAR dentro de la CL, en concordancia con lo reportado en los diagramas de barras de concentraciones porcentuales de partículas.

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

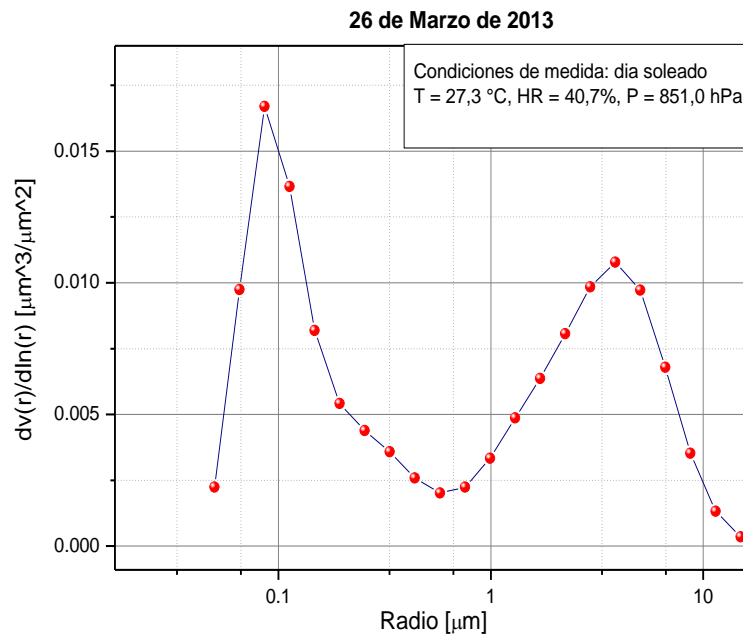
Figura 2.18. Distribución de tamaños de partículas para los días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



b) 22 de febrero de 2013



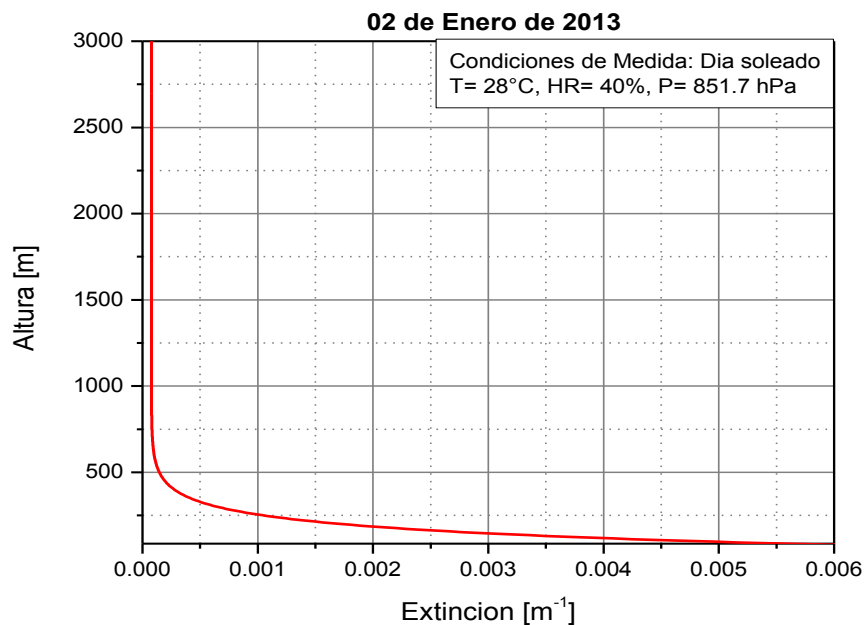
c) 26 de marzo de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

2.6.3 Perfiles del coeficiente de extinción atmosférico

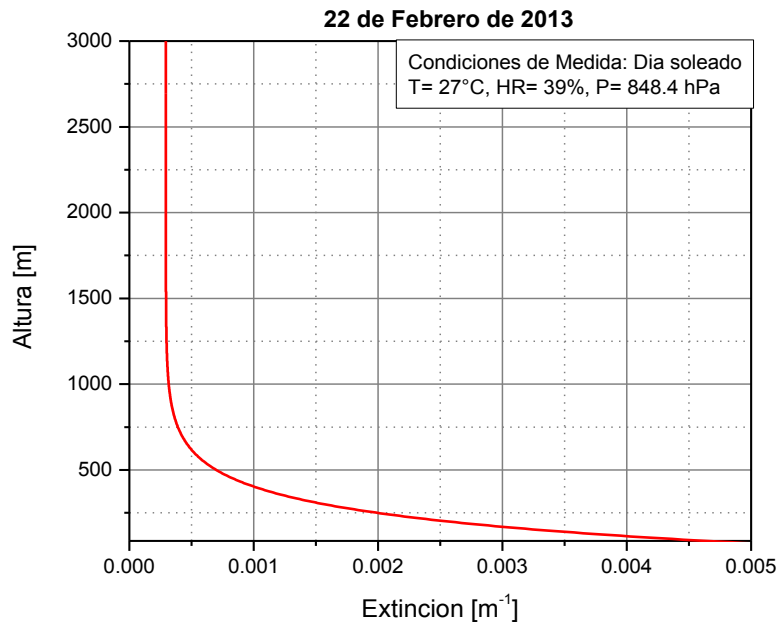
Condiciones de Medida: día soleado. Altura medida sobre la Estación LIDAR. Resolución espacial: 3.75 m. Resolución temporal: 50 s.

Figura 2.149. Perfiles de extinción LIDAR de los días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013.

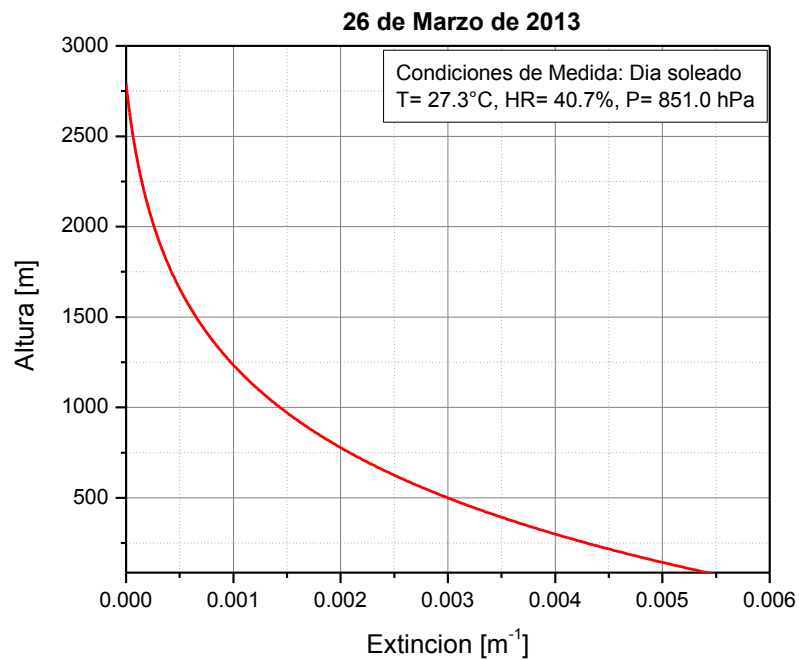


a) 02 de Enero de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



b) 22 de Febrero de 2013



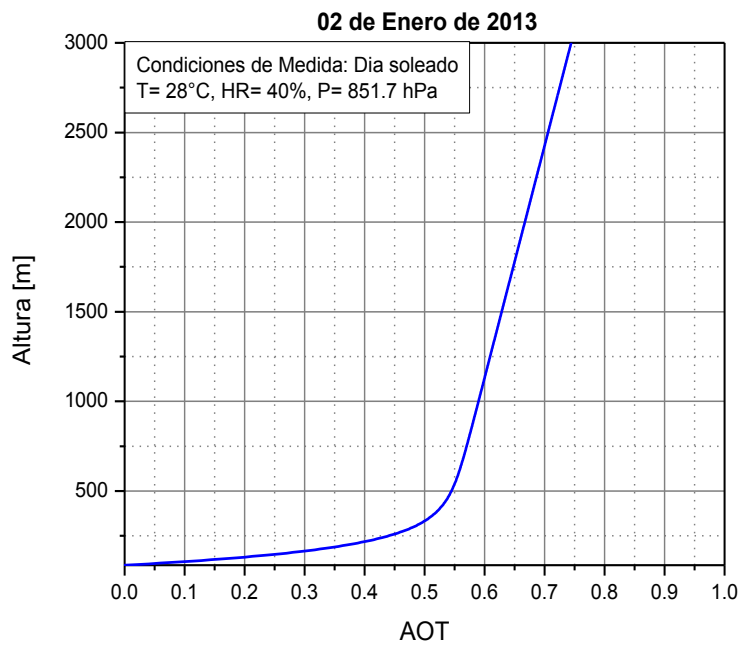
c) 26 de Marzo de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

2.6.4 Perfiles de espesores ópticos - AOT

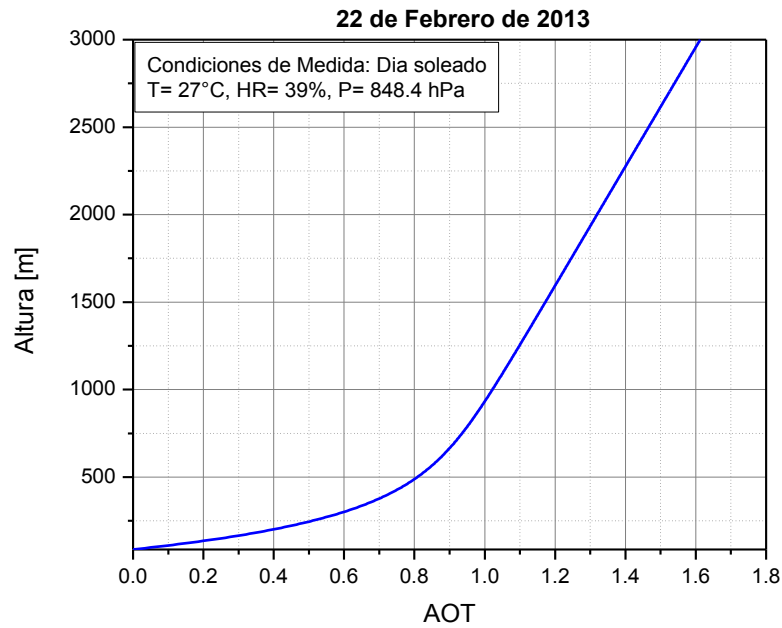
Condiciones de Medida: día soleado. Altura medida sobre la Estación LIDAR. Resolución espacial: 3.75 m. Resolución temporal: 50 s.

Figura 2.20. Perfiles de espesor óptico de aerosoles de los días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013.

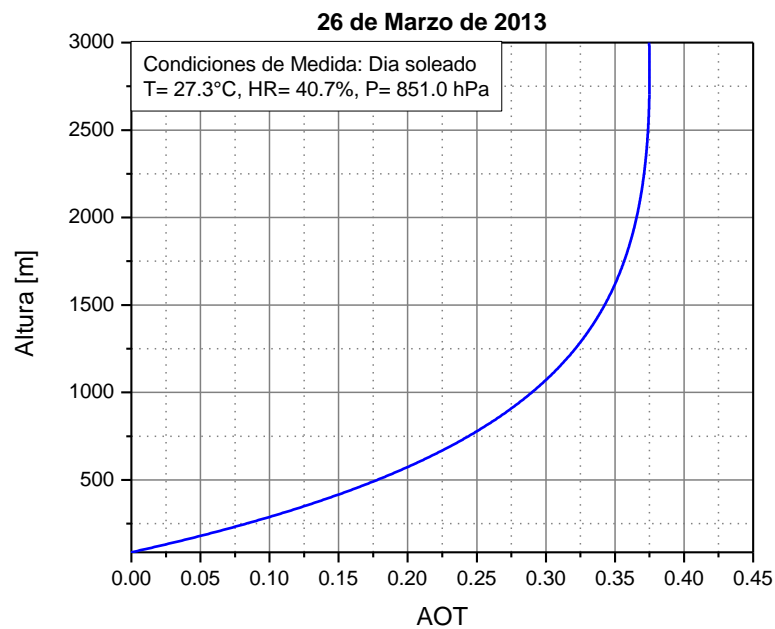


a) 02 de Enero de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



b) 22 de Febrero de 2013



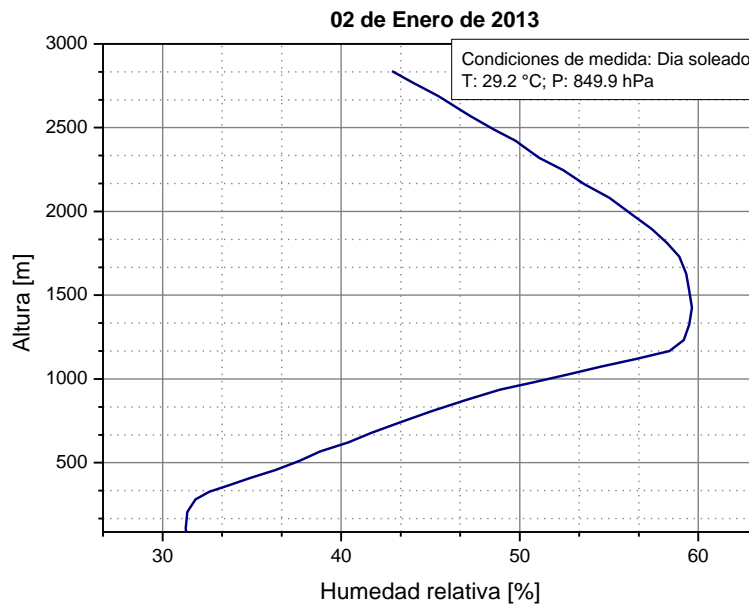
c) 26 de Marzo de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

2.6.5 Perfiles de humedad relativa

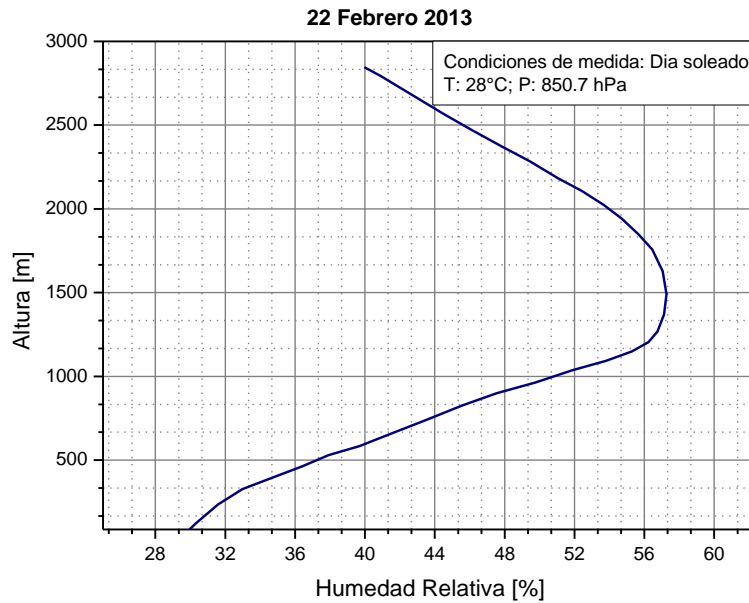
Condiciones de Medida: día soleado. Altura medida sobre la Estación LIDAR. Resolución espacial: 15 m. Resolución temporal: 50 s.

Figura 2.21. Humedad relativa días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013.

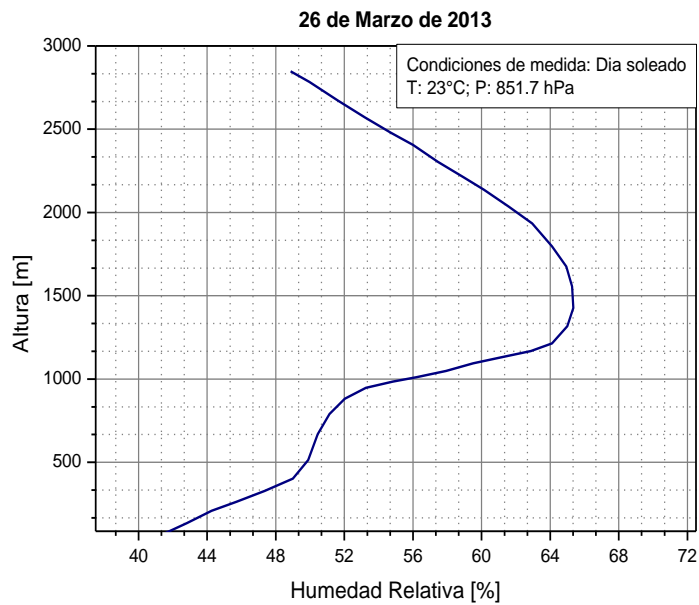


a) 02 de enero de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



b) 22 de febrero de 2013



c) 26 de marzo de 2013



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

2.6.6 Perfiles de temperatura

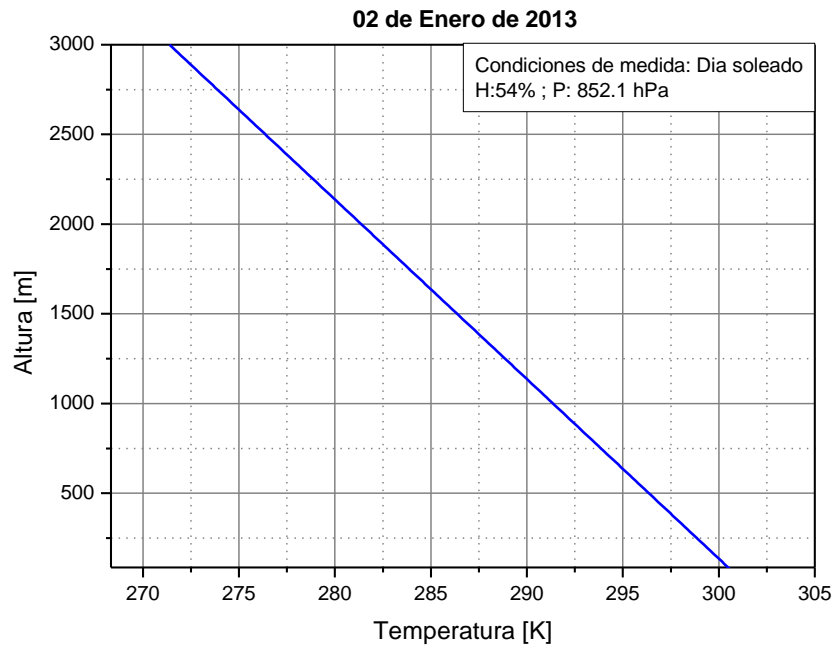
Los perfiles de temperatura logrados con el LIDAR-UNAL en las fechas señaladas en este informe, no fueron comparados con los perfiles de temperatura del lidar satelital CALIOP porque estas fechas no coincidieron con el paso de CALIOP sobre el Valle de Aburrá.

Sin embargo, el grupo GLEO anexa al final de este informe, Anexo I, la contrastación de perfiles de temperatura, en fechas diferentes coincidentes con el paso de CALIOP sobre la Estación LIDAR-UNAL, mostrando en general que las curvas de temperatura en función de la altura vertical tienen comportamientos y tendencias similares tanto para CALIOP como para el LIDAR-UNAL. Verificando de esta forma, la validez y confianza de los registros.

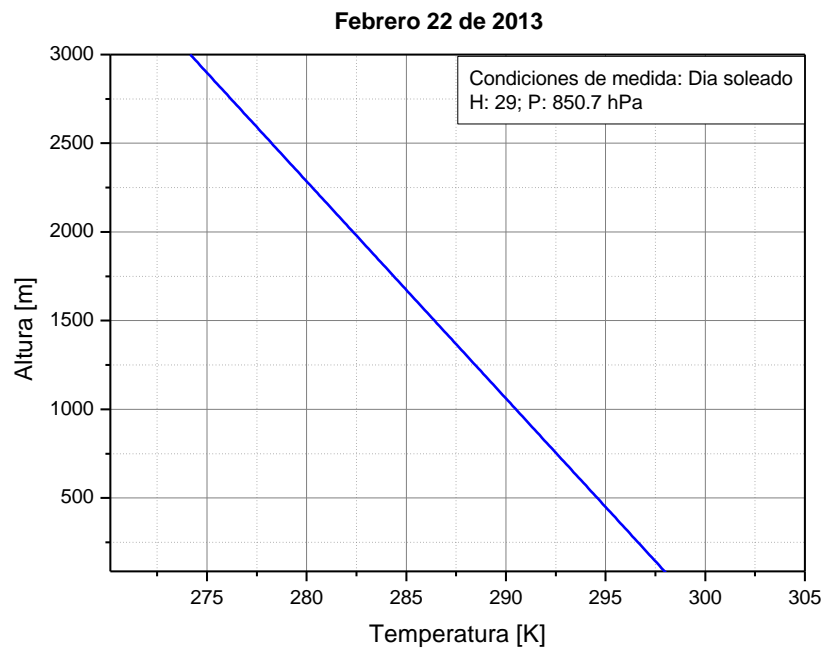
Condiciones de Medida: día soleado. Altura medida sobre la Estación LIDAR. Resolución espacial: 15 m. Resolución temporal: 50 s.

Figura 2.22. Perfiles de Temperatura de los días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013.

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

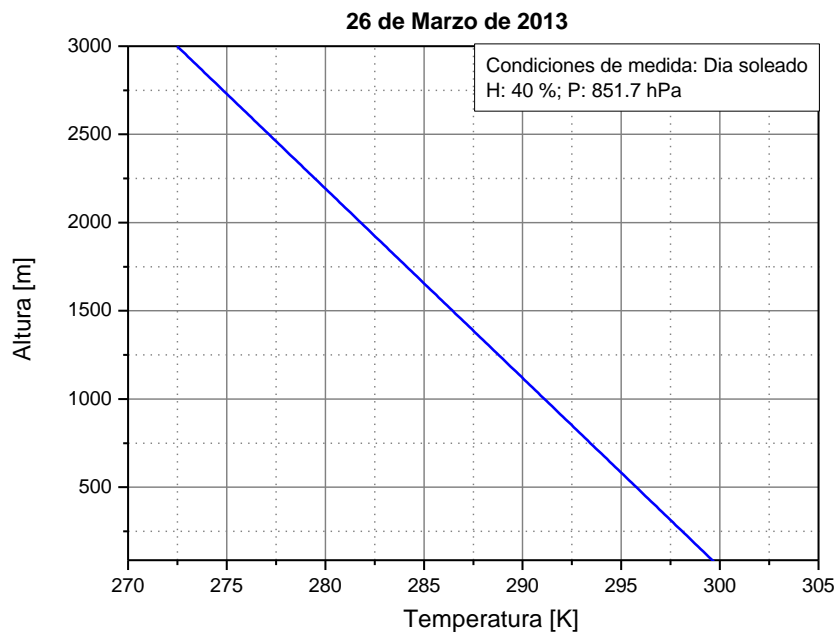


a) 02 de enero de 2013



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

b) 22 de febrero de 2013



c) 26 de marzo de 2013

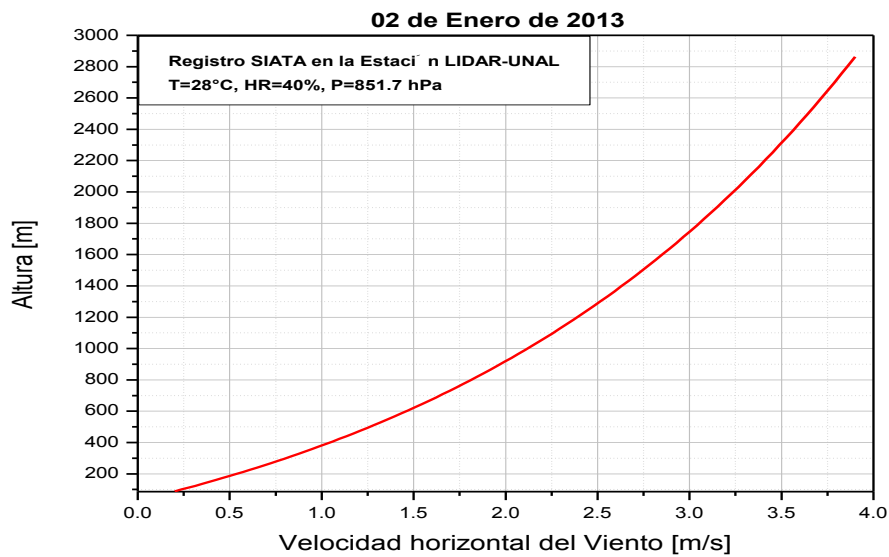
2.6.7 Perfiles de la velocidad horizontal del viento

Los perfiles de velocidad horizontal de viento derivados desde los datos LIDAR-UNAL, en primera aproximación, presentan valores al parecer típicos según las condiciones de tiempo con cielo despejado y aire tranquilo en que fueron realizadas tales mediciones. Obviamente, las medidas de la variable velocidad del viento y su variación con la altura dependen drásticamente de las condiciones meteorológicas y climáticas de la región donde se realicen. En este sentido, el grupo GLEO espera tener a futuro la oportunidad de contrastación de resultados de perfiles de viento obtenidos con el LIDAR-UNAL con perfiles obtenidos con otro tipo de técnica o de tecnología para tal fin, operando en forma simultánea y por supuesto bajo las mismas condiciones climáticas y meteorológicas.

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

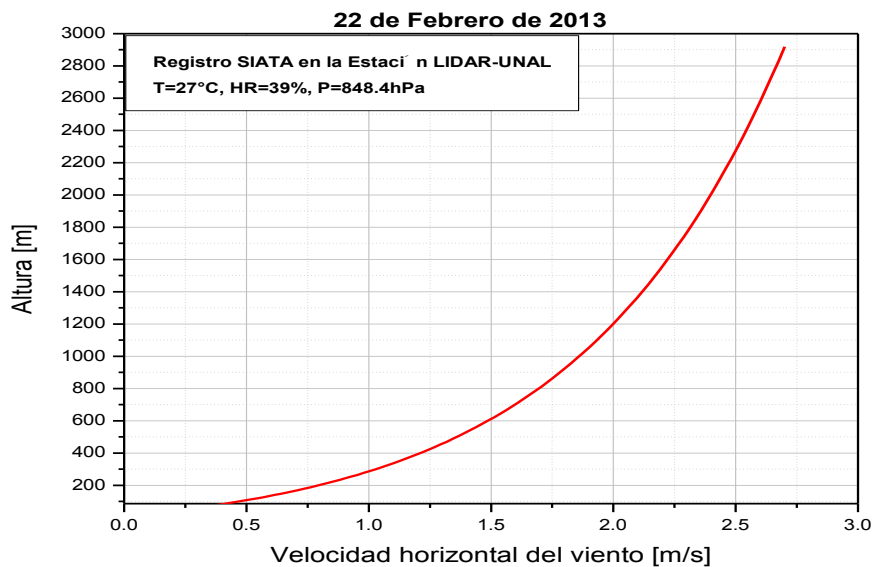
Condiciones de Medida: día soleado. Altura medida sobre la Estación LIDAR. Resolución espacial: 15 m. Resolución temporal: 50 s.

Figura 2.23. Velocidad horizontal del viento, en los días 02 de enero, 22 de febrero y 26 de marzo de 2013.

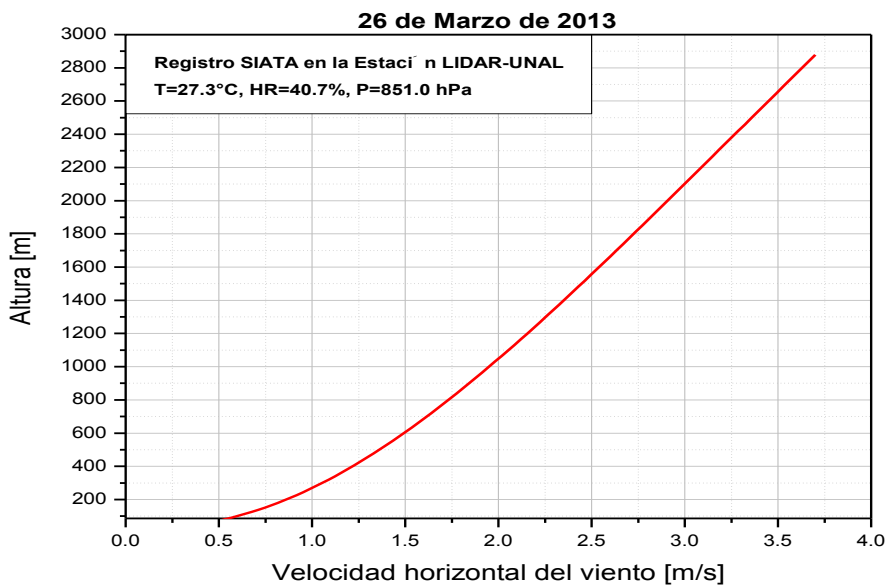


a) 02 de enero de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



b) 22 de febrero de 2013



c) 26 de marzo de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

3 ESPECTRO- RADIOMÉTRO

3.1 CONFIGURACIÓN GENERAL DEL SISTEMA

Figura 3.1. Configuración del espectro-radiómetro

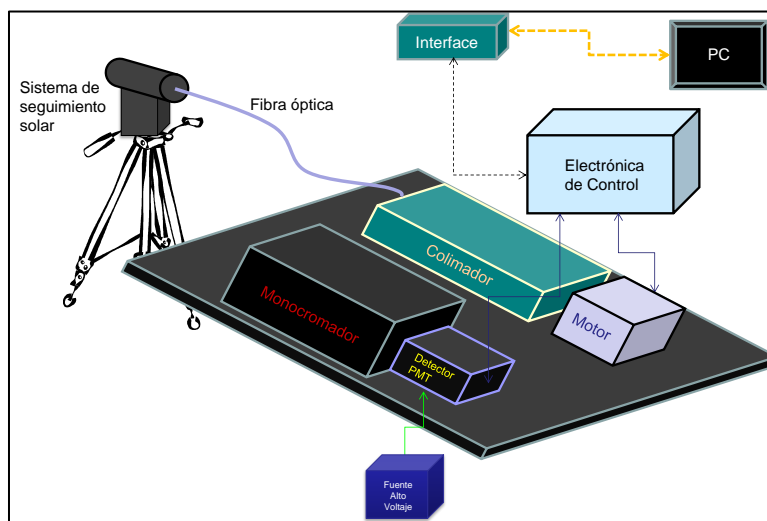
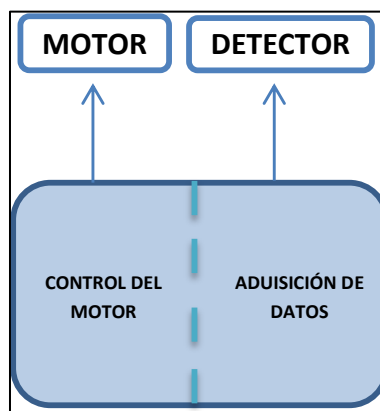


Figura 3.2. Diagrama del sistema de control asociado al registro de espectros



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 3.3. Ilustración de la configuración óptica del espectro-radiómetro

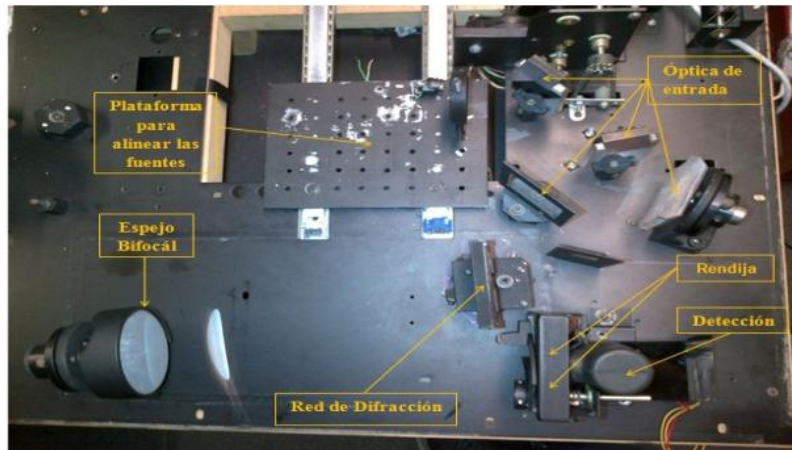
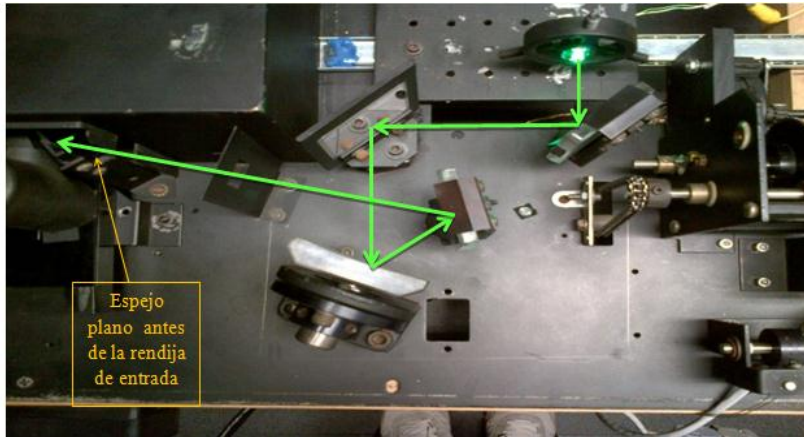
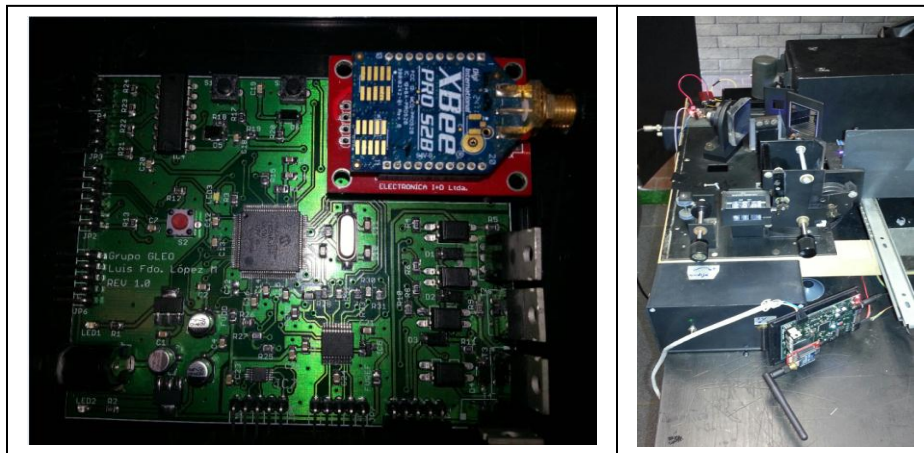


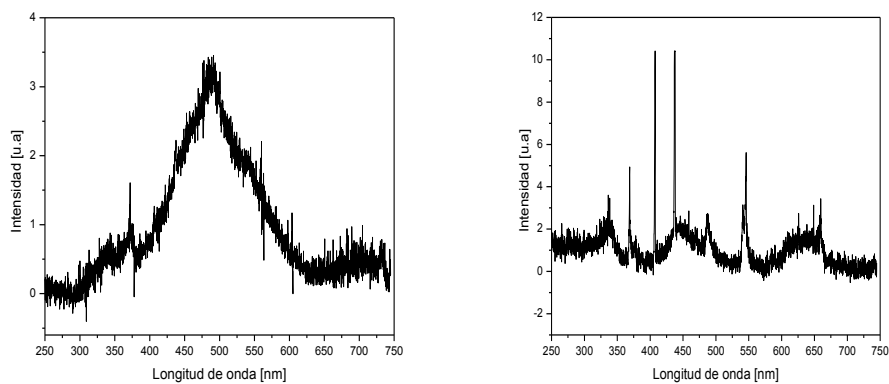
Figura 3.4. Izquierda: tarjeta de control; Derecha: tarjeta acoplada al sistema opto-mecánico



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

3.2 OPTIMIZACIÓN DE OPERATIVIDAD DEL ESPECTRO-RADIÓMETRO

Figura 3.5. Registros espectrales en el rango de 250 a 758 nanómetros: Izquierda - Espectro de una lámpara de filamento o incandescente, (tungsteno). Derecha - espectro de una lámpara de descarga en gas de Nitrógeno.



3.3 ESTADO ACTUAL

Instalación de la etapa de detección y conexión a la sonda a fibra óptica hasta el pequeño telescopio ligado al rastreador solar.

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

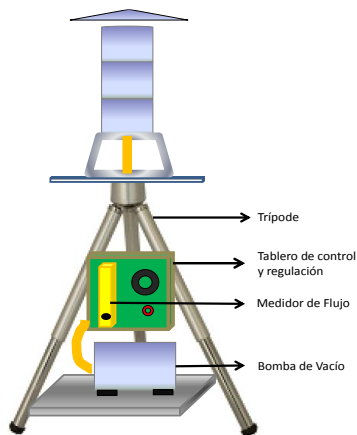
4 IMPACTADOR DE PARTICULAS

4.1 IMPACTADOR DE PARTICULAS

Diseño y acople del impactador de aerosoles de tres etapas para recolección de tamaños 2,5micras y desarrollo exitoso del método de análisis con esfera integrante y espectrofotómetro.

4.2 CONFIGURACIÓN GENERAL DEL SISTEMA

Figura 4.1. Izquierda: Configuración del Impactador de Partículas; Derecha: Fotografía del Impactador de Partículas.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 4.2. Arriba: Componentes principales en las etapas del colector de partículas; Abajo: Muestra de primeros ensayos de recolección de partículas.



Figura 4.3. Impactor de Partículas GLEO operando simultáneamente con Estación PM2.5 Bloque 19-A Universidad nacional.





EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

4.3 ESTADO ACTUAL

- Estandarización del protocolo de medidas.
- Aplicación del método de análisis con esfera integrante y espectrofotómetro.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

5 ANALISIS DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

La Campaña “**Monitoreo Lidar de la baja Tropósfera en Medellín**” realizada en los meses de Enero a Marzo de 2013, proporcionó información preliminar del comportamiento y de la estructura en columna de los tres primeros kilómetros de atmósfera sobre Medellín. El conjunto de actividades experimentales de investigación desarrolladas por el grupo GLEO se realizó bajo el marco de una programación de mediciones en días de cielo despejado como una primera fase en el monitoreo de una atmósfera típica de altiplanicie andina tropical urbana, para establecer criterios y elementos de juicio en orden a diagnosticar los efectos fenomenológicos atmosféricos que en definitiva condicionan la calidad de vida de la región de estudio.

La Estación LIDAR-UNAL diseñada y construida para este objetivo fue puesta en operación desde el mes de diciembre de 2012, cumpliendo con una serie de protocolos necesarios para la definición de características y estandarización de su funcionamiento que en definitiva permitieron desarrollar la campaña en mención, cuyos resultados podrían catalogarse como indicativos de un esquema de atmósfera vertical local caracterizado por tres zonas atmosféricas en virtud de la concentración de partículas que las constituyen. Dichas zonas atmosféricas que son mapeadas directamente por el sistema Lidar presentan en general una concordancia con el comportamiento de las variables físicas y ópticas asociadas como la temperatura, la humedad relativa, la velocidad del viento, los coeficientes de extinción, y los espesores ópticos.

La visión general de los procedimientos involucrados en el tratamiento de datos lidar logrados a través de esta campaña, junto a algunas conclusiones básicas, se esbozan en los siguientes ítems:

Los datos generados a partir de los registros lidar contienen información completa sobre la estructura de la atmósfera que causa la dispersión de la luz láser. La señal lidar, que en adelante se denominará S_{raw} , viene constituida por la señal de luz retrodispersada,

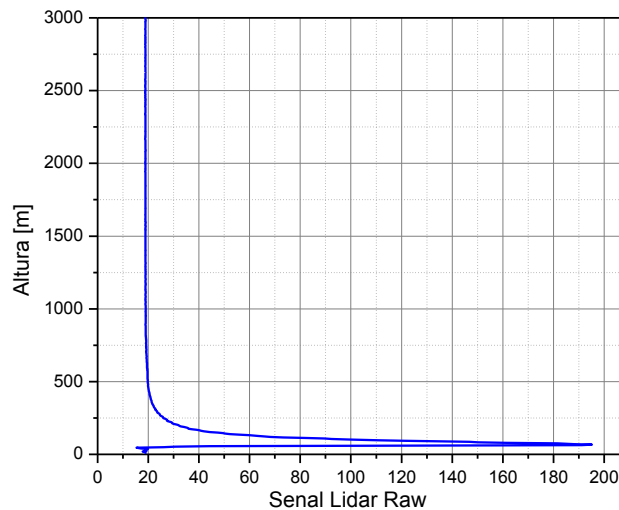
EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

(Backscattering), un ruido de fondo S_B y un ruido electrónico S_e , todas dependientes de la altura z , como lo expresa la ecuación (1).

$$S_{raw}(z) = S(z) + S_B(z) + S_e(z) \quad (5.1)$$

La figura 5.1. muestra un ejemplo de señal lidar típica.

Figura 5.1 Señal Lidar Raw a 532nm



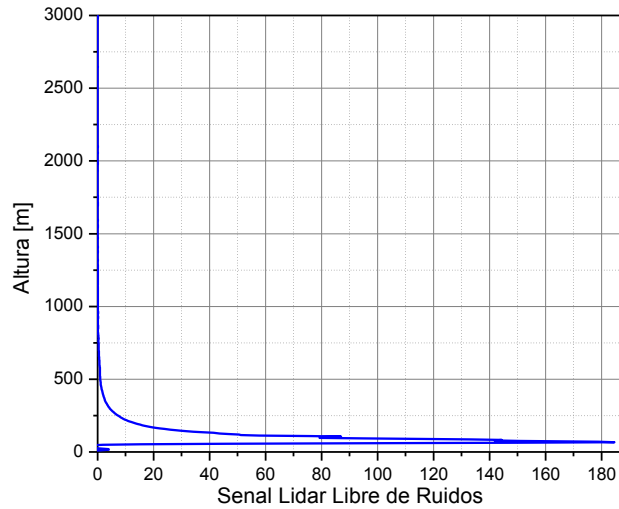
La señal lidar pura, libre de ruidos, contiene las características ópticas de las partículas dispersoras expresadas a través de los coeficientes volumétricos de retrodispersión β y absorción α ,

$$S(z) = S_{raw}(z) - \{S_B(z) + S_e(z)\} = \frac{C}{z^2} \beta(z) e^{-2 \int \alpha(z) dz} \quad (5.2)$$

Donde C es una constante que da cuenta de las características geométricas y espectrales del sistema Lidar. La figura 5.2. muestra un ejemplo de señal lidar pura.

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 5.2 Señal Lidar Libre de Ruidos



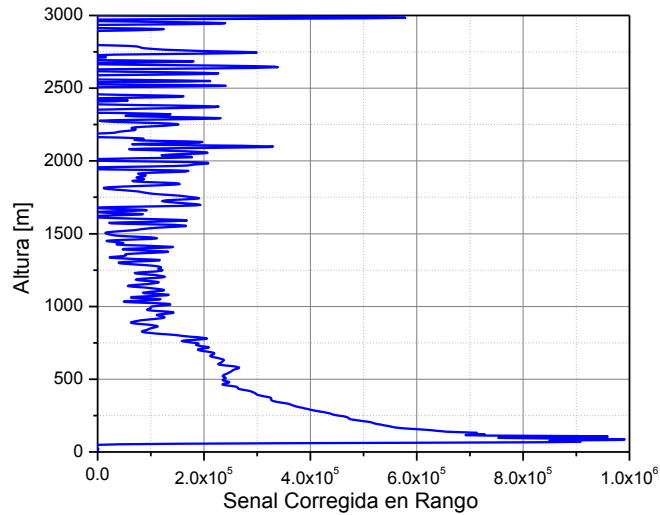
La señal lidar pura debe ser corregida en rango multiplicando por z^2 a ambos lados de la ecuación (2):

$$Z(z) = z^2 S(z) = C \beta(z) e^{-2 \int \alpha(z) dz} \quad (5.3)$$

La figura 5.3. muestra un ejemplo de señal corregida en rango.

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 5.3 Señal LidarCorregida en Rango



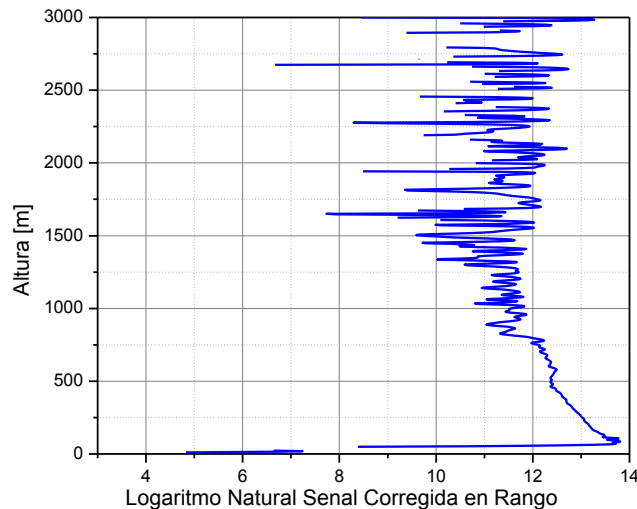
Finalmente la señal en versión logarítmica $f(z)$ es la que en definitiva se utiliza para los procesos de inversión algorítmica :

$$f(z) = \text{Ln}\{z^2 S(z)\} = \text{Ln}\{C\beta(z)\} - 2 \int \alpha(z) dz \quad (5.4)$$

La figura 5.4. muestra un ejemplo del logaritmo natural de la señal corregida en rango.

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura 5.4. Logaritmo Natural de la Señal Lidar Corregida en Rango



Respecto a la estimación experimental de la Capa de Mezcla el equipo LIDAR midió los perfiles de concentración de partículas de aerosol o de trazas de gases con altas resoluciones espaciales y temporales, revelando la estructura de la baja troposfera en forma directa. Esto fue posible a través de una programación estratégica de mediciones lidar, directamente soportada por condiciones climatológicas favorables tanto a la obtención de datos como al proceso de análisis de los mismos. Es así como en las Figuras 2.9, 2.11, y 2.12 se puede apreciar una capa muy densa de partículas por debajo de los 200 m de altura sobre la Estación, (de color rojo), que tiende a mantenerse estable en el tiempo presentando algunas variaciones leves hacia el mediodía. Las capas de aire superiores a esta, (de color amarillo y verde), que se encuentran aproximadamente entre los 200 m y los 600 m de altura sobre la Estación, presentan un proceso de mezcla y de intercambio más pronunciado por efectos de la radiación solar. Finalmente, se puede observar una última capa de aire relativamente delgado, (de color azul claro), cuya altura es muy variable, aproximadamente entre los 600 m y los 1000 m, que quizá obedece a las dinámicas urbanas y climatológicas del Valle de Aburrá, y por supuesto a los efectos de la luz solar.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Los resultados consolidados derivados de la estimación de las capas de atmosfera arriba mencionadas, Figuras 2.14 y 2.15, muestran una distribución de concentraciones de partículas en función de la altura, la cual estuvo definida por la estratificación de capas y subcapas de la baja tropósfera obtenidas a partir de las evaluaciones matemáticas, físicas, y estadísticas de los perfiles directos de las señales LIDAR. En particular, para obtener estos resultados fue necesario involucrar tratamientos de onditas de HAAR y GAUSS.

Las distribuciones de tamaños presentadas en las Figuras 2.18, fueron obtenidas a partir del proceso de estratificación atmosférica, aplicando reiterativamente los métodos asociados a las teorías de Scattering Rayleigh y MIE. Los resultados obtenidos evidencian en primera aproximación un comportamiento bien definido en las distribuciones, en cuanto al grupo de partículas finas aproximadamente entre 0.05 y 0.6 micras y el grupo de partículas gruesas con tamaños aproximados entre 0.8 y 15 micras. Hecho que parece estar siempre presente y por lo tanto de acuerdo a la buena delimitación de la densa capa próxima al nivel del suelo.

Por otra parte, el uso de operaciones de inversión de las señales lidar utilizando herramientas matemáticas conocidas como el Método de la Pendiente permitieron obtener el comportamiento gráfico, Figuras 2.19, de los efectos de atenuación de la luz láser a 532 nm atravesando los primeros 3 km de altura en vertical sobre la Estación Lidar. Considerando que la longitud de onda correspondiente a 532 nm de luz láser es una sonda de atmósfera estratégica para el predominio del fenómeno de Scattering sobre el de absorción, los perfiles de extinción que comprenden las contribuciones de los dos fenómenos: absorción más backscattering, evidencian un acuerdo con los reportes de estratificación y de concentración anteriormente mencionados. Aunque las mediciones fueron realizadas durante intervalos de tiempo con cielo claro, los valores del coeficiente de extinción decrecen rápidamente en los primeros 500 m de altura, desde aproximadamente 0.005 hasta 0.00029 m^{-1} , para luego mostrar un comportamiento correspondiente a una atmosfera de relativa baja concentración de partículas. Del tratamiento matemático utilizado para obtener los coeficientes de extinción, fue posible también representar los perfiles de espesores ópticos, AOT, a partir de la integración directa de estos mismos perfiles de extinción, como se indican en las Figuras 2.20.

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Estos perfiles permiten observar el comportamiento de la luz láser a 532 nm atravesando las diferentes capas atmosféricas incluyendo las propiedades ópticas resumidas en la función asociada al índice de refracción, con un crecimiento pronunciado del AOT en los primeros 500 m de altura sobre la Estación, con preponderancia de la parte imaginaria del índice de refracción sobre la parte real, indicando, en primera instancia, la presencia de vapor de agua en las primeras capas atmosféricas dentro de la capa de mezcla.

En relación a los perfiles de humedad relativa y de temperatura mostrados en las Figuras 2.21 y 2.22 respectivamente, el análisis previo de los registros lidar fue realizado con base en los perfiles de backscattering β y de índice de refracción n dependientes de la longitud de onda λ de la luz láser y de la altura vertical z :

$$n(\lambda, z) = \left[\frac{\lambda^2}{\pi} [N(z)\beta(\lambda, z)]^{1/2} + 1 \right]^{1/2} \quad (5.5)$$

Donde $N(z)$ es la densidad volumétrica de partículas dispersoras de luz en la atmosfera.

Desde donde,

$$N(z) = \frac{\pi^2(n^2-1)^2}{\lambda^4 \beta(z)} \quad (5.6)$$

Con la relación entre los coeficientes de backscattering y de absorción:

$$\beta(z) = \frac{3}{8\pi} \alpha(z) \quad (5.7)$$

Considerando la atmosfera como un gas ideal en cada capa atmosférica de acuerdo a los resultados de estratificación y de concentración de partículas, la temperatura estaría relacionada con la presión $p(z)$ y la densidad volumétrica $N(z)$ a través de la siguiente expresión:

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN
LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

$$T(z) = \frac{P(z)}{K_B N(z)} \quad (5.8)$$

Donde K_B es la constante de Boltzman. A partir de la cual fue posible obtener los perfiles de temperatura.

De la misma forma, una vez obtenidos los perfiles de temperatura fue posible estimar la humedad relativa a partir de la expresión de la densidad de vapor de agua en la columna de atmosfera:

$$\rho(z) = \frac{e(z)}{R T(z)} \quad (5.9)$$

Donde R es la constante universal de los gases, y $e(z)$ es la presión parcial de vapor de agua que obedece a la siguiente expresión:

$$e(z) = 6.11 \times 10^{\left[\frac{7.5T(z)}{(T(z)+237.3)} \right]} \quad (5.10)$$

Los resultados indican que la humedad relativa aumenta hasta aproximadamente 1500 m sobre la Estación Lidar y luego presenta una disminución gradual, mientras que la temperatura presenta un decrecimiento continuo en los primeros 3 km de altura respecto a la Estación.

Finalmente, los perfiles de la componente horizontal del viento, reportados en las Figuras 2.23, fueron obtenidos utilizando el Método de Correlación de Puntos el cual consiste en considerar dos líneas de observación lidar en dos orientaciones distintas. El tiempo de retraso de detección entre las dos direcciones de observación puede determinarse con una función de correlación a una altura dada. El lidar toma datos en un intervalo regular de tiempo, permitiendo crear un perfil de señal de luz retro-dispersada en función del tiempo y de la altura para cada línea de observación. Usando la señal lidar en función de la altura z , $P(z)$ corregida en rango y en energía E ,

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN
LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

$$Z_{\theta}(z, t) = \frac{P(z, t)z^2}{E} \quad (5.11)$$

es posible extraer los datos para una altura z dada, en todos los tiempos de medida. De aquí se obtiene un estimativo de la variación temporal de la señal lidar retro-dispersada, (backscattering), en una determinada altura. El tiempo de retraso entre la detección de las estructuras atmosféricas a lo largo de las dos líneas de observación puede ser determinada mediante la siguiente función de correlación:

$$C(z, \Delta t) = \frac{\sum_{t=1}^n [Z_1(z, t) - \langle Z_1(z) \rangle] [Z_2(z, t + \Delta t) - \langle Z_2(z) \rangle]}{\left\{ \sum_{t=1}^n [Z_1(z, t) - \langle Z_1(z) \rangle]^2 [Z_2(z, t + \Delta t) - \langle Z_2(z) \rangle]^2 \right\}^{1/2}} \quad (5.12)$$

donde $Z_1(z, t)$ es la señal lidar corregida en rango y en energía a lo largo de una línea específica de observación en el rango z y en el tiempo t . Así, la correlación permitirá determinar el retraso en rango y en tiempo: Δz y Δt respectivamente. Por otra parte, la distancia entre las dos direcciones de observación lidar puede determinarse a partir del conocimiento de la distancia z desde el sistema lidar hasta la estructura atmosférica, (grupo de partículas), y el ángulo entre las dos líneas de observación $\Delta\theta$ de tal forma que la componente horizontal de la velocidad del viento se determina usando la siguiente relación geométrica:

$$v = \frac{[\Delta z^2 + (z\Delta\theta)^2]^{1/2}}{\Delta t} \quad (5.13)$$

La variación temporal de la densidad de las capas detectadas y registradas asociadas a la señal lidar retro-dispersada, (backscattering), fue registrada sucesivamente cada 50 s.

Los resultados de los perfiles de velocidad horizontal del viento indican valores relativamente bajos, (0.5 m/s), sobre la Estación Lidar, hecho que está en concordancia con la estabilidad de la capa de partículas gruesas a bajas alturas. Este valor de la magnitud de velocidad horizontal del viento crece lentamente con la altura vertical a razón de 0.001 m/s por cada metro de altura vertical.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

A modo de conclusión general, los productos de investigación reportados en este informe obtenidos a partir de la puesta en operación de la Estación LIDAR-UNAL, significan el punto de partida del uso de las técnicas de monitoreo remoto de la atmósfera en la zona urbana de Medellín, en el sentido de empezar a reunir elementos que a futuro seguramente podrán ser incorporados en el conjunto de actividades tendientes a dilucidar el comportamiento de las capas de la baja troposfera, su impacto en la calidad del aire y en el clima a nivel regional, que es uno de los objetivos prioritarios de las actividades de investigación por parte del grupo de Investigación GLEO. Cabe mencionar que la Estación Lidar tiene la posibilidad de habilitar otros tres canales de medida, que permitirán su operación automática con un total de cinco registros simultáneos relacionados directamente con las mediciones de las principales variables atmosféricas, facilitando significativamente los procesos de inversión, de análisis, y por supuesto de validación de resultados.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

6 ANEXO I

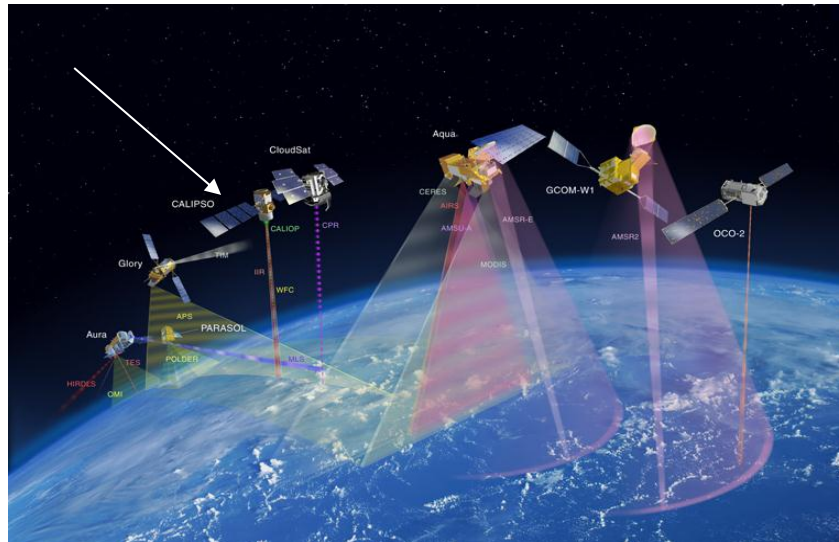
6.1 COMPARACIÓN DE MEDIDAS LIDAR-UNAL CON LIDAR SATELITAL CALIPSO (CALIOP)

Actualmente el Sistema LIDAR-UNAL constituye una de las estaciones contributivas del *World Meteorological Organization* y del *Global Atmosphere Watch Programme, WMO/GAW*, hecho que significa la posibilidad que tiene el GLEO de intercambiar datos y de participar en el uso de infraestructuras de últimas tecnológicas y de herramientas matemáticas y estadísticas de análisis y validación de datos lidar. En este sentido el GLEO ha considerado conveniente y oportuno realizar actividades de comparación de resultados de perfiles Lidar-UNAL, en primera instancia, de temperatura, humedad relativa, y presión, con el sistema Lidar CALIOP (Cloud-Aerosol Lidar with Orthogonal Polarization) a bordo del satélite CALIPSO (Cloud – Aerosol LIDAR Infrared Pathfinder Satellite Observations).

CALIOP proporciona perfiles geocalizados y calibrados de coeficiente de retrodispersión de atenuación total a 1064 y 532 nm y la despolarización lineal de la señal retrodispersada, permitiendo la discriminación de nubes y la identificación de la presencia de partículas de aerosol no esféricas. Una descripción completa puede verse en Winker et al. (2004).

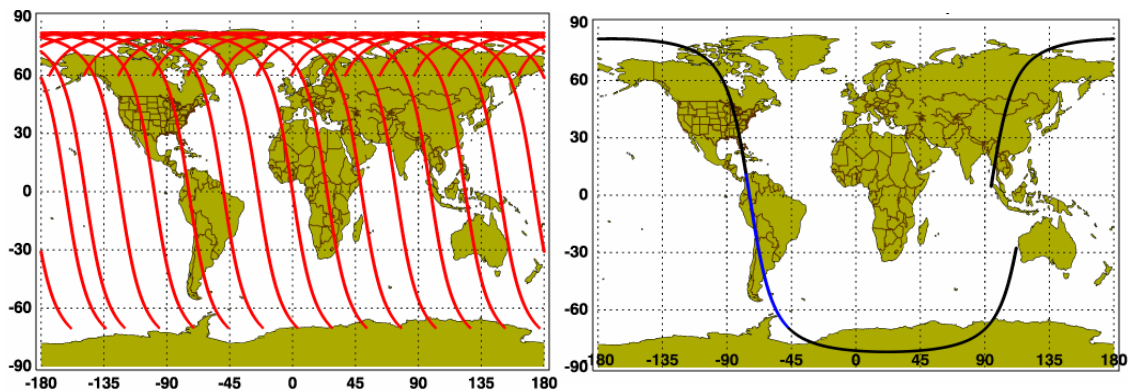
EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura A.1. Sistema satelital “A-Train” de la NASA



El satélite CALIPSO, tiene una trayectoria polar en sentido norte-sur en las regiones de la tierra donde es de noche y sur-norte en aquellas regiones donde es de día. Asociado con el movimiento de la tierra en sentido occidente – oriente, realiza una cobertura total del globo terrestre cada cierto intervalo de tiempo. En la siguiente figura se muestran las trayectorias diurnas de CALIPSO a escala global (izquierda), y el detalle de su paso por Suramérica (derecha).

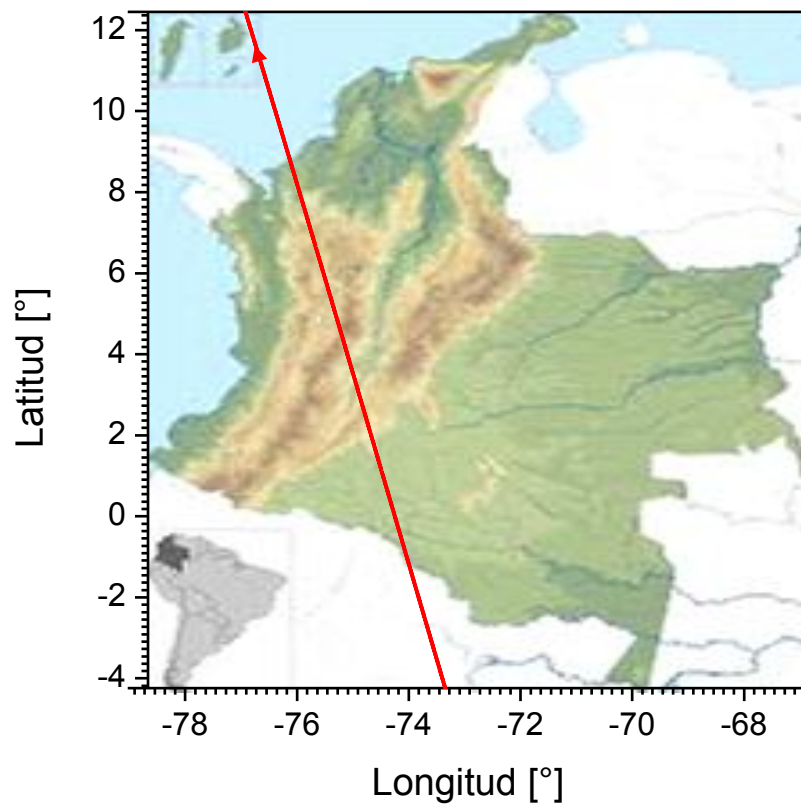
Figura A.2. Trayectorias diurnas de CALIPSO



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Sobre el territorio Colombiano la trayectoria diurna geolocalizada de CALIPSO atraviesa de Sur a Norte barriando gran parte del sistema montañoso de los andes como lo indica la línea roja en la siguiente figura.

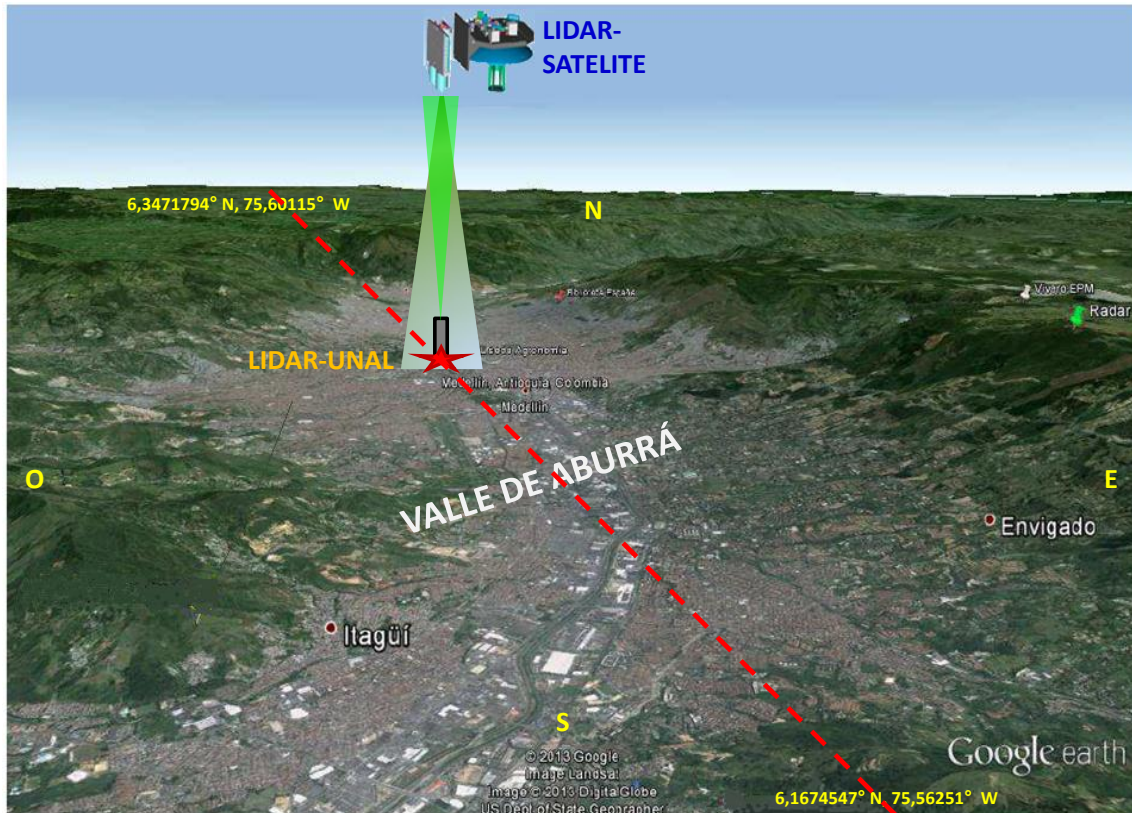
Figura A.3. Trayectoria diurna de CALIPSO sobre el territorio Colombiano



CALIPSO pasa cada 16 días sobre el Valle de Aburrá justo por su zona central, coincidiendo en su trayectoria con la ubicación de la estación LIDAR UNAL. Permitiendo así la correlación de las medidas hechas en dicha estación, con las realizadas por CALIPSO.

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Figura A.4. Trayectoria diaria de CALIPSO sobre el Valle de Aburrá



Trayectoria del satélite CALIPSO sobre el Valle de Aburrá (línea roja punteada), y su coincidencia espacial la estación LIDAR UNAL.

La región de intersección entre los conos de luz láser, representan la simultaneidad de registros de datos Lidar de las estaciones UNAL y CALIOP.

La comparación de las medidas entre los sistemas LIDAR-UNAL y CALIOP se realizaron teniendo en cuenta las fechas de sobre vuelo de CALIPSO sobre el Valle de Aburrá, de acuerdo al siguiente cronograma:

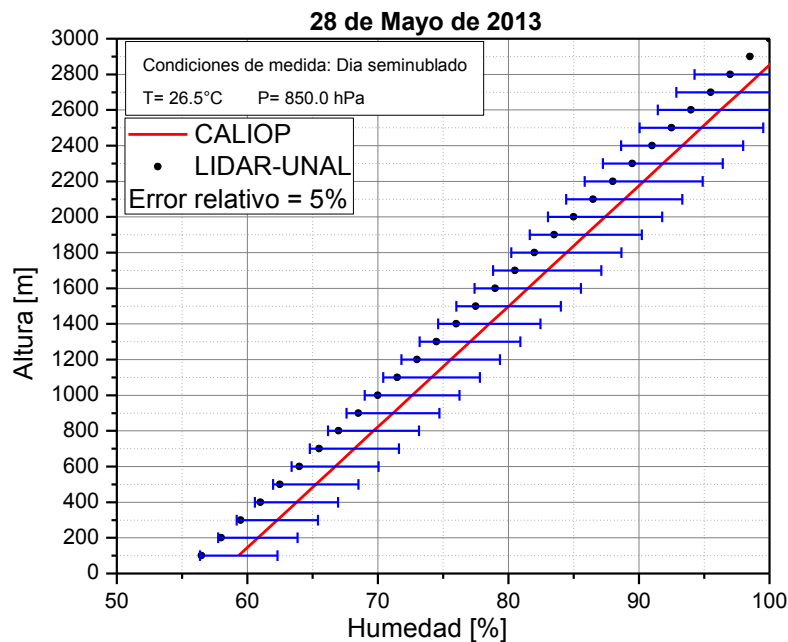
EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

Fecha (2013)		Hora local	Logitud de onda (nm)	Modo		Resol. Esp [m]		Muestreo [MHz]		Pulsos laser	
				Caliop	Lidar Unal	Caliop	Lidar Unal	Caliop	Lidar Unal	Caliop	Lidar Unal
Mayo	Martes 28	13:43:00	532	Análogo	Análogo	30	3.75	10	40	144000	72000
Junio	Jueves 13										
Julio	Lunes 15										
	Miércoles 31										

6.2 PERFILES DE HUMEDAD RELATIVA

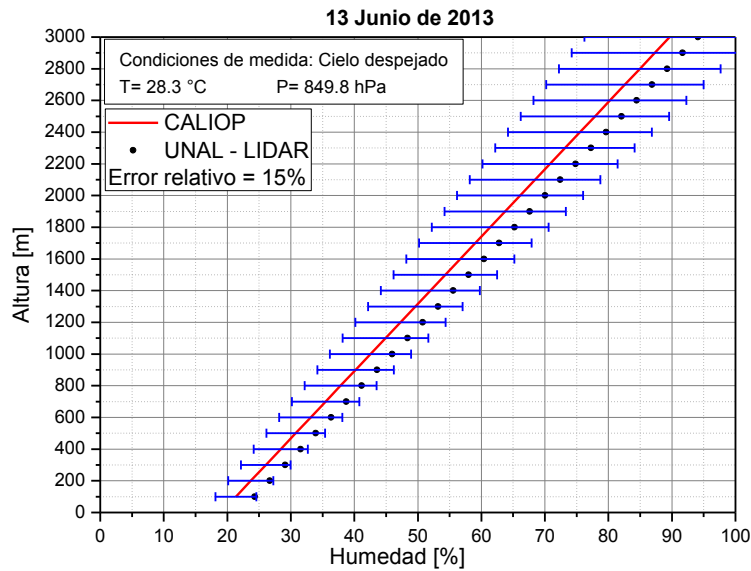
Altura medida sobre la Estación LIDAR. Resolución espacial: 15 m. Resolución temporal: 50 s.

Figura A.6.1. Humedad relativa días 28 de Mayo, 13 de Junio, 15 de Julio y 31 de Julio de 2013.

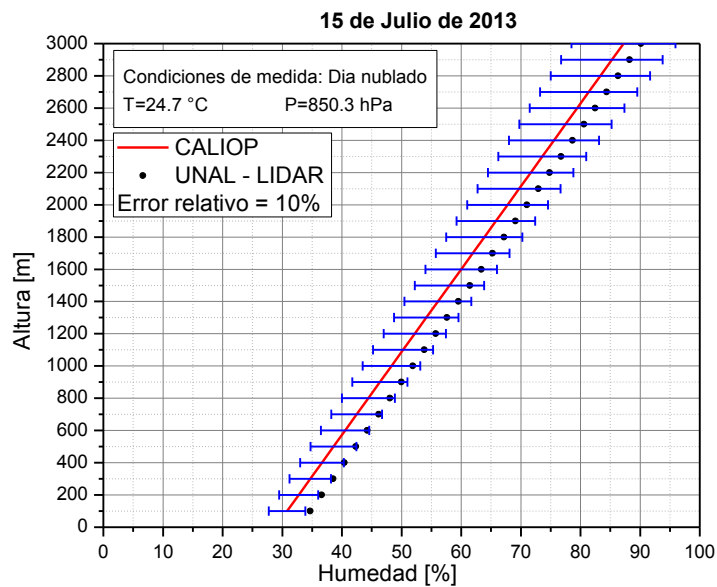


d) 28 de Mayo de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

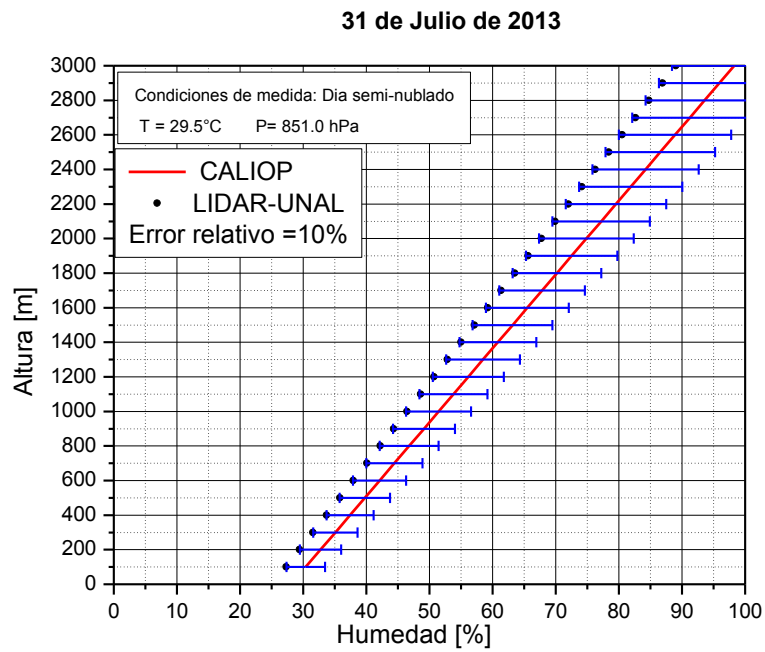


e) 13 de Junio de 2013



f) 15 de Julio de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



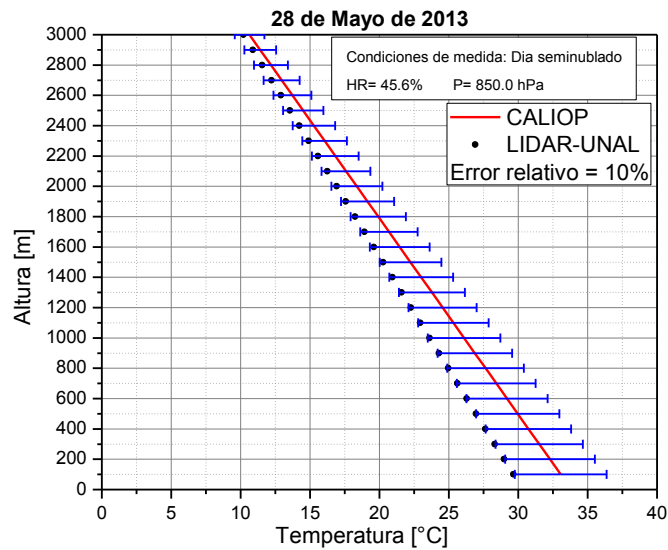
g) 31 de Julio de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

6.3 PERFILES DE TEMPERATURA

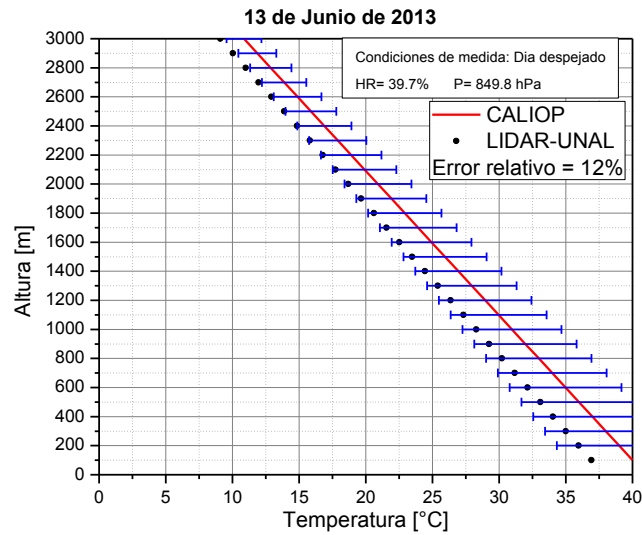
Altura medida sobre la Estación LIDAR-UNAL. Resolución espacial: 15 m. Resolución temporal: 50 s.

Figura A.6.2. Perfiles de Temperatura de los días 28 de Mayo, 13 de Junio, 15 de Julio y 31 de Julio de 2013.

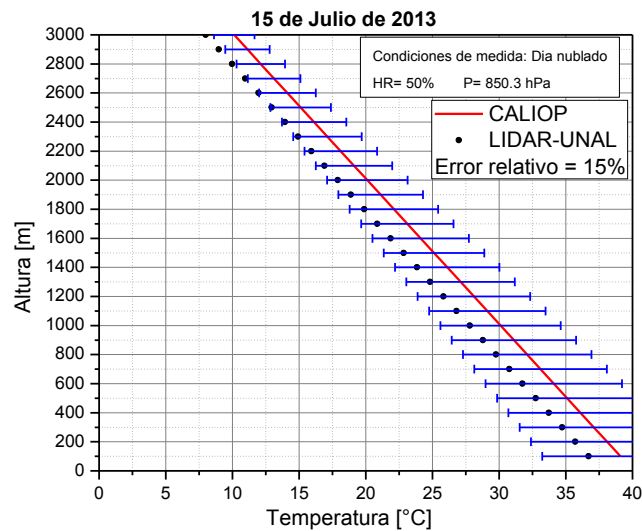


d) 28 de Mayo de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

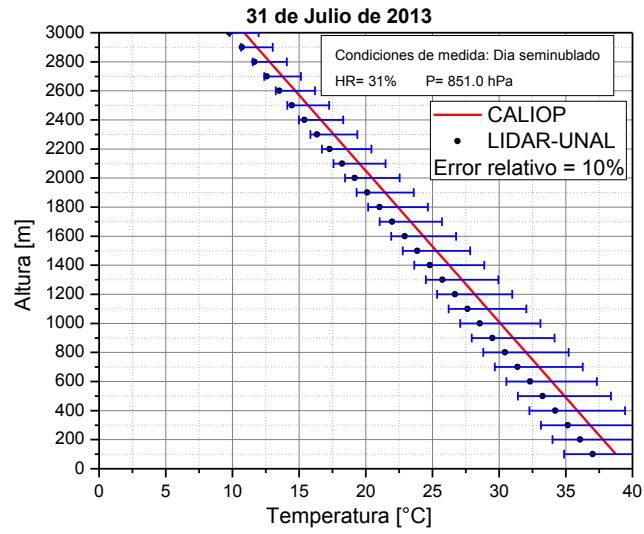


e) 13 de Junio de 2013



f) 15 de Julio de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



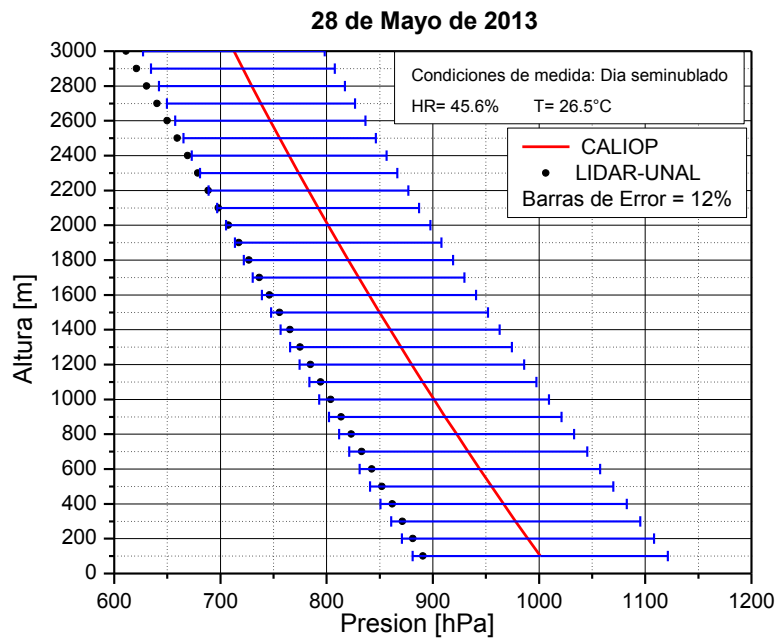
g) 31 de Julio de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

6.4 PERFILES DE PRESIÓN

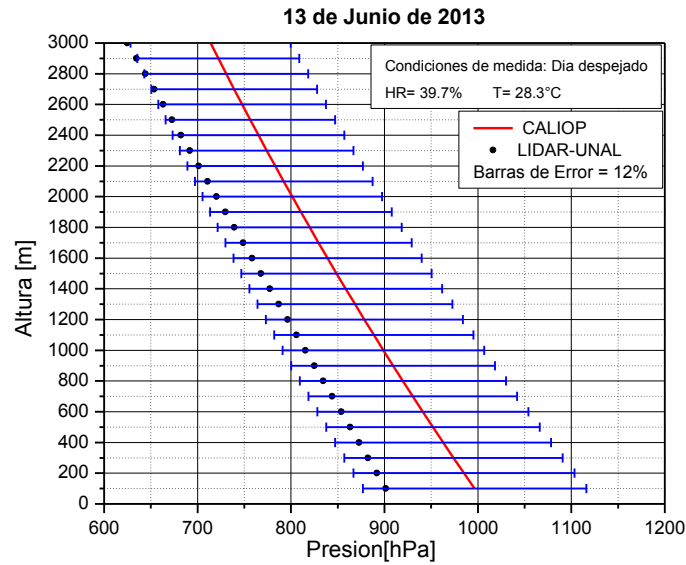
Altura medida sobre la Estación LIDAR-UNAL. Resolución espacial: 15 m. Resolución temporal: 50 s.

Figura A.6.3. Perfiles de Presión de los días 28 de Mayo, 13 de Junio, 15 de Julio y 31 de Julio de 2013.

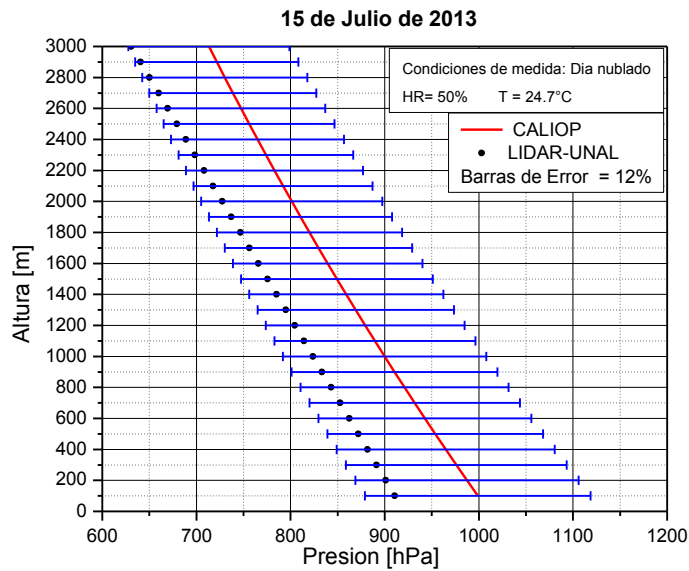


a) 28 de Mayo de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

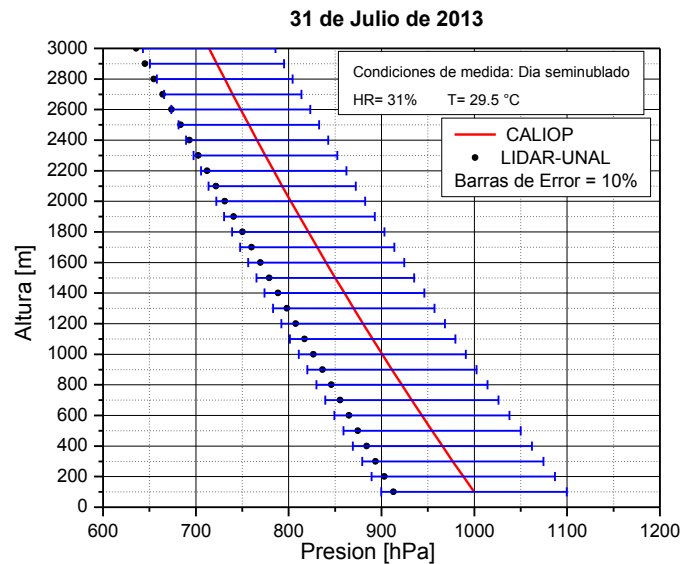


b) 13 de Junio de 2013



c) 15 de Julio de 2013

EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ



d) 31 de Julio de 2013

6.5 ANÁLISIS Y CONCLUSIONES

EL monitoreo atmosférico continuo realizado en la estación LIDAR- UNAL de la tropósfera baja de la ciudad de Medellín ha proporcionado información sobre el comportamiento de variables como temperatura, humedad relativa y presión sobre la zona de estudio. Los datos calibrados y validados del lidar CALIOP a través de sus algoritmos y protocolos estandarizados son un referente primordial para la estación en tierra.

En las figuras 6.1, 6.2, y 6.3, se ilustran las curvas de las variables de humedad relativa, temperatura, y presión respectivamente en función de la altura vertical de máximo 3000 m sobre el Valle de Aburrá. En este rango de altura, los perfiles presentan un comportamiento similar tanto para el Lidar-UNAL como para el Lidar CALIOP. Los puntos experimentales de los dos sistemas permiten establecer un análisis estadístico con un porcentaje de error relativo no superior al 15%.



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] V. A. Kovalev, W. E. Eichinger, Elastic LIDAR: Theory, Practice and Analysis Methods. Ed. John Wiley & Sons INC, (2004).
- [2] R. M. Measures, Laser Remote Sensing: fundamentals and applications. Malabar, Florida. Krieger Publishing Company, 524 p (1992).
- [3] D.J. Nisperuza, Diseño y construcción de un sistema óptico de monitoreo atmosférico aplicado a la determinación de la capa límite atmosférica en la ciudad de Medellín. Tesis de maestría. Colombia. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (2010).
- [4] K. Weitkamp, Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere, vol. 1. Springer Science, 466 p (2005).
- [5] Ian M. Brooks, Finding Boundary Layer Top: Application of a Wavelet Covariance Transform to Lidar Backscatter Profiles, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 20, 1092-1105 (2003).
- [6] D.N. Whiteman, Examination of the traditional Raman lidar technique. 1. Evaluation the temperature – dependent lidar equations, Appl. Opt. 42, (2003).
- [7] E. Montilla. Determinación de las propiedades de absorción de los aerosoles atmosféricos: aplicación en una zona sub-ártica de Noruega. Tesis doctoral. España. Universidad de Valladolid (2009).
- [8] Y. Morille, M. Haeffelin, P. Drobinski, J. Pelon, STRAT: An automated algorithm to retrieve the vertical structure of the atmosphere from single-channel lidar data, Journal of atmospheric and oceanic technology, vol 24 (2007)



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN
LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

- [9] J.D. Klett, Extinction boundary value algorithms for lidar inversion, *Applied optics*, vol. 25, No 15 (1986)
- [10] J.D. Klett, Stable analytical inversion solution for processing lidar returns, *Applied optics*, vol. 20, No 02 (1981)
- [11] D. Muller, U. Wandinger, D. Althausen, M. Fiebig, Comprehensive particle characterization from three-wavelength Raman-lidar observations: case study, *Applied optics*, vol. 40, No 27 (2001)
- [12] C. Sloane, Properties of aerosols – Comparison of measurements with model calculations, *Atmospheric Environment*, vol. 17, No 02 (1983)
- [13] C. Bockmann, A. Kirsche, Iterative regularization method for lidar remote sensing, *Computer physics communications* 174 (2006)
- [14] H. Baars et. al, Continuous monitoring of the boundary-layer top with lidar, *Atmospheric Chemistry and Physics* 8, 7281-7296 (2008).
- [15] D.J. Nisperuza, A.E Bastidas, Development of a tropospheric lidar for observations of the planetary boundary layer above Medellín, Colombia, *Journal of physical science and applications* 1 (2011)
- [16] S. Fan, B. Wang, M. Tesche, R. Engelmann, A. Althausen, J. Liu, W. Zhu, Q. Fan, M. Li, N. Ta, L. Song, K. Leong, Meteorological conditions and structures of atmospheric boundary layer in October 2004 over Pearl River Delta area, *Atmospheric Environment*, vol. 42(2008)
- [17] C. Bockmann, I. Mironova, D. Muller, L. Schneidenbach, R. Nessler, Microphysical aerosol parameters from multiwavelength lidar, *Optical Society of America*, vol 22, No 03 (2005)



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN
LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

- [18] R. Vergaz, Caracterización de aerosoles atmosféricos, Óptica pura y aplicada, vol. 34 (2001)
- [19] J.D. Klett, Lidar inversion with variable backscatter / extinction ratios, Applied optics, vol. 24, No 11 (1985)
- [20] J.D. Klett, Lidar calibration and extinction coefficients, Applied optics, vol. 22, No 04 (1983)
- [21] P. Pornsawad, C. Bockmann, C. Ritter, M. Rafler, III-posed retrieval of aerosol extinction coefficient profiles from Raman lidar data by regularization, Applied optics, vol. 47, No 10 (2008)
- [22] I. Mattis, A. Ansmann, D. Althausen, V. Jaenisch, U. Wandinger, D. Muller, Y.F. Arshinov, S.M. Bobrovnikov, I.B. Serikov, Relative-humidity profiling in the troposphere with a Raman lidar, Applied optics, vol. 41, No 30 (2002)
- [23] S.A. Cohn, W. M. Angevine, Boundary layer height and entrainment zone thickness measured by lidars and wind-profile radars, Journal of Applied Meteorology, vol 39 (2000)
- [24] M. Wachter, A. Rettenmeier, M. Kuhn, J. Peinke, Wind velocity measurements using a pulsed lidar system: first results, This work is part of the research project "Further development of LIDAR wind measuring techniques for the offshore test field - >> LIDAR <<" funded by the German Environment Ministry under the code number 0327642A
- [25] S. Lang, E. McKeogh, LIDAR and SODAR measurements of wind speed and direction in upland terrain for wind energy purposes, Remote Sensing, ISSN 2072-4292 (2011)



EVALUACIÓN DE LOS NIVELES DE CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA EN
LAS ZONAS URBANAS DEL VALLE DE ABURRÁ

[26] Handbook of optics vol II: Design, fabrication and testing; Sources and detectors; Radiometry and fotometry., Mc Graw Hill (2010).

[27] R.M Goody and Y.L.Young. Atmospheric Radiation: theoretical basis, California Institute of technology, copyright Oxford University Press, (1961- 1989).

[28] BRIZ Susana, TELEDETECCIÓN INFRARROJA DE GASES ATMOSFÉRICOS MEDIANTE ESPECTRORRADIOMETRÍA FTIR, Departamento de Física de la tierra, Astronomía y Astrofísica 1, Departamento de Ciencias Físicas, Universidad Complutense de Madrid, p.31 (2001)

[29] REQUENA Alberto, ZUÑIGA José, Espectroscopía, Cap. 4. Pearson Educación, España (2004).

[30] http://www.wmo.int/pages/prog/arep/gaw/gaw_home_en.html

[31] <http://gaw.empa.ch/gawsis/>

[32] <http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>

[33] <http://www-calipso.larc.nasa.gov>