



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Estudio de espesores ópticos de aerosoles atmosféricos usando radiometría solar resuelta espectralmente.**

**Mauricio Múnera Pérez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Escuela de Física  
Medellín, Colombia

2015



# **Estudio de espesores ópticos de aerosoles atmosféricos usando radiometría solar resuelta espectralmente.**

**Mauricio Múnera Pérez**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título  
de:

**Magister en Ciencias-Física**

Director (a):

Dr. Alvaro Efrain Bastidas Gustin

Línea de Investigación:

Óptica Atmosférica

Grupo de Investigación:

Láseres y Espectroscopía Óptica - GLEO

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias, Escuela de Física  
Medellín, Colombia

2015



*A mis padres y hermano por ser mi motor y  
por siempre estar a mi lado.*

*“El único lugar donde el éxito viene antes que el  
trabajo es en el diccionario”*

*Donald Kendall*

## Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mis padres Celina Pérez y Humberto Múnera y mi hermano Rafael Múnera por apoyarme en todos los momentos de mi vida y por siempre estar a mi lado. A ellos les dedico este trabajo y todos los triunfos que he tenido y los venideros. Además, aprovecho estas letras para resaltar el orgullo que siento para con mi familia, ya que siempre hemos estado juntos tanto en los pocos malos momentos por los que hemos pasado como en la gran cantidad buenos recuerdos que tenemos juntos. A parte de mi núcleo familiar le quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a todos mis tíos, primos y de más familiares que de una u otra forma aportaron un grano de arena para culminar este trabajo y que por motivos prácticos se hace imposible nombrar a cada uno de ellos.

A mi novia y amiga Martha Díaz quien es quizás una de las personas más felices (incluso más que yo) de que este trabajo haya culminado le agradezco por acompañarme y apoyarme siempre tanto en el desarrollo de este trabajo como en todos los aspectos de mi vida. Ojalá la vida nos tenga separados muchos momentos juntos...Te amo mi vida.

A mis amigos que de una u otra forma fueron esenciales para que este trabajo fuera posible: Andrés, Raúl, Carlos Andrés, Luis Fernando, Dairo, Diego, Daniel, Miguel, Juan y otros que en este momento se me escapan, muchas gracias por tantos consejos, asesorías y simples conversaciones.

En el ámbito académico muchas gracias al profesor Alvaro Bastidas por su constante asesoría y guía en el desarrollo de este trabajo y por abrirme de la mejor manera las puertas del grupo GLEO, a la escuela de física por apoyarme académicamente, al laboratorio de calidad del Aire CALAIRE encabezado por la profesora Carmen Elena Zapata por el trabajo en conjunto y la constante asesoría, a la red Latinoamérica de lidar

---

– LALINET por permitirme asistir a diferentes eventos académicos en los cuales las herramientas obtenidas fueron de gran utilidad en esta tesis, al profesor Lucas Alados por su asesoría en la parte final de este trabajo, por último mi más sincero agradecimiento a todas las personas que no alcanzo a nombrar pero que de una u otra forma ayudaron a que pudiera culminar satisfactoriamente mi tesis de Maestría en Ciencias – Física.





## Resumen

Los equipos de sensado remoto poseen la capacidad de obtener información a distancia de un objeto de interés. Este principio se aplica al estudio de la atmósfera en relación a la temática de la calidad del aire, el origen y transporte del aerosol, y el clima. En este trabajo se presentan los detalles del diseño, construcción, operatividad, calibración, y aplicación al estudio de la atmósfera terrestre de un radiómetro solar con resolución espectral. Equipo de medición que se ha integrado a actividades de monitoreo atmosférico que realiza el Grupo de Investigación Láseres y Espectroscopía Óptica – GLEO de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. En relación a las aplicaciones atmosféricas, se reportan los primeros resultados del análisis de espectros solares y la obtención del Espesor Óptico-AOD de las partículas de aerosol suspendidos en la atmósfera sobre la ciudad de Medellín. Estos resultados se han comparado con las mediciones realizadas con el Fotómetro solar de la red NASA – AERONET y con el sistema Lidar –UNAL, además se presenta la correlación con la concentración de material particulado PM2.5 en superficie, del Laboratorio de Calidad del Aire – CALAIRE.

**Palabras clave:** Espectrometría, Sensado remoto, aerosol atmosférico, Espesor óptico-AOD.



# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XV</b>
<b>Lista abreviaturas</b> .....	<b>XVI</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Espectroradiometría</b> .....	<b>3</b>
1.1 Fundamentos de la Espectroscopía.....	3
1.1.1 Fuentes de radiación.....	5
1.1.2 Monocromadores .....	6
1.1.3 Detectores.....	7
1.2 Sensado remoto atmosférico .....	9
1.2.1 Teledetección.....	9
1.2.2 Medidas atmosféricas con Espectroradiometría .....	11
1.2.3 Aerosoles atmosféricos .....	14
<b>2. Desarrollo de la técnica de Espectroradiometría</b> .....	<b>17</b>
2.1 Sistema Óptico .....	18
2.1.1 Captación y colimación de la luz solar.....	19
2.1.2 Óptica de entrada.....	22
2.1.3 Monocromador .....	23
2.1.4 Óptica de salida .....	24
2.1.5 Detector .....	24
2.2 Sistema Mecánico .....	27
2.3 Sistema Electrónico .....	28
2.3.1 Interruptores de fin de carrera .....	30
2.3.2 Motor de paso .....	31
2.3.3 Adecuación de la señal del fotomultiplicador.....	32
2.3.4 Interfaz de visualización y control.....	35
2.4 Ajustes y especificaciones del Espectroradiómetro.....	36
2.4.1 Calibración Espectral .....	36
2.4.2 Relación Señal Ruido.....	39
2.4.3 Repetitividad de los registros .....	40
<b>3. Metodología para el cálculo del espesor óptico de los aerosoles mediante Espectroradiometría</b> .....	<b>43</b>

---

3.1	Espesor óptico de los aerosoles - AOD .....	43
3.2	Cálculo de la masa óptica (m) y la distancia media Tierra-Sol ( $R^2$ ).....	45
3.2.1	Masa óptica .....	45
3.2.2	Distancia Tierra-Sol .....	46
3.3	Espesor óptico del Ozono .....	47
3.4	Espesor óptico Rayleigh.....	53
3.5	Método de calibración Langley .....	54
3.6	Cálculo del espesor óptico AOD del aerosol.....	57
<b>4.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>61</b>
4.1	Características generales de la región de estudio .....	62
4.2	Resultados del Espesor Óptico obtenido con el equipo EPR-UNAL .....	62
4.3	Comparación de los resultados de Espesor Óptico .....	64
4.3.1	Sistema Lidar-UNAL .....	64
4.3.2	Fotómetro Solar de NASA-AERONET .....	66
4.3.3	Concentración de aerosol de 2.5 micras de tamaño .....	71
<b>5.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>75</b>
<b>6.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>77</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 1-1:</b> Interacción radiación-materia .....	4
<b>Figura 1-2:</b> componentes generales de un sistema espectroscópico.....	5
<b>Figura 1-3:</b> Componentes básicos del Espectroradiómetro utilizado.....	8
<b>Figura 1-4:</b> Teledetección activa y pasiva.....	11
<b>Figura 1-5:</b> presupuesto de energía solar media en la tierra. En esta figura se no se muestran procesos como el efecto invernadero y la emisión de la atmósfera. (Kiehl, 1997) .....	13
<b>Figura 2-1:</b> Diseño del trazado de rayos con el software <b>TracePro</b> . .....	18
<b>Figura 2-2:</b> Evolución de las medidas de radiación directa. ....	20
<b>Figura 2-3:</b> Colimador y acople de la fibra óptica en el ocular del telescopio. ....	20
<b>Figura 2-4:</b> Respuesta espectral de la fibra óptica utilizada en el rango de operación del Espectroradiómetro (360nm hasta 650nm).....	21
<b>Figura 2-5:</b> Óptica de entrada. ....	22
<b>Figura 2-6:</b> Sistema monocromador.....	23
<b>Figura 2-7:</b> Módulo de detección del EPR.....	26
<b>Figura 2-8:</b> Curva de respuesta espectral del <b>PMT HAMAMATSU SERIE R300</b> . ....	27
<b>Figura 2-9:</b> Indicador visual de longitud de onda.....	28
<b>Figura 2-10:</b> Fotografía de la tarjeta de adquisición y control acoplada al EPR.....	29
<b>Figura 2-11:</b> Interruptores de fin de carrera. En el diagrama se observa el momento en el que el sensor ubicado en 250nm está siendo accionado.....	31
<b>Figura 2-12:</b> (a) Esquema electrónico conversor corriente-voltaje. (b) fotografía de la tarjeta implementada. ....	32
<b>Figura 2-13:</b> (a) esquema electrónico del filtro utilizado. (b) Simulación del filtro para una frecuencia de corte en 60Hz.....	33
<b>Figura 2-14:</b> Señal de oscuridad corregida con un filtro NOTCH. ....	34
<b>Figura 2-15:</b> Interfaz de control y visualización. ....	35
<b>Figura 2-16:</b> Esquema general del Espectroradiómetro.....	36
<b>Figura 2-17:</b> Calibración espectral con tres fuentes láser. ....	37
<b>Figura 2-18:</b> (Arriba) Respuesta espectral del Espectroradiómetro para la lámpara halógena de filamento. (Abajo) respuesta espectral del espectrómetro Perkin-Elmer Lambda 35 UV-VIS para la lámpara halógena de filamento. ....	38
<b>Figura 2-19:</b> Calibración espectral con una fuente extendida del tipo lámpara halógena de filamento de tungsteno B011 4620. ....	39
<b>Figura 2-20:</b> Relación Señal-Ruido.....	40
<b>Figura 2-21:</b> Estabilidad en la repetitividad de los registros obtenidos con el EPR. ....	40

<b>Figura 2-22:</b> Registro de intensidad luminosa en función de la frecuencia de medida del fenómeno bajo las mismas condiciones y a intervalos de tiempo inferiores a 3 minutos.	41
<b>Figura 3-1:</b> Variación de la distancia Tierra-Sol en función del día Juliano.	47
<b>Figura 3-2:</b> Mapa de color para la concentración de ozono en columna. Datos obtenidos del Espectrómetro TOMS del satélite AURA de la NASA.	48
<b>Figura 3-3:</b> Coeficiente de absorción del ozono en el rango 260 nm hasta 700 nm. Estos datos fueron obtenidos de la tabla 3-1.	49
<b>Figura 3-4:</b> Variación espectral del espesor óptico debido a moléculas (Rayleigh) según la expresión 3.10a.	53
<b>Figura 3-5:</b> Regresión lineal para una serie de medidas de $LnV\lambda$ en función de la masa óptica $m$ , para una longitud de onda de 400 nm. El círculo indica el valor correspondiente a $m=0$ por extrapolación.	55
<b>Figura 3-6:</b> Espectros utilizados para el método de calibración Langley.	56
<b>Figura 3-7:</b> Perfil de AOD y perfiles de corrección.	57
<b>Figura 3-8:</b> Diagrama esquemático para la inversión de señal de radiación solar directa a variable óptica (AOD).	58
<b>Figura 3-9:</b> Espectro de Transmitancia de la luz solar a través de la atmósfera.	59
<b>Figura 3-10:</b> Evolución del máximo valor de intensidad para una serie de espectros tomados antes y después del mediodía.	60
<b>Figura 3-11:</b> Valores de FWHM para los espectros registrados entre las 09:55 y las 12:30.	60
<b>Figura 4-1:</b> Evolución de espectros solares para el 13 de Julio de 2015.	62
<b>Figura 4-2:</b> Evolución del espesor óptico de los aerosoles para el 13 de Julio de 2015	63
<b>Figura 4-3:</b> Sistema lidar UNAL.	64
<b>Figura 4-4:</b> Comparación entre el AOD medido por el Espectroradiómetro y el Lidar para los días 14 y 16 de Septiembre del 2015	65
<b>Figura 4-5:</b> Fotómetro solar CIMEL CE-317.	67
<b>Figura 4-6:</b> Ubicación estaciones de monitoreo de aerosoles de la red AERONET.	68
<b>Figura 4-7:</b> Comparación entre el AOD medido por el Fotómetro solar y el Espectroradiómetro para 7 días con condiciones atmosféricas similares.	69
<b>Figura 4-8:</b> Impactor de material particulado PM2.5 del Laboratorio de Calidad del Aire – CALAIRE.	72
<b>Figura 4-9:</b> Evolución de la concentración de material particulado y el espesor óptico de los aerosoles para los días 09,10,13, 17, 21, 22 y 24 de Julio, y 14 de Septiembre	73

## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 2-1:</b> Especificaciones de la fibra óptica.....	21
<b>Tabla 2-2:</b> Selector de tamaño para las rendijas de entrada y salida .....	24
<b>Tabla 2-3:</b> Características del <b>PMT HAMAMATSU SERIE R300</b> . ....	25
<b>Tabla 2-4:</b> Variaciones del pico de mayor intensidad en los diez espectros obtenidos del láser de He-Ne. ....	41
<b>Tabla 3-1:</b> Coeficiente de absorción del ozono. ....	50
<b>Tabla 4-1:</b> Calendario de medidas con el espectroradiómetro (año 2015). ....	61
<b>Tabla 4-2:</b> Comparación entre las medidas de AOD con Espectroradiometría y Lidar para los días 19 de Agosto y 09,22 de Septiembre de 2015.....	66

## Lista abreviaturas

Abreviatura	Término
AERONET	AERosol RObotic NETwork
AOD	Aerosol Optical Depth
UNAL	Dimension fundamental
CALAIRE	Laboratorio de Calidad del Aire
EPR	Espectroradiómetro
FWHM	Full Width at Half Maximum
GLEO	Grupo de Investigación Láseres y Espectroscopía óptica
He-Ne	Helio – Neón
Lidar	Light Detection And Ranging
NASA	National Aeronautics and Space Administration
Nd:YAG	Neodimio YAG
PM2.5	Material particulado menor o igual a 2.5 micras
PMT	Tubo fotomultiplicador
SIATA	Sistema de Alerta temprana de Medellín y el Valle de Aburrá
UNAL	Universidad Nacional de Colombia







# Introducción

Los aerosoles atmosféricos se constituyen en un importante componente atmosférico, su origen puede ser natural en el caso de emisiones volcánicas, quemas forestales, vida vegetal, brisas marinas, etc. y de origen antropogénico (humano) cuando son resultado de: emisiones vehiculares, emisiones industriales, partículas minerales que surgen de procesos industriales, entre otros. Los aerosoles son sustancias sólidas y líquidas suspendidas en un medio gaseoso, cuyo tamaño aproximado varía entre  $0.001 \mu\text{m}$  hasta algunas decenas de  $\mu\text{m}$ . Estas partículas juegan un papel de suma importancia en la dinámica atmosférica, indirectamente por su interacción con la radiación del sol, ya que pueden modificar el balance radiativo entre la superficie de la tierra y la atmósfera, e indirectamente por los cambios que producen sobre las propiedades ópticas y microfísicas de las nubes.

La teledetección atmosférica y el estudio de las propiedades de los aerosoles atmosféricos, es una temática relativamente nueva en Colombia y gracias a los avances en este campo por parte del grupo GLEO y el trabajo conjunto con el Laboratorio de Calidad del Aire de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín se ha desarrollado un sistema Lidar troposférico operando con un telescopio Newtoniano de 20 cm de diámetro, un láser Nd:YAG multiespectral de 400 mJ por pulso, 10 Hz de frecuencia de repetición, y 6 ns de duración del pulso, óptica de detección a base fotomultiplicadores de alta eficiencia cuántica, filtros de interferencia de banda-angosta, y un sistema de adquisición y registro de señal ultra-rápido. Además del sistema Lidar, gracias al convenio NASA-AERONET, las medidas de las propiedades ópticas de los aerosoles se pueden complementar con un Fotómetro solar de la red AERONET y con un impactor de partículas PM 2.5 del Laboratorio de Calidad del Aire – CALAIRE que brinda información sobre el nivel de partículas precipitadas como resultado de la evolución de los aerosoles.

Sin embargo esta tecnología de monitoreo de atmósfera necesita de otros instrumentos y de otras técnicas complementarias. Los aerosoles juegan un rol importante en la dinámica atmosférica, sin embargo sus características y propiedades ópticas, físicas y químicas no son sencillas de determinar. En este trabajo se presenta el proceso de diseño y adecuación de un instrumento pasivo el cual registra espectros solares en una banda continua de longitudes de onda y en tiempo real, con el propósito de cuantificar los espesores ópticos de aerosoles - AOD en la baja troposfera, cubriendo un grupo de longitudes de onda intermedias, (banda Ultravioleta-Visible), en comparación con las que usan el lidar y el fotómetro solar.

El EPR utiliza como fuente luminosa el Sol, y dispone de un sistema de seguimiento angular solar recolectando una porción de esta luz a través de un pequeño telescopio acoplado a una fibra óptica que se encarga de transportarla hasta la ventana de entrada del EPR. En adelante, un sistema de separación espectral especializado en la región UV-VIS del espectro electromagnético, mide las intensidades de cada línea espectral y las dirige hasta un detector tipo fotomultiplicador, el cual convierte de manera proporcional la intensidad luminosa en señal eléctrica. Finalmente, este tipo de señales serán registradas en un computador desde donde se analizarán a través de algoritmos de inversión con miras a determinar el espesor óptico de los aerosoles comprendidos en la capa límite de la atmósfera.

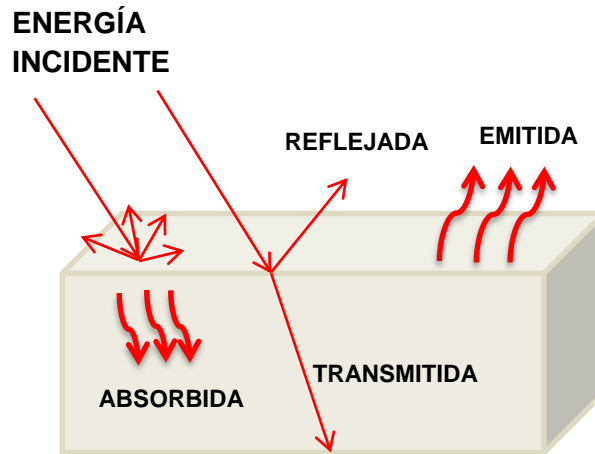
La radiación solar que llega a la superficie terrestre, es el resultado de la atenuación debido a diferentes componentes atmosféricos, en este sentido, se desarrolló una metodología para determinar la contribución debida únicamente a los aerosoles, la cual depende de diversos factores como: la distancia Tierra-Sol, la ubicación geográfica del sitio de estudio, la posición del Sol, la contribución del ozono, la contribución molecular de la atmósfera y la intensidad solar extraterrestre.

# 1. Espectroradiometría

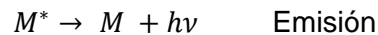
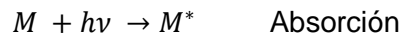
## 1.1 Fundamentos de la Espectroscopía

La Espectroscopía tiene sus orígenes en el año 1665, cuando Isaac Newton encontró que al pasar luz blanca por un prisma (elemento dispersor), esta se descomponía en todos sus colores; hecho que le sirvió a este científico para demostrar que la luz solar está compuesta por diferentes longitudes de onda. Luego en 1802 el científico inglés William Wollastom construyó un espectroscopio que descomponía la radiación solar en todas sus longitudes de onda, mediante este experimento pudo evidenciar las líneas de oscuridad del espectro solar. Este instrumento estaba compuesto de una rendija por la cual ingresaba la radiación, luego una lente que transformaba la luz en rayos paralelos que atravesaban un prisma y se dispersaban. (Schrenk, 1986)

La Espectroscopía se encarga de estudiar la interacción entre la radiación y la materia, como consecuencia a dos procesos básicos: absorción y emisión. Estos dos fenómenos son posibles, debido a que la radiación entrega parte de su energía al material, provocando que este se promueva a un estado de mayor excitación. El proceso de emisión ocurre cuando un material en estado de mayor energía decae a su estado base como consecuencia del principio de mínima energía, en este caso puede ocurrir que ese exceso de energía sea emitida en radiación electromagnética. Como consecuencia de los procesos mencionados, también puede ocurrir que la radiación sea reflejada o dispersada, dando lugar a pérdidas en la intensidad inicial (de acuerdo al porcentaje de radiación que refleje el objeto). Además, es posible (con mayor frecuencia en materiales transparentes) que la radiación se transmita a través del medio. En la figura 1-1 se muestra mediante una ilustración, los procesos básicos en la interacción radiación-materia. (Requena, 2004)

**Figura 1-1:** Interacción radiación-materia

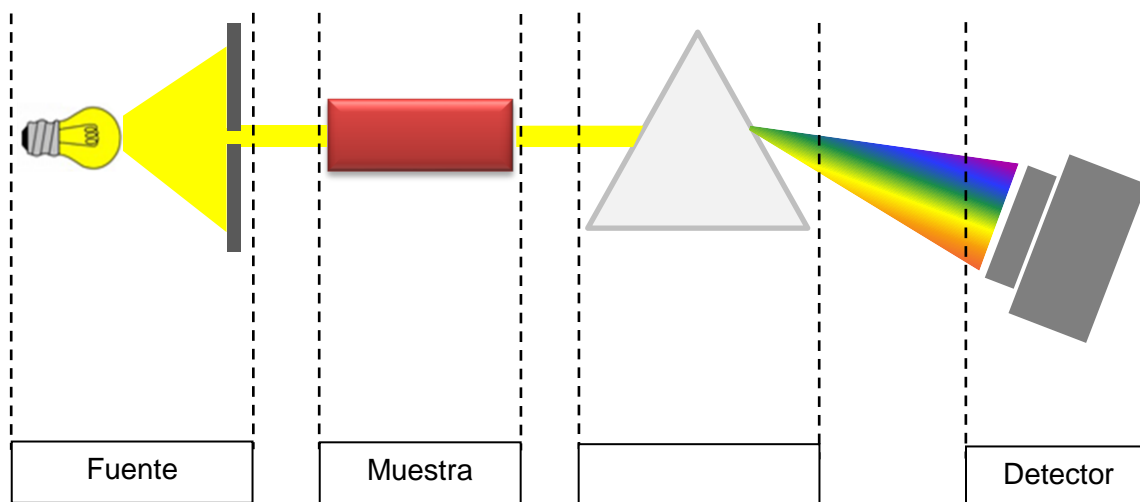
O por sus ecuaciones:



Donde  $M$  es la especie no excitada,  $h\nu$  es la energía del fotón y  $M^*$  es la especie excitada.

Según los conceptos anteriores, la espectroscopia es la rama de la física más idónea para realizar estudios atmosféricos, ya que por medio de luz es posible conocer algunas de las propiedades físicas, químicas, ópticas y radiativas de la atmósfera terrestre.

Todo equipo de medición espectroscópico debe tener tres componentes fundamentales (fuente de radiación, monocromador y detector) para obtener información sobre las propiedades físicas, químicas, ópticas y radiativas de cierto objeto de interés (muestra). En la Figura 1-2 se muestra un esquema genérico de la ubicación de cada uno de los componentes activos de un sistema espectroscópico general. (Olsen, 1986)

**Figura 1-2:** componentes generales de un sistema espectroscópico.

### 1.1.1 Fuentes de radiación

Una fuente de radiación ideal debe ser continua en una amplia zona del espectro y que su intensidad no varíe apreciablemente con la longitud de onda. A continuación se describen algunas según su tipo de funcionamiento: (BENTHAM, 2014; Olsen, 1986; Requena, 2004)

- **Fuentes incandescentes:** Emite principalmente en el visible e IR, su rango espectral es relativamente grande con respecto a fuentes de descarga eléctrica y fuentes láser.

- **Fuente de descarga eléctrica:** Se utilizan en la región del UV. Este tipo de fuentes consiste en hacer pasar una corriente electrónica por un tubo que contenga un gas y debido a las colisiones entre electrones y moléculas se provoca excitación electrónica, vibracional y rotacional.

- **Fuentes láser:** Este tipo de fuentes utilizan radiación láser generalmente de alta potencia y por lo general son tienen un ancho espectral relativamente angosto. Su rango puede variar desde el Ultravioleta, pasando por el Visible, hasta el Infrarrojo.

-**Fuentes Naturales:** Estas fuentes se utilizan en la teledetección pasiva y su rango está comprendido entre el UV, VIS e IR, la más utilizada es el Sol, aunque existen en la

actualidad equipos que captan la radiación proveniente de la luna para complementar las medidas diurnas. Para el desarrollo de este trabajo (sensor remoto pasivo), la fuente de radiación será el Sol.

### 1.1.2 Monocromadores

Este elemento es el encargado de separar espectralmente la radiación en sus diferentes colores para lograr que el detector registre por separado cada longitud de onda, aunque en la práctica es imposible lograr una separación perfecta debido al solapamiento de las longitudes de onda más próximas. A continuación se ilustran dos tipos de monocromadores: (BENTHAM, 2014; Olsen, 1986)

- **Prismas:** la separación espectral en prismas se da debido a que cuando la radiación incide sobre un dieléctrico de placas no paralelas, se cambiará la dirección del haz refractado en cada longitud de onda, ya que la velocidad de la luz en cualquier medio diferente al vacío es diferente para cada color.

La capacidad de un prisma para dispersar la radiación se caracteriza por su dispersión angular ( $d\theta/d\lambda$ ), esta es una medida que indica que tan separados están dos rayos que difieren en longitud de onda ( $d\lambda$ ), la dispersión angular se puede expresarse de la siguiente forma:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} \approx \frac{\Delta\theta}{\Delta\lambda} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{\lambda_2 - \lambda_1} = \frac{d\theta}{dn} \frac{dn}{d\lambda} \quad (1.1)$$

Donde  $n$  es el índice de refracción del medio. El término ( $d\theta/dn$ ) es estrictamente geométrico, mientras que el factor ( $dn/d\lambda$ ) es una propiedad característica del material del prisma y se conoce como dispersión del prisma.

- **Red de difracción:** una red de difracción es un elemento óptico que está formado por una gran cantidad de ranuras y al igual que el prisma separa la radiación incidente en un espectro continuo, pero con la ventaja de no presentar dispersión no lineal y la desventaja de carecer de pureza espectral (no existe solapamiento de diferentes longitudes de onda). Para una red de difracción la dispersión angular viene dada por:



$$\frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\theta} \quad (1.2)$$

La ecuación muestra algunas características importantes:

1. Para diferencias de  $d\lambda$  pequeñas, la separación angular es proporcional al orden de difracción  $m$ .
2. La separación angular  $d\theta$  es inversamente proporcional a la separación entre dos ranuras consecutivas  $d$ . este parámetro indica que entre más ranuras contenga la red o entre más estén juntas, mayor será el ancho del espectro.
3. Si se supone que el  $\cos\theta$  es prácticamente constante, la dispersión angular será también casi invariante (dispersión lineal), caso contrario de lo que ocurre con el prisma, ya que este tiende a curvar más las longitudes de onda cortas.

El poder de resolución en un prisma indica la capacidad que tiene el elemento para separar dos líneas espectrales:

$$R = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}, \quad \text{donde } \lambda \text{ es la longitud de onda media entre dos líneas y } \Delta\lambda \text{ su separación.}$$

El monocromador utilizado en este trabajo es una red de difracción, en el capítulo 2 se describe en detalle el tipo de red utilizada y los elementos que conforman el sistema de monocromado en un espectroradiómetro.

### 1.1.3 Detectores

Existe una gran cantidad de detectores para análisis espectroscópicos, pero básicamente todos tienen la tarea de convertir la energía electromagnética en una corriente eléctrica que pueda ser cuantificada mediante algún software. (BENTHAM, 2014; Olsen, 1986)

- **Fotodiodos:** Este tipo de detectores están contruidos en base a materiales semiconductores, generalmente este tipo de detectores se utilizan para realizar estudio en el rango UV-IR, aunque con fotodiodos de silicio se puede extender el rango de operación hasta el ultravioleta

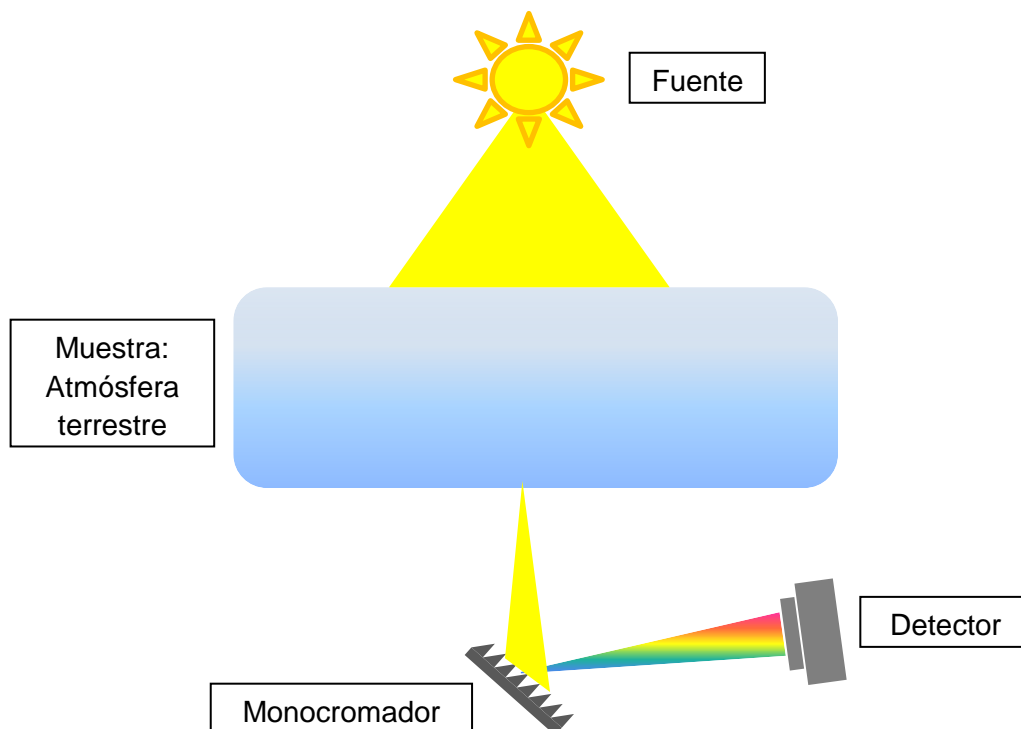
- **Fotomultiplicador (PMT):** Son un tipo de fototubos en el vacío, de respuesta rápida y sensibilidad muy elevada. Este tipo de detectores poseen la capacidad de amplificar señales muy bajas debido a que la cantidad de fotones que llega al fotocátodo produce los electrones primarios, estos a su vez son acelerados por una diferencia de potencial

---

hasta que llegan a otra superficie sensible, de forma que cada electrón primario es capaz de producir 4 o 5 electrones secundario. Este proceso se puede repetir varias veces. El detector utilizado en este proyecto es un tubo fotomultiplicador, ya que este tipo de detectores poseen una alta respuesta en el rango de interés y su respuesta es relativamente alta para bajos niveles de radiación incidente. (HAMAMATSU, 1998)

En el marco de este trabajo, la atmósfera terrestre se constituye en el objeto de estudio (muestra). En la figura 1-3 se ilustra un diagrama con la ubicación de los elementos principales del Espectroradiómetro (fuente, monocromador y detector) implementado para medidas de espesor óptico de los aerosoles atmosféricos.

**Figura 1-3:** Componentes básicos del Espectroradiómetro utilizado.



## 1.2 Sensado remoto atmosférico

### 1.2.1 Teledetección

La teledetección es la ciencia que permite obtener información acerca de un objeto o un fenómeno a través del análisis de datos adquiridos con cierto dispositivo que no se encuentra en contacto con el objeto o fenómeno de estudio. La radiación electromagnética es la encargada de interactuar con el objeto bajo estudio y como consecuencia de los procesos ya mencionados (absorción y emisión) es posible coleccionar una porción de esta radiación de modo que el conocimiento de algunas propiedades de este objeto sea posible. Además, la teledetección se puede considerar como una técnica de medición limpia, ya que la muestra bajo estudio no se ve afectada durante el proceso de medición. (Kumar, 2005)

Aunque existen dos tipos de teledetección, sistemas de este tipo cuentan con los siguientes elementos:

1. Fuente de radiación electromagnética que ilumine el objeto de estudio.
2. Interacción con el objetivo, este parámetro depende tanto de la naturaleza misma del objeto como del tipo de radiación utilizada.
3. Cuantificación de la radiación electromagnética por un detector óptico. Esta radiación proviene del objeto de estudio luego de que sea dispersada o emitida por este.
4. Transmisión y procesamiento electrónico de la información suministrada por el sensor óptico.
5. Interpretación y análisis, este proceso puede ser visual o digital. En este punto se obtiene información acerca del objeto de estudio.

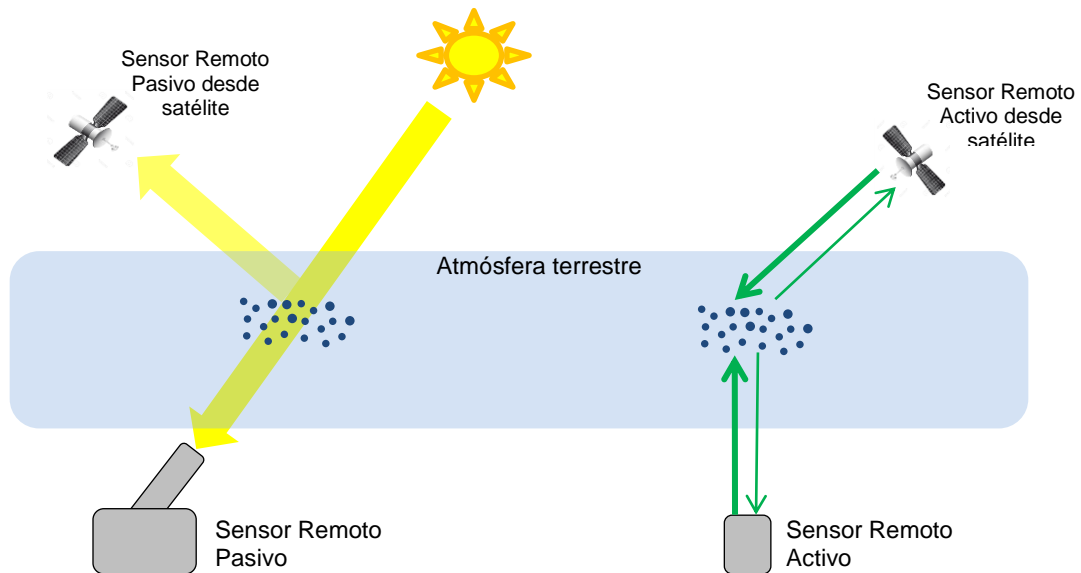
**Teledetección activa:** Los sistemas de teledetección activa cuentan con una fuente de luz propia del sistema (por ejemplo un láser de alta potencia). Este tipo de equipos envían radiación directamente hacia el objeto de estudio, luego una porción de la radiación que es dispersada por el objeto se detecta por el sensor óptico. En la teledetección activa se tiene la ventaja de que la fuente de radiación al ser propia del

---

sistema se tiene la posibilidad de realizar mediciones en cualquier momento, además mediante esta técnica es posible estudiar espectralmente el objeto de estudio con longitudes de onda que no sean suficientemente proveídas por el Sol u otra fuente natural. Sin embargo sistemas activos requieren la generación de una gran cantidad de energía para iluminar adecuadamente el objeto de estudio. Entre este tipo de sistemas se encuentran los radares de micro-ondas, sistemas Lidar, Ceilómetros, entre otros. (Kumar, 2005; Sobrino, 2001; Nisperuza, 2010)

**Teledetección pasiva:** Los sensores remotos pasivos utilizan una fuente de radiación natural como el Sol o la Luna, el inconveniente de este tipo de sistemas es que solo pueden realizar mediciones durante ciertos periodos, por ejemplo en el caso de medidas con el sol, únicamente se será en el día. Pero en relación a los sistemas activos, este tipo de sensores son más livianos instrumentalmente, ya que no requieren una fuente de radiación artificial de alta potencia. Entre este tipo de sensores se encuentra el fotómetro solar, el espectralradiómetro, el MAX-DOAS, radiómetros embarcados en satélites, entre otros. (Rollin, 2011)

Si se desea comparar ambas técnicas entre sí, no es correcto afirmar que una tiene más ventajas sobre la otra, por el contrario, la combinación de estas permite complementar y retroalimentar las mediciones sobre un sistema bajo estudio como por ejemplo la atmósfera terrestre. Un Espectralradiómetro el cual es el objeto de este trabajo investigativo, se acopla a las labores de medida realizadas por el sistema Lidar y el Fotómetro solar de la red NASA-AERONET para formar una red de sensores remotos la cual es operada por el Grupo Láseres y Espectroscopía Óptica – GLEO de la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín. En la figura 1-4 se muestra un esquema general del modo de funcionamiento de los tres sensores remotos operados por el GLEO.

**Figura 1-4:** Teledetección activa y pasiva

### 1.2.2 Medidas atmosféricas con Espectroradiometría

Como se ha explicado en este capítulo, un sistema espectroradiométrico permite obtener información en relación a cierto objeto de interés, para este trabajo en primera instancia la atmósfera terrestre corresponde a dicho objeto. Cuando la radiación solar ingresa a la atmósfera sufre una atenuación como resultado de la interacción con los principales componentes atmosféricos, como gases, y partículas líquidas y/o sólidas en suspensión, los principales mecanismos de esta pérdida de energía son:

**Dispersión:** En este proceso la radiación electromagnética sufre un redireccionamiento de su energía en diferentes direcciones. En el caso más sencillo esta dispersión es inelástica, de manera que la longitud de onda individual del fotón que interactuó con cierto sistema atmosférico, permanecerá constante, además los fotones incidentes no llegan a formar parte de la energía interna de la partícula interactuante. Cuando el haz de luz dispersado difiera en longitud de onda con respecto al incidente, Será dispersión inelástica. (Pérez, 2010)

**Absorción:** en este mecanismo, el fotón incidente hace que la energía interna del sistema interactuante aumente, por consiguiente también su temperatura aumentará.

---

La cualidad que tenga un medio para absorber y dispersar la radiación, se puede cuantificar por sus coeficientes de absorción  $\sigma_a(\lambda)$  y dispersión  $\sigma_s(\lambda)$  respectivamente. La suma de estos coeficientes da lugar a la extinción total de la partícula  $\sigma_e(\lambda)$ . (Pérez, 2010)

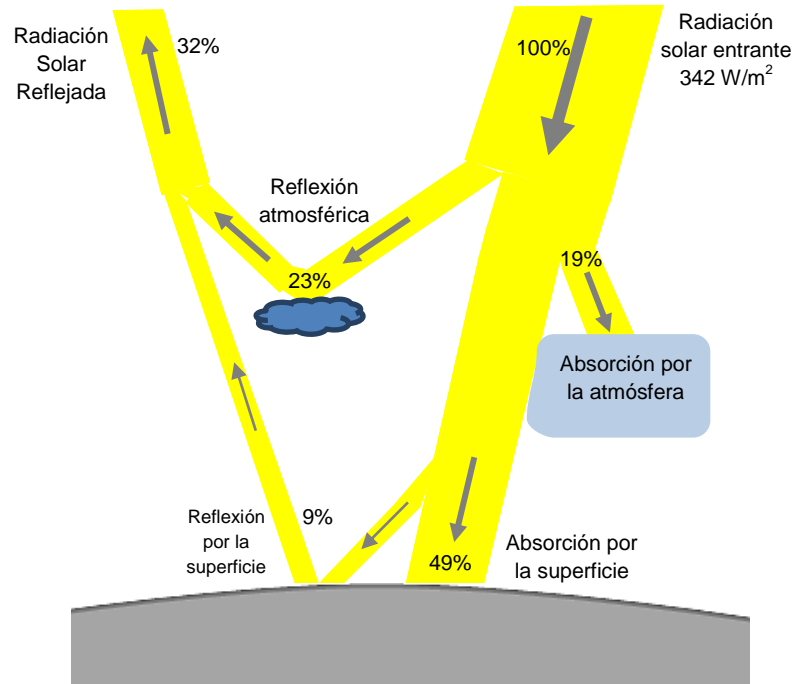
En relación a la radiación solar que alcanza el tope de la atmósfera, aproximadamente el 23% es reflejado hacia el espacio exterior, del porcentaje restante, el 19% es absorbido por la atmósfera (principalmente por el vapor de agua, CO<sub>2</sub> y ozono). El 49 % restante se transmite a través de la atmósfera y alcanza la superficie terrestre, donde el 9% es reflejado de nuevo por la superficie terrestre este proceso se evidencia en la figura 1-5. La cantidad de radiación que alcanza la superficie terrestre contiene información acerca de los principales componentes atmosféricos y sus propiedades fundamentales, entonces es necesario conocer con buena precisión la composición espectral e intensidad de la radiación solar en el tope de la atmósfera (método Langley), de manera que el equipo en tierra pueda hacer un estimativo de la extinción total debido a gases, moléculas y partículas presentes en la atmósfera, ver figura 1-6. (Kiehl, 1997)

El detector de un espectroradiómetro en tierra mide la intensidad de la radiación solar extinguida por todos los procesos y componentes atmosféricos  $I_t$ , esta cantidad se puede descomponer como la suma de las contribuciones para cada sistema absorbente o dispersor en el rango espectral de interés. Para este trabajo, el rango de operatividad del sistema está comprendido entre 260nm – 650nm; en este intervalo el Ozono (O<sub>3</sub>) absorbe en bandas bien definidas, Además, también se debe conocer el efecto de dispersión debido a partículas y moléculas.

### **Absorción de Ozono**

El Ozono es un gas en suspensión cuya molécula está compuesta por tres átomos de oxígeno, el cual se forma como resultado de la disociación de dos átomos de oxígeno generalmente por la destrucción con radiación ultravioleta del enlace entre los dos átomos. Cada átomo liberado forma moléculas de Ozono (O<sub>3</sub>) al unirse a una de oxígeno gaseoso (O<sub>2</sub>). (Hansen, 1974)

**Figura 1-5:** presupuesto de energía solar media en la tierra. En esta figura se no se muestran procesos como el efecto invernadero y la emisión de la atmósfera. (Kiehl, 1997)



La absorción gaseosa del Ozono es un proceso discreto ya que tiene lugar en ciertas bandas específicas del espectro emitido por el Sol. Para determinar el efecto del Ozono sobre la radiación solar, primero debe estimarse su transmitancia, la cual depende de la masa de aire, el coeficiente de absorción del ozono en función de la longitud de onda y la concentración de ozono expresada en unidades Dobson.

### **Dispersión Rayleigh**

Esta dispersión tiene lugar cuando el tamaño de la partícula es menor que la longitud de onda con la cual interactúa, a diferencia de la absorción este proceso es continuo y depende principalmente de las moléculas suspendidas en el aire. Al igual que el ozono, para determinar el efecto sobre la radiación solar netamente debido a la dispersión Rayleigh se debe conocer su espesor óptico. En la literatura podemos encontrar varias expresiones empíricas para el espesor óptico debido a moléculas (Rayleigh), pero en general dependen de la longitud de onda y la presión atmosférica en el lugar donde se encuentre el equipo de medida. (Nisperuza, 2010)

### **Dispersión por partículas - Mie**

La dispersión por partículas o también conocida como dispersión Mie, fue formulada a principios del siglo XX por el meteorólogo Alemán Gustav Mie aplicando la teoría electromagnética en el proceso de interacción radiación-materia, tomando el caso particular en el que tanto el tamaño de la partícula como la longitud de onda del haz de radiación incidente sean de dimensiones comparables. En esta teoría se tiene en cuenta el tamaño y la forma de la partícula, además, se considera la dispersión por partículas independientes, de modo que la intensidad de la luz dispersada sea proporcional al número de partículas dispersoras.

Según el rango de tamaños de los aerosoles atmosféricos, su interacción con la radiación solar se puede entender principalmente como un proceso de dispersión Mie. En este trabajo los aerosoles atmosféricos son el objeto de estudio, en este sentido es necesario conocer en primera instancia su origen y sus principales características, antes de evaluar su espesor óptico (Baron, 1994; Toledano C. , 2005).

### **1.2.3 Aerosoles atmosféricos**

Los aerosoles son sustancias sólidas y líquidas suspendidas en un medio gaseoso, cuyo tamaño aproximado varía entre 0.001  $\mu\text{m}$  hasta algunas decenas de  $\mu\text{m}$ ; su ubicación es por lo general en la tropósfera y su concentración es variable ya que su tiempo de vida es de aproximadamente una semana. Los aerosoles son en buena medida los responsables de cambios climáticos y la calidad del aire que respiramos, entonces su estudio es de gran importancia debido a que estos no solo se ven afectados por la dinámica atmosférica, sino que también son capaces de modificarla. Su origen puede ser natural en el caso de emisiones volcánicas, quemas forestales, vida vegetal, brisas marinas, etc. y de origen antropogénico (humano) cuando son resultado de: emisiones vehiculares, emisiones industriales, partículas minerales que surgen de procesos industriales, entre otros. (Baron, 1994)

Se denomina aerosol atmosférico a las partículas que cumplen con las siguientes características. (Meszaros, 1991):



1. Velocidad de sedimentación relativamente corta: La principal fuerza que actúa sobre los aerosoles es la gravedad, esto determina que el tiempo de vida de este tipo de partículas es definido por su velocidad de sedimentación. Si el radio de las partículas es mayor que el camino libre de las moléculas del gas, la velocidad de caída (sedimentación) toma la siguiente forma:

$$v_s = \frac{2 r^2 \rho_p g}{9 \mu} \quad (1.3)$$

Donde  $r$  y  $\rho_p$  son el radio y la densidad de la partícula,  $\mu$  es la viscosidad dinámica del gas y  $g$  es la constante gravitacional. Debido a movimientos ascendentes en la tropósfera, una solución a la ecuación 1.4 puede no ser exacta. Además, movimientos ascendentes y velocidades de sedimentación cortas tienen lugar a encontrar partículas relativamente pesadas en lugares distantes de su fuente.

2. Movimiento Browniano: Este movimiento aleatorio es resultado de las fluctuaciones en el impacto de moléculas del gas con las partículas de aerosol de modo que la velocidad en este proceso aumenta con un decrecimiento en el tamaño de las partículas interactuantes. Como consecuencia de este movimiento se da una pérdida de material particulado por unidad de tiempo debido a procesos de coagulación.

$$-\frac{dN}{dt} = \frac{4}{3} \frac{kt}{\mu} \left(1 + \frac{A\lambda}{r}\right) N^2 \quad (1.4)$$

Donde  $\mu$  es la viscosidad dinámica del gas,  $A$  es la corrección de Stokes-Cunningham,  $\lambda$  es el Camino libre promedio del gas y  $N$  el número de partículas/vol. La expresión 1.4 (perdida de material particulado por unidad de volumen) indica que a mayor número de partículas, mayor será la pérdida por coagulación térmica. Además, la expresión (1.5) solo es válida para aerosoles compuestos por partículas de tamaño uniforme.

3. Superficie de las partículas (rango): Cuando la superficie de las partículas (en  $\text{cm}^2$ ) excede su volumen ( $\text{cm}^3$ ) por lo menos 100 veces, tenemos el límite superior en el estudio de sistemas compuestos por partículas de aerosol. El límite inferior se determina cuando, tanto el radio como la masa de las partículas de aerosol es mayor que el de las

moléculas del gas. Por lo general se determina este límite en aproximadamente  $10^{-7}$  cm =  $10^{-3}$   $\mu\text{m}$ . (Meszaros, 1991).

El rango de tamaños de las partículas de aerosol varía en unos cuantos ordenes de magnitud, en primera instancia Junge (1963) clasifico los aerosoles según su radio así:

- Modo Aitken:  $r < 0.1\mu\text{m}$
- Modo Largo-Acumulación:  $0.1 \mu\text{m} \leq r \leq 1.0 \mu\text{m}$
- Modo Coarse-Gigante:  $1.0 \mu\text{m} \leq r \leq 10 \mu\text{m}$

## **2.Desarrollo de la técnica de Espectroradiometría**

En este capítulo se describe en detalle el Espectroradiómetro (EPR) desarrollado en el Grupo Láseres y Espectroscopía Óptica – GLEO de La Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, el cuál es utilizado para la caracterización de las partículas de aerosol atmosférico. Para obtener resultados fiables mediante espectroradiometría, se debe tener una buena puesta a punto de todas las etapas que conforman el instrumento de medida, empezando por el sistema de recolección y colimación de la radiación solar, la óptica de entrada, el monocromador y por último el detector. Además, estas etapas deben estar en sincronía con el sistema mecánico encargado del movimiento de la red de difracción mediante un motor de paso, de forma que se pueda recorrer el rango espectral de interés. El sistema de control electrónico actúa sobre el motor con el fin de caracterizar el movimiento de la red de difracción (velocidad de giro y selección del rango espectral). (Múnera, 2013)

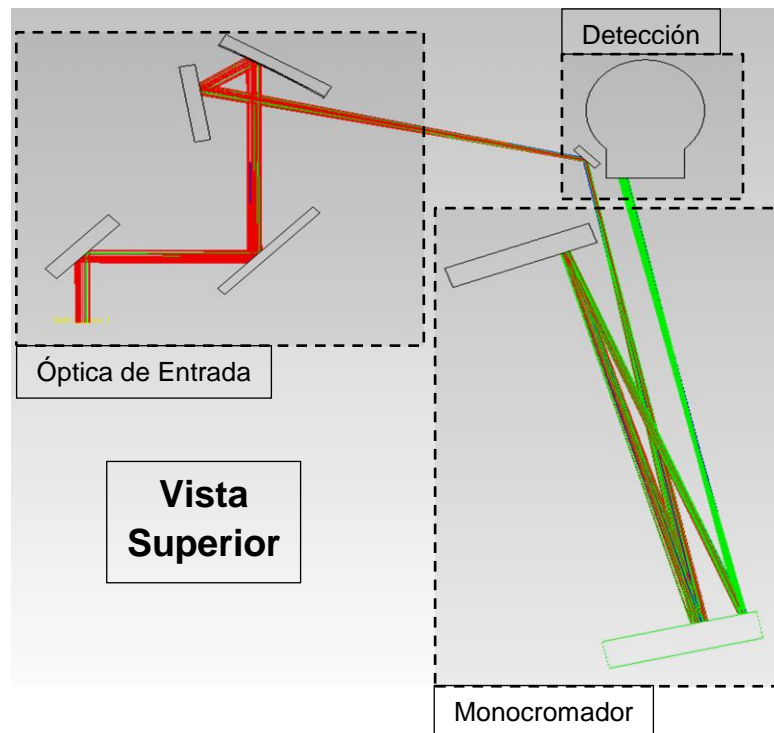
El sistema construido funciona recolectando una porción de radiación solar mediante un telescopio anclado a una plataforma con dos motores, uno cenital y otro azimutal, de manera que el movimiento controlado de estos permita orientar siempre el telescopio hacia la posición del sol. Esta porción de radiación es transportada hacia el EPR donde es separada espectralmente en el rango desde 360nm hasta 650nm antes de ser detectada por un tubo fotomultiplicador PMT. Aunque el tipo de información que este sistema puede suministrar es variada, en este trabajo se realiza un análisis primario de medidas Espectroradiométricas para determinar una propiedad óptica de los aerosoles atmosféricos como lo es su espesor óptico.

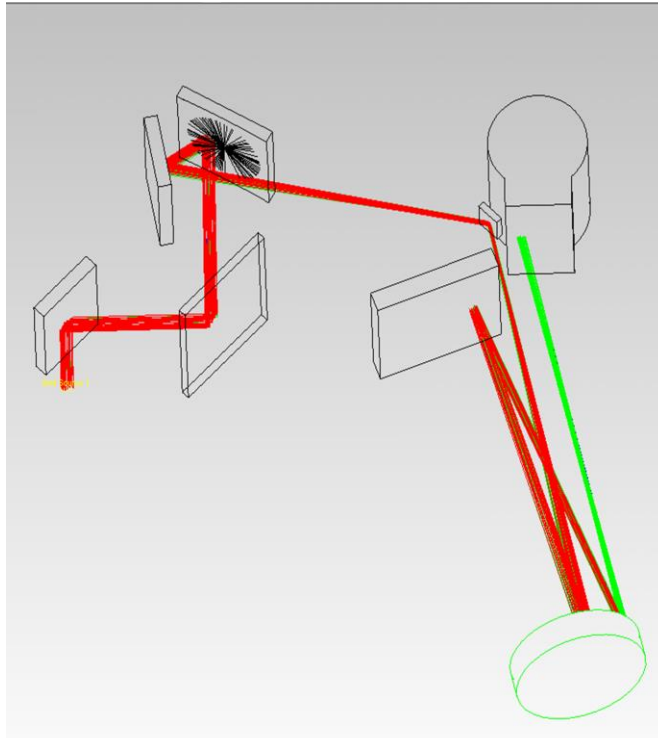
## 2.1 Sistema Óptico

Esta etapa del sistema se convierte en la más importante a la hora de caracterizar y estudiar algunas propiedades de la atmósfera terrestre con luz solar, es por esto que cada uno de los sub sistemas involucrados deben estar sincronizados entre sí de modo que la radiación solar no sufra variaciones ni pérdidas en el trayecto desde su recolección hasta el detector. De manera que la intensidad recibida por el detector solo sufra variaciones como resultado de eventos atmosféricos, no por pérdidas dentro del instrumento (mala calibración). La correcta alineación de los componentes ópticos que conforman el EPR es un proceso delicado que debe ser ejecutado cuidadosamente en cada una de las etapas que conforman el sistema óptico de Espectroradiómetro.

Antes de describir en detalle todos los elementos ópticos que componen el Espectroradiómetro, se muestra el diseño y la ubicación de los mismos, mediante el software **TracePro** de la compañía **Lambda Research**. En la Figura 2-1 se evidencia una simulación del trazado de rayos en el sistema óptico del espectroradiómetro. (LambdaResearchCorporation., 2015).

**Figura 2-1:** Diseño del trazado de rayos con el software **TracePro**.

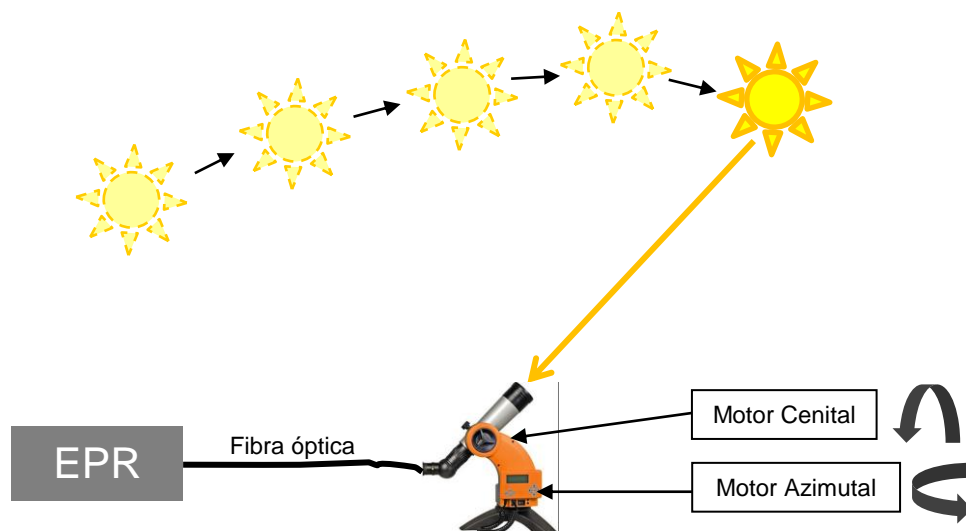




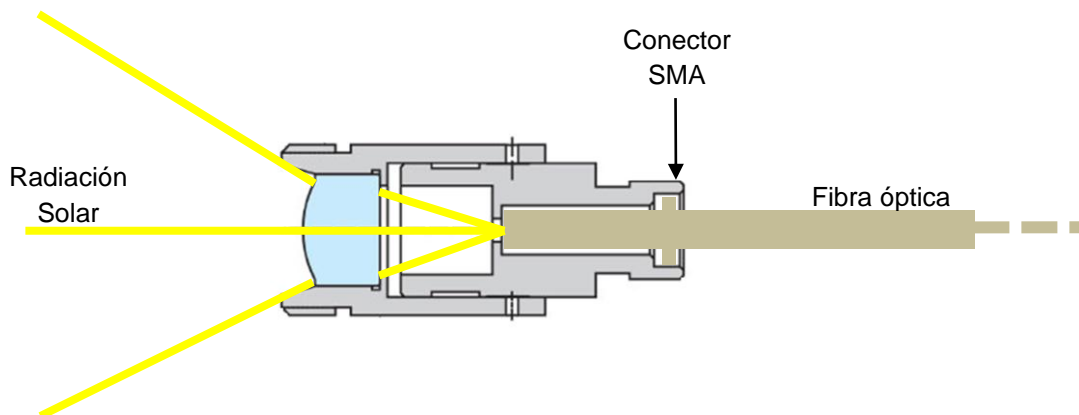
### 2.1.1 Captación y colimación de la luz solar

Se cuenta con un trípode computarizado tipo **AstroBoy® - 70e** de la empresa **IOptron**, el cual tiene un telescopio refractor y un par de motores encargados de variar tanto el ángulo cenital como el azimutal, estos son controlados por un microprocesador interno tipo **GoToNova®**. Para operar este “*suntrack*” se debe ingresar en una interfaz propia del **AstroBoy® - 70e** datos de localización del lugar de observación como longitud y latitud, además, la fecha y hora del día. Este sistema portable permite recolectar una porción de radiación solar directa continuamente entre las 6am y las 6pm, de modo que se puedan obtener espectros solares continuamente. (IOptron - Corporation, 2007)

Para obtener el espesor óptico de los aerosoles basta con realizar solo medidas de radiación directa a diferentes horas del día. En la figura 2-1 se ilustra el modo de operación del telescopio portable en medidas de radiación directa.

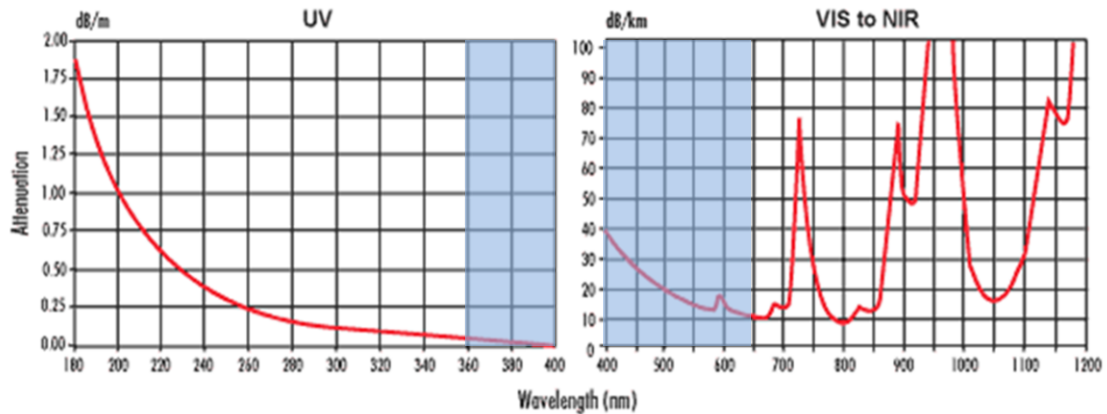
**Figura 2-2:** Evolución de las medidas de radiación directa.

La radiación solar que ingresa al telescopio refractor es recogida por un colimador ubicado en el ocular del telescopio. Esta pieza tiene en uno de sus extremos un conector tipo SMA para unirlo al extremo de una fibra óptica. Para acoplar el colimador al ocular se diseñó y construyó una pieza en Nylon que pudiera ser graduada en el ocular de forma que la cantidad de radiación que ingresa a la fibra óptica sea la máxima. La figura 2-3 muestra el esquema del colimador con conector SMA en el ocular del telescopio.

**Figura 2-3:** Colimador y acople de la fibra óptica en el ocular del telescopio.

Para transportar la fibra óptica hasta el espectroradiómetro, se utilizó 5 metros de fibra óptica, en la figura 2-3 se ilustra la respuesta espectral de la fibra utilizada. Además en la tabla 2-1 se describen las principales especificaciones de la misma.

**Figura 2-4:** Respuesta espectral de la fibra óptica utilizada en el rango de operación del Espectroradiómetro (360nm hasta 650nm).



**Tabla 2-1:** Especificaciones de la fibra óptica

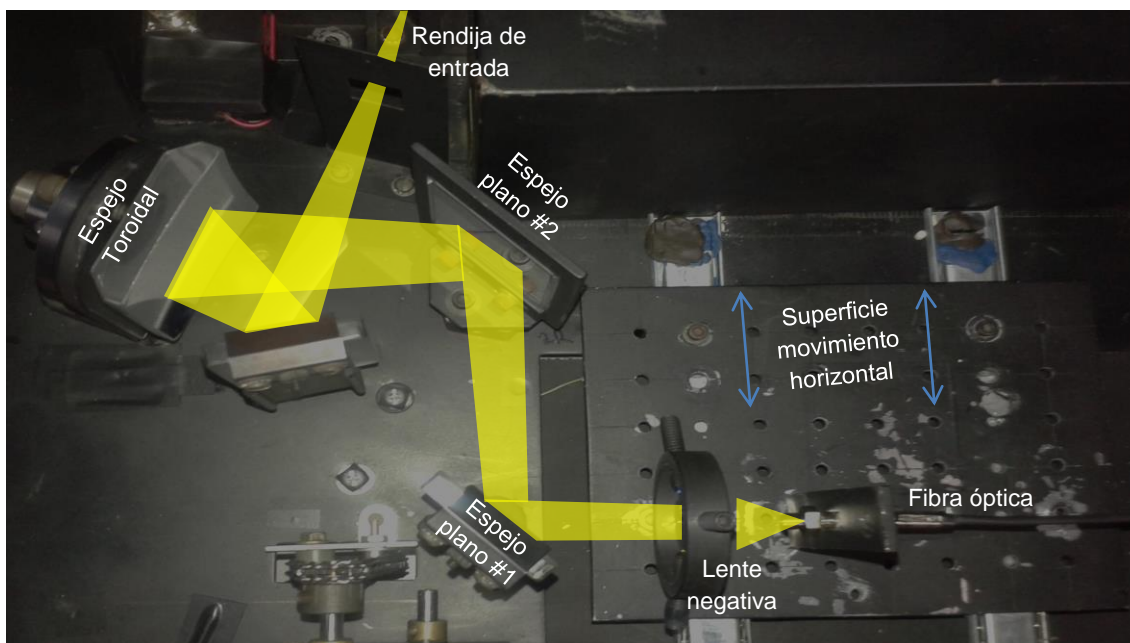
Especificaciones	
Longitud de onda	UV/VIS
Apertura numérica	0.22
Diámetro del núcleo ( $\mu\text{m}$ )	1000.00
Longitud (m)	5.00
Diámetro del revestimiento ( $\mu\text{m}$ )	1100.00
Diámetro exterior ( $\mu\text{m}$ )	1400.00
Índice de refracción del núcleo	1.458
Índice de refracción del revestimiento	1.441
Ángulo de aceptación ( $^{\circ}$ )	25.4
Temperatura de operación ( $^{\circ}\text{C}$ )	- 40 – 100
Sustrato	Sílice fundida

### 2.1.2 Óptica de entrada

La radiación solar colectada por el telescopio es transmitida vía fibra óptica hacia el Espectroradiómetro, en la entrada del equipo está ubicada una lente positiva con distancia focal 25 mm que recoge la radiación proveniente de la fibra óptica y la transmite hacia un juego de espejos planos para luego ser reflejada en un espejo toroidal que tiene uno de sus focos justo en la rendija de entrada del monocromador. El equipo cuenta con una superficie metálica sobre un par de rieles, los cuales permiten variar la posición lateral de la fibra óptica con respecto al primer espejo de entrada, además, la altura de la fibra óptica puede ajustarse mediante un soporte circular con un tornillo anclado a la plataforma metálica.

Debido a la versatilidad propia del sistema para obtener la composición espectral de cualquier fuente en el rango 360nm hasta 650nm y a la necesidad de calibrarlo espectralmente, es necesario utilizar fuentes de radiación estándares como láseres, leds y fuentes extendidas, en este sentido se diseñó un sistema de ajuste para la posición de la fuente utilizada, el cual está constituido por la superficie metálica y el soporte circular, de manera que fuera posible ajustar vertical y horizontalmente la fuente utilizada. En la figura 2-5 se ilustra el sistema óptico de entrada y un trazado de rayos en esta etapa del sistema.

**Figura 2-5:** Óptica de entrada.

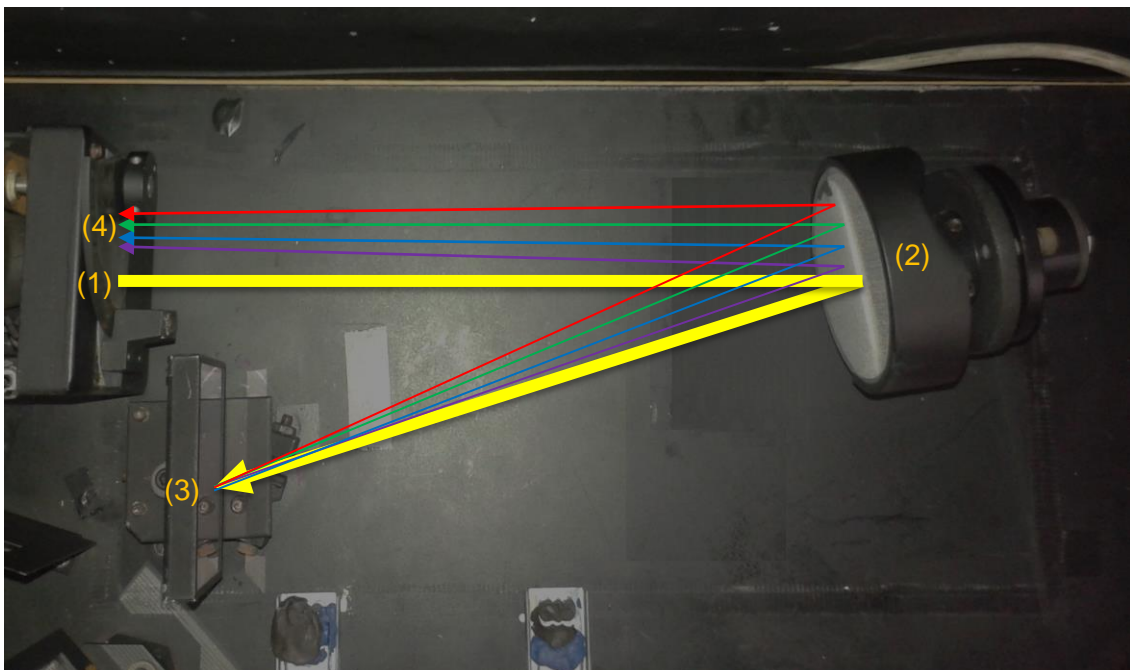




### 2.1.3 Monocromador

El monocromador se constituye en la unidad central de cualquier equipo de análisis espectral, en este caso se ha utilizado una red de difracción por reflexión PERKIN-HELMER rectangular de dimensiones (6x7x1) cm, que posee 1800 líneas/mm y su rango espectral va desde 235nm hasta 700nm. Además, esta etapa del espectroradiómetro también está compuesta por una rendija de entrada. En la figura 2-6 se muestra la etapa de monocromado y su modo de operación mediante el trazado de rayos. De la rendija de entrada emerge la radiación solar luego de ser colimada en la óptica de entrada (1), luego este rayo viaja hasta el espejo bifocal (2) y es reflejado en primera instancia hacia el monocromador (3). La red de difracción descompone espectralmente la radiación solar incidente y la refleja de nuevo hacia el espejo bifocal toroidal (2). El espectro continuo es reflejado hacia la rendija de salida donde está ubicado el detector (4). Para obtener la contribución en intensidad de cada longitud de onda, la red de difracción puede moverse angularmente según el barrido espectral de interés, de modo que el espectro formado se mueva sobre la rendija de salida y el detector registre la intensidad de la radiación solar como función de la longitud de onda. (Múnera, 2013)

**Figura 2-6:** Sistema monocromador



A la entrada del sistema de monocromado, se ubica una rendija, esta se utilizan principalmente para restringir la entrada de luz parásita al monocromador y variar el poder de resolución. Además de esta rendija, el EPR cuenta con otra en la óptica de salida. Ambas rendijas son usualmente de tamaños similares.

### 2.1.4 Óptica de salida

Esta parte del equipo está compuesta por el espejo toroidal que focaliza la radiación monocromática en una rendija de salida justo antes del detector. Un correcto alineamiento del espejo toroidal asegura que la luz monocromada sea recolectada eficientemente desde la red de difracción y focalizada justo en el centro de la rendija de salida.

La rendija de salida ayuda a restringir y definir la banda de radiación que recibe el sensor. Tanto la rendija de entrada como la de salida son de tamaños similares. Con rendijas estrechas es posible obtener una mayor resolución pero se disminuye la cantidad de radiación que llega al detector. El Espectroradiómetro implementado cuenta con un selector de rendijas con diferentes tamaños. En la tabla 2-2 se ilustran los diferentes anchos para las seis posiciones de las rendijas de entrada y salida. (BENTHAM, 2014; Múnera, 2013)

**Tabla 2-2:** Selector de tamaño para las rendijas de entrada y salida

	Rendija de Entrada	Rendija de Salida
Posición 1	1.10 mm	1.25 mm
Posición 2	0.55 mm	0.45 mm
Posición 3	0.25 mm	0.20 mm
Posición 4	0.10 mm	0.10 mm
Posición 5	0.35 mm	0.40 mm
Posición 6	1.10 mm	1.35 mm

### 2.1.5 Detector

En términos electrónicos un tubo fotomultiplicador es un amplificador que a partir de fotones recibidos genera pulsos de corriente con anchos del orden de nanosegundos. La luz que incide sobre la ventana sensible del detector logra desprender electrones del

fotocátodo mediante el efecto fotoeléctrico. En presencia de un campo eléctrico fuerte, los electrones se dirigen hacia el primer dínodo (emisión primaria), luego se produce una multiplicación de los electrones en cada uno de los dínodos del detector (emisión secundaria) (Correa, 2012).

En el desarrollo de este trabajo se utilizó un tubo fotomultiplicador PMT tipo **HAMAMATSU SERIE R300** al cual se le adaptó una fuente de alto voltaje para polarizar cada uno de los dínodos donde la amplificación de los fotoelectrones tiene lugar. En la tabla 2-3 se muestran las principales características del tubo fotomultiplicador utilizado. (HAMAMATSU, 1998)

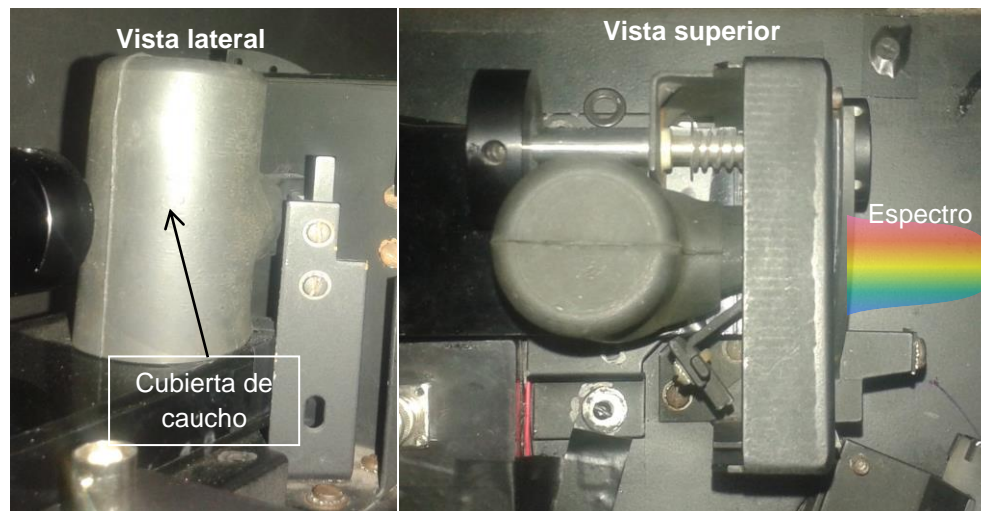
**Tabla 2-3:** Características del **PMT HAMAMATSU SERIE R300**.

Características	Valores
Longitud de onda mínima ( $\lambda_{\min}$ )	185 nm
Longitud de onda máxima ( $\lambda_{\max}$ )	650 nm
Pico de mayor sensibilidad	340 nm
Transite Time	15ns
Rise Time	1.4 ns
Numero de dínodos	9
Dimensiones de la ventana de detección	(6x25) mm

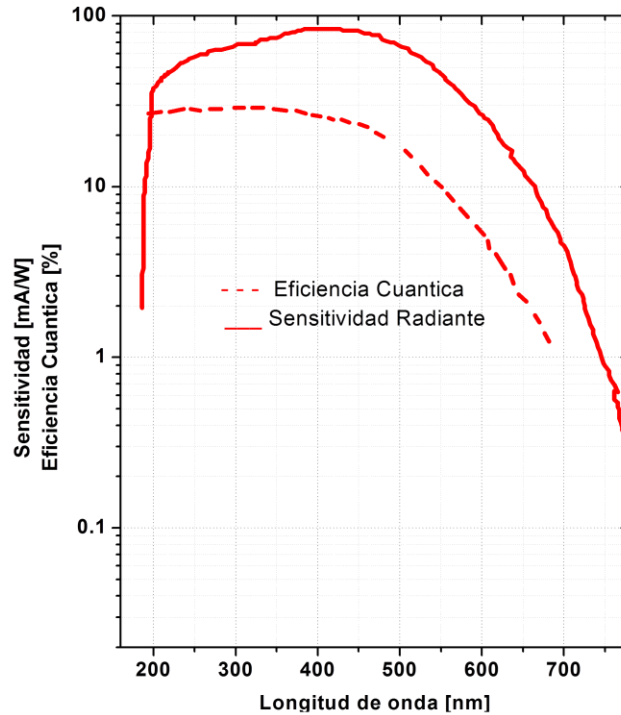
Para asegurar la fiabilidad y estabilidad de las medidas obtenidas con el EPR, se implementó una cubierta para el fotomultiplicador de modo que lo aisle de cualquier radiación parásita que pueda entrar al detector, ya que este tipo de dispositivos son muy sensibles incluso a pequeñas cantidades de fotones que se filtren sin ser monocromadas. En la figura 2-7 se ilustra el módulo de detección del EPR con el caucho encargado de

blindar ópticamente el PMT, de manera que la radiación que incida sobre la ventana de detección provenga únicamente de la rendija de salida.

**Figura 2-7:** Módulo de detección del EPR.



El objetivo principal de este trabajo consiste en estimar el espesor óptico de los aerosoles atmosféricos en el rango espectral 360nm hasta 650nm. El detector utilizado en el Espectroradiómetro es apropiado para el intervalo espectral de interés, ya que tanto su eficiencia cuántica (porcentaje de electrones que se extraen de la superficie fotoactiva, con respecto al número de fotones incidentes) como su sensibilidad radiante (corriente fotoeléctrica generada cuando a la superficie fotoactiva llegan fotones de una longitud de onda determinada) tienen valores adecuados en dicho rango. Las curvas de sensibilidad y eficiencia cuántica del PMT utilizado pueden verse en la figura 2-8 (HAMAMATSU, 2014).

**Figura 2-8:** Curva de respuesta espectral del **PMT HAMAMATSU SERIE R300**.

## 2.2 Sistema Mecánico

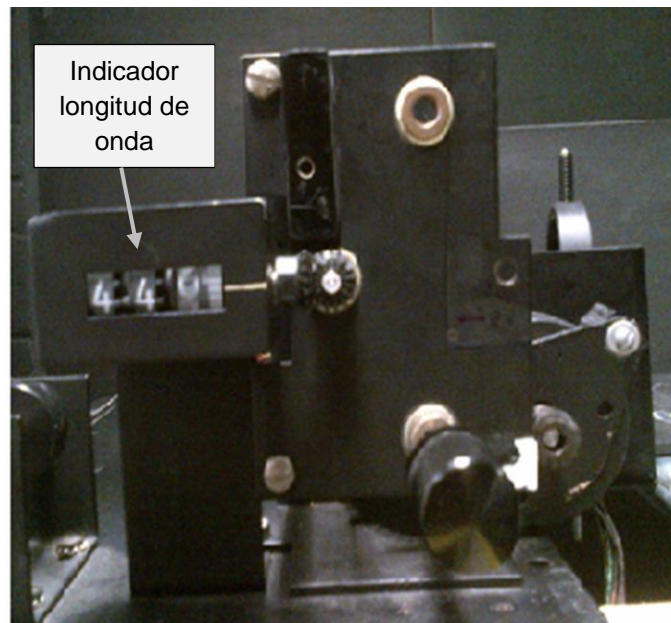
La función principal de este sistema es transmitir el movimiento de un motor de paso a la red de difracción. Este proceso inicia con el movimiento del motor de paso, el cual transmite el movimiento hacia un par de engranajes circulares, luego un eje y una cadena trasladan el movimiento a la parte inferior del dispositivo, con el propósito de no obstaculizar ningún elemento óptico y separar estos dos sistemas. Luego la cadena mueve un engranaje conectado a un eje, el cual hace girar un tornillo de paso fino que a su vez transmite el movimiento a la red de difracción mediante un soporte rectangular roscado a dicho tornillo y a su vez al eje de rotación de la red de difracción.

Uno de los engranajes que acciona el motor de paso, está conectado a un eje el cual transmite el movimiento a un par de engranajes cónicos que se conectan con visualizador de la longitud de onda que esté detectando el PMT en ese momento. En la figura 2-9 se ilustra este indicador.

Para evitar que radiación parásita ingrese al espectroradiómetro debido a otras fuentes que se encuentren cerca, se debe aislar ópticamente cada una de las etapas

involucradas, de manera que solo la radiación proveniente de la fibra óptica sea la responsable de ser cuantificada por el detector, evitando así la modificación en las medidas espectrales. Para este propósito se dispone de cubiertas individuales para que cada sub-sistema (óptica de entrada, monocromador y detector), además de una cubierta para todo el equipo.

**Figura 2-9:** Indicador visual de longitud de onda.



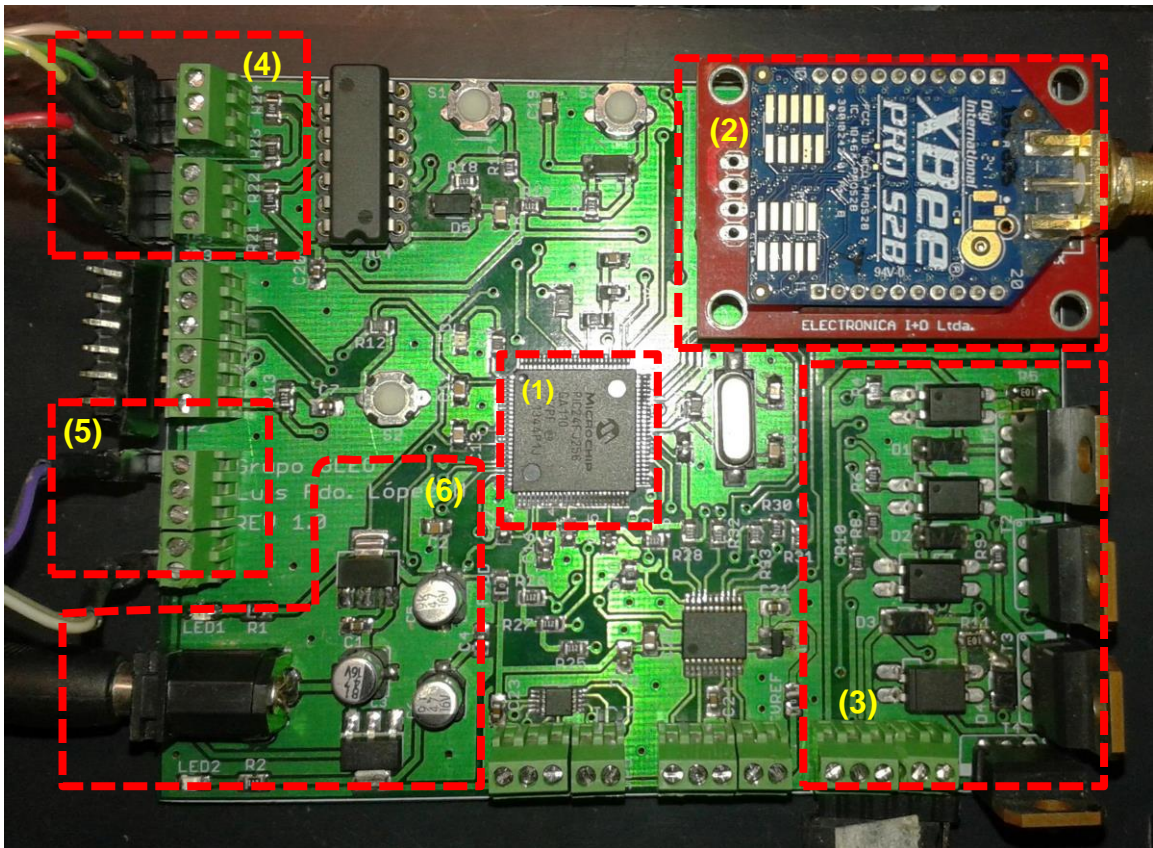
## 2.3 Sistema Electrónico

En un equipo de medidas espectrales es de suma importancia garantizar la estabilidad, fiabilidad y sincronización de las mediciones, es por esto que debe existir un sistema electrónico de control integrado capaz de automatizar algunos aspectos relacionados con el registro de un espectro (velocidad del motor de paso, rango espectral, tiempos de muestreo, comunicación, transferencia de datos, entre otros).

Para cumplir con los requerimientos electrónicos y de control, se adecuó una tarjeta de control y adquisición de señales construida y diseñada en el Grupo GLEO por el ingeniero Luis Fernando López en el marco del trabajo de grado titulado: ***“Diseño de un***

*sistema de generación y registro de luz multiespectral”* y que gracias su versatilidad, se pudo acoplar al Espectroradiómetro bajo el marco de la convocatoria: **Convocatoria para conformar bancos de elegibles para formación de alto nivel para la ciencia, la tecnología y la innovación (semilleros y jóvenes investigadores, doctorados nacionales y en el exterior) No. 617 en el capítulo 1: Semilleros y Jóvenes Investigadores 2013** de Colciencias titulado: **“Desarrollo instrumental de técnicas espectroradiométricas para estudios de la relación radiación solar y calidad del aire”**, el cual fue presentado por Mauricio Múnera y Luis Fernando López entre los años 2014 y 2015. Entre las características de esta tarjeta, está controlar algunos periféricos involucrados en el EPR y comunicarse en doble vía entre un computador y el Espectroradiómetro. A continuación se muestran los principales componentes eléctricos y electrónicos que intervienen en el proceso de mediciones espectroradiométricas. Además en la figura 2-10 se muestra una fotografía de la tarjeta de control y adquisición. (López, 2013)

**Figura 2-10:** Fotografía de la tarjeta de adquisición y control acoplada al EPR.



---

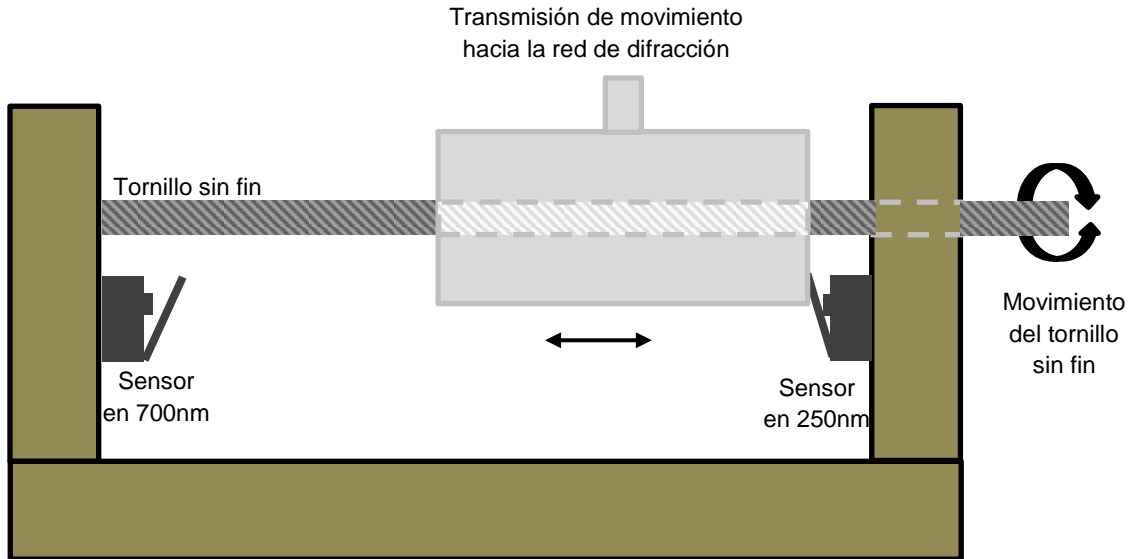
En la figura 2-10, (1) corresponde al microcontrolador de la familia 24F de la empresa **Microchip**, el cual es la unidad central de la tarjeta de adquisición y control, (2) es un módulo de comunicación inalámbrica por radio frecuencia **Xbee PRO S2B**, entre el espectroradiómetro y la computadora, (3) es el sistema de transistores y opto-acopladores de protección a las altas corrientes sobre las bobinas del motor de paso, (4) son las salidas para los suiches mecánicos de fin de carrera que establecen los límites de movimiento en la red de difracción, (5) corresponde a la señal de voltaje de salida del espectroradiómetro luego de ser filtrada y acotada en un rango de voltaje de 0V - 3.25V según el máximo nivel de voltaje que soporta el microcontrolador, por último (6) corresponde a la etapa de regulación de la tarjeta, ya que los dispositivos electrónicos involucrados tienen diferentes niveles de voltaje de alimentación (3.3V, 5V y 12V). (López, 2013)

### 2.3.1 Interruptores de fin de carrera

Como medida de protección al movimiento de la red de difracción, y para evitar el giro no deseado del motor de paso en una dirección en especial ocasionando daños en el sistema mecánico, se instalaron dos sensores de fin de carrera para delimitar el rango de movimiento máximo del monocromador. El tornillo sin fin accionado por el motor de paso, mueve un soporte rectangular el cual se encarga de transmitir el movimiento a la red de difracción. Los sensores de fin de carrera funcionan por contacto mecánico accionando un interruptor eléctrico que envía una señal hacia la tarjeta de control de modo que se indique que el movimiento de la red de difracción llegó a su fin, ya sea en 250nm o en 700nm (valor mínimo y máximo de movimiento de la red); cuando esto ocurre el motor debe girar en el sentido opuesto o si las medidas finalizaron en ese punto, se debe detener el movimiento. El diagrama en la figura 2-11 representa el movimiento del tornillo sin fin acotado entre un par de sensores mecánicos en 250nm y 700nm. (López, 2013)



**Figura 2-11:** Interruptores de fin de carrera. En el diagrama se observa el momento en el que el sensor ubicado en 250nm está siendo accionado.



### 2.3.2 Motor de paso

Como ya se mencionó el dispositivo actuador será un motor de paso con una resolución de 1.8 grados por paso, el cual es un motor de conmutación electrónica, es decir, su sentido de giro y velocidad de movimiento están determinadas por la polarización de cuatro bobinas; que al ser activadas secuencialmente por el mecanismo de control, permiten la circulación de una corriente que genera un campo magnético e interacciona con el rotor permitiendo el movimiento. Este tipo de motores permiten un mejor control de la velocidad de avance (desplazamientos angulares). Los motores de paso convencionales operan en un rango amplio de voltajes de alimentación, que pueden variar entre 12 voltios y 35 voltios, con corrientes que van desde los 500 mA hasta 1.5 A.

En vista de que los microcontroladores operan a voltajes y corrientes relativamente bajas, una sobretensión o pico de corriente superior a 5V o 20mA generará daños irreversibles en el controlador. Es por esto que la tarjeta de adquisición y control cuenta con un sistema de protección basado en transistores que se activen con valores bajos de corriente de base (los cuales pueden ser generadas por las salidas digitales del microcontrolador). Además, los transistores (etapa de relativa alta potencia) son aislados

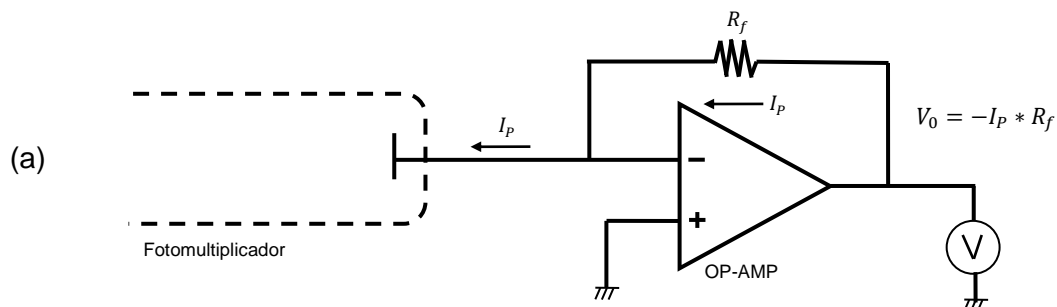
del controlador (etapa de relativa baja potencia) por intermedio de opto-acopladores, los cuales al recibir una señal a la entrada activan un diodo emisor de luz que produce una corriente de salida suficiente para activar el transistor de control. (López, 2013)

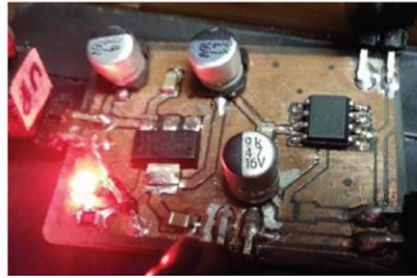
### 2.3.3 Adecuación de la señal del fotomultiplicador

En vista de que la señal de salida del fotomultiplicador es una señal de corriente proporcional a la cantidad de fotones que inciden en la ventana de detección, la señal debe ser acondicionada y traducida a voltaje para su correcto registro. Además, es posible que la señal contenga algún tipo de ruido electrónico inmerso como consecuencia de la línea de alimentación, la cual tiene una frecuencia de 60 Hz o alguna otra distorsión que modifique de manera sustancial las mediciones. A continuación se muestran dos pasos (conversión de corriente a voltaje, nivel de voltaje de la señal y filtrado) implementados a la hora de adecuar la señal antes de realizar la conversión análogo-digital en la tarjeta de control. (HAMAMATSU, 1998; López, 2013)

**Acondicionamiento de la señal:** Con un amplificador operacional conectado a la salida del PMT, es posible convertir la corriente proporcional a la cantidad de fotones incidentes en una señal de voltaje. Esta señal puede ser acotada entre los niveles permitidos por la tarjeta de adquisición y control, de forma que en el caso en el que la señal luminosa incidente en el detector sea relativamente alta, no cause problemas en la tarjeta de control. Según las características del microcontrolador, los niveles de voltaje en la señal deben estar entre 0V y 3.3V, estos valores son aproximadamente iguales al voltaje de alimentación que se le proporcione al amplificador operacional. En la Figura 2-12 se muestra (a) el esquema electrónico para la conversión de corriente a voltaje y (b) una fotografía de la tarjeta acondicionadora de la señal.

**Figura 2-12:** (a) Esquema electrónico conversor corriente-voltaje. (b) fotografía de la tarjeta implementada.





(b)

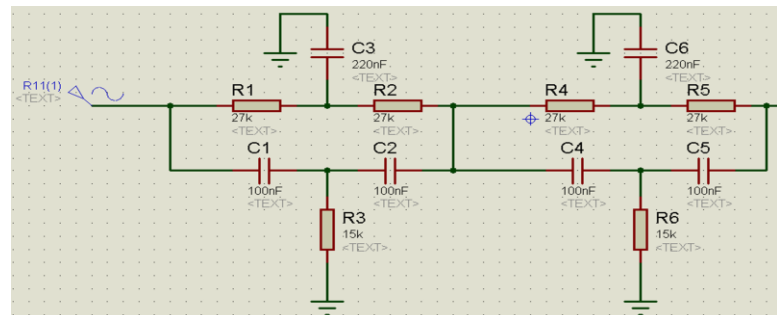
Además, el EPR tiene la posibilidad de realizar ajustes de ganancia de la señal del PMT de acuerdo a los niveles de energía luminosa que recibe, en procura de tener una mejor relación señal ruido. Ajuste que se realiza a través de un potenciómetro lineal de 10 vueltas, el cual varía la resistencia  $R_f$  del amplificador operacional (ver figura 2-12 (a)), teniendo en cuenta que el voltaje de salida  $V$  es proporcional a la resistencia  $R_f$ . Teniendo en cuenta que una vez definida la ganancia adecuada para el PMT, se debe mantener fijo este valor, de modo que la medida de AOD no se vea alterada. (HAMAMATSU, 1998)

**Filtrado de la señal:** En las primeras pruebas efectuadas con el espectroradiómetro, se observó que el nivel de voltaje de oscuridad varía entre 3mV y 100mV según la ganancia elegida. Sin embargo la señal de oscuridad estaba inmersa en otra señal de comportamiento periódico de 60 Hz.

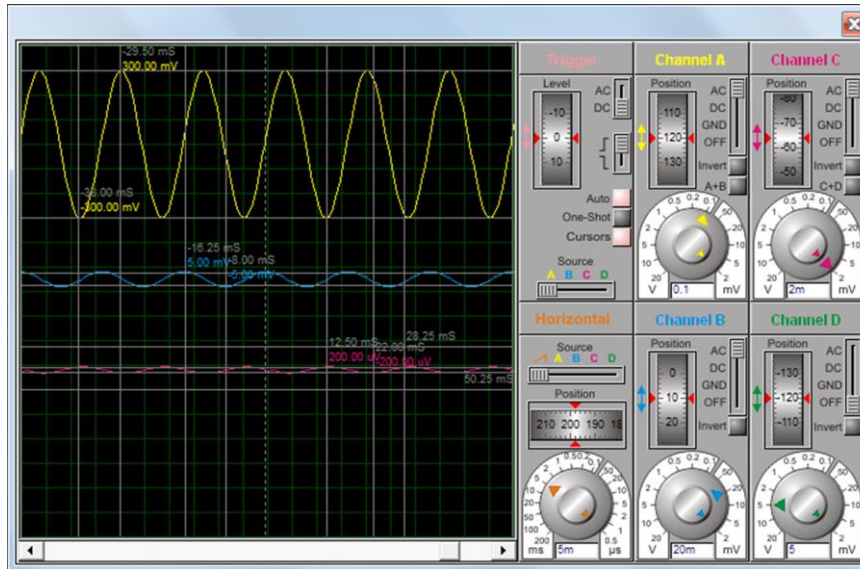
Para realizar una corrección de esta señal periódica, fue necesario implementar un doble filtro NOTCH, el cual consiste en un filtro electrónico que suprime la señal de 60 Hz. La figura 2-13 muestra una simulación de este filtro (a) y el esquema electrónico del mismo (b).

**Figura 2-13:** (a) esquema electrónico del filtro utilizado. (b) Simulación del filtro para una frecuencia de corte en 60Hz.

(a)

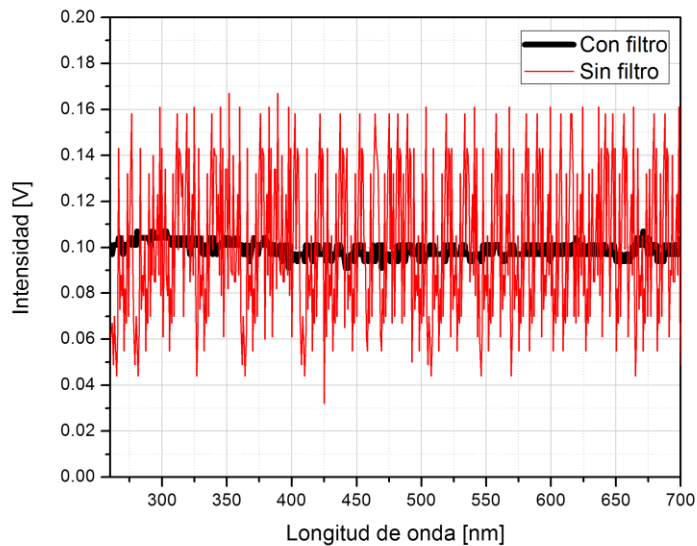


(b)



En la Figura 2-14 se muestra la comparación de dos señales, señal de color rojo antes, y señal de color negro después de aplicar el doble filtro NOTCH.

**Figura 2-14:** Señal de oscuridad corregida con un filtro NOTCH.



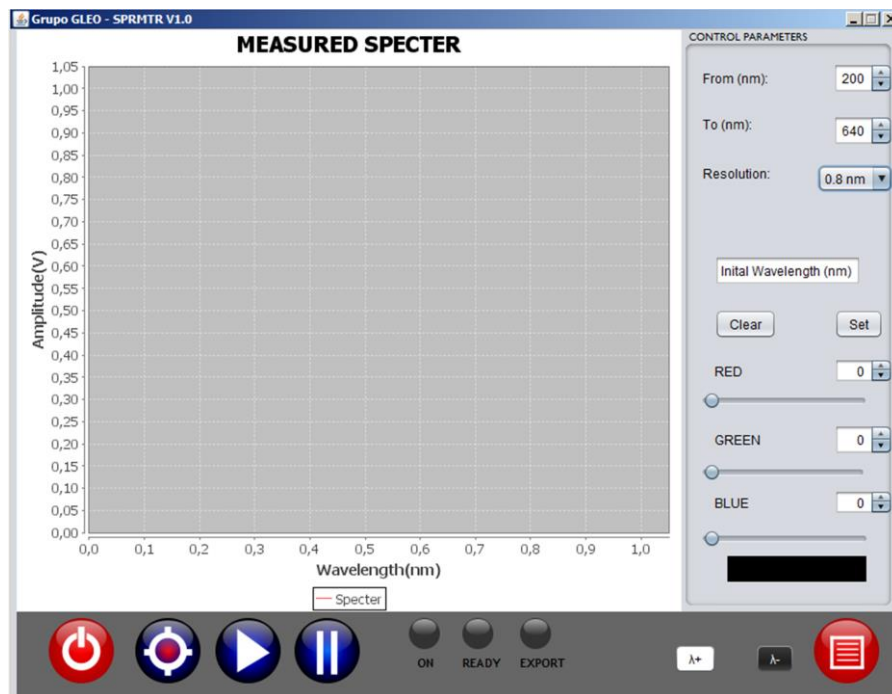
La señal de ruido base del Espectroradiómetro, debe restarse a cada perfil obtenido con el fin tener la señal libre de off-set.

### 2.3.4 Interfaz de visualización y control

El espectroradiómetro cuenta con una interfaz gráfica de control de los parámetros involucrados en un registro espectral (rango de medición, velocidad de giro del motor de paso y muestreo de la señal) y la visualización de los espectros obtenidos. Esta interfaz integra una serie de componentes visuales que permiten tener total control sobre la operación en tiempo real del dispositivo, de manera que se pueda evaluar constantemente el correcto funcionamiento del mismo. (López, 2013)

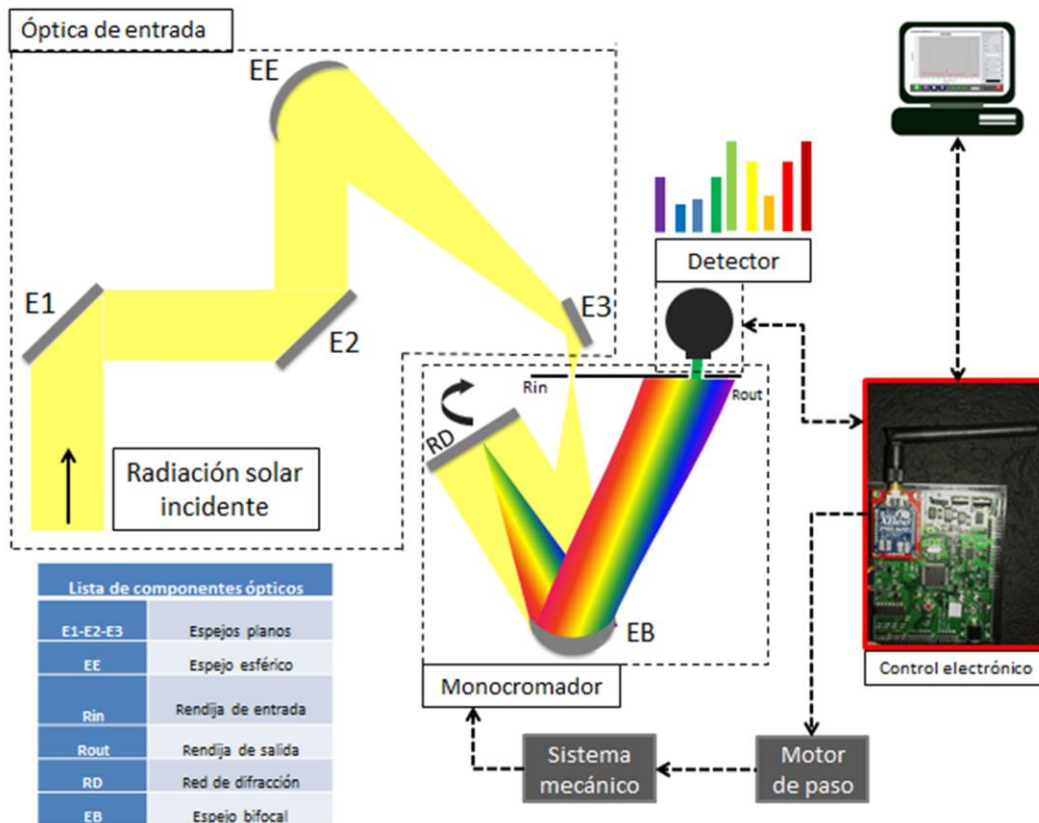
En la ventana principal se encuentra un panel con cuatro botones para: encender el equipo, seleccionar el puerto de comunicación para habilitar la conexión con la tarjeta de control, inicio de las mediciones, paro de las mismas y en el extremo derecho un botón para exportar los datos en archivo .txt. Adicionalmente la interfaz cuenta en la parte superior derecha con un panel de control el cual permite indicar tanto el valor inicial como el final del barrido espectral que se desea en cada medición; un poco más abajo un selector de la velocidad de giro del motor de paso y otro indicador para variar la velocidad de muestreo. En la parte central de la interfaz se puede observar el espectro registrado en tiempo real. La figura 2-15 corresponde a una fotografía de la interfaz de control del EPR.

**Figura 2-15:** Interfaz de control y visualización.



En la figura 2-16 se ilustra un diagrama general con todos los sub-sistemas que componen el espectroradiómetro desarrollado.

**Figura 2-16:** Esquema general del Espectroradiómetro.



## 2.4 Ajustes y especificaciones del Espectroradiómetro

### 2.4.1 Calibración Espectral

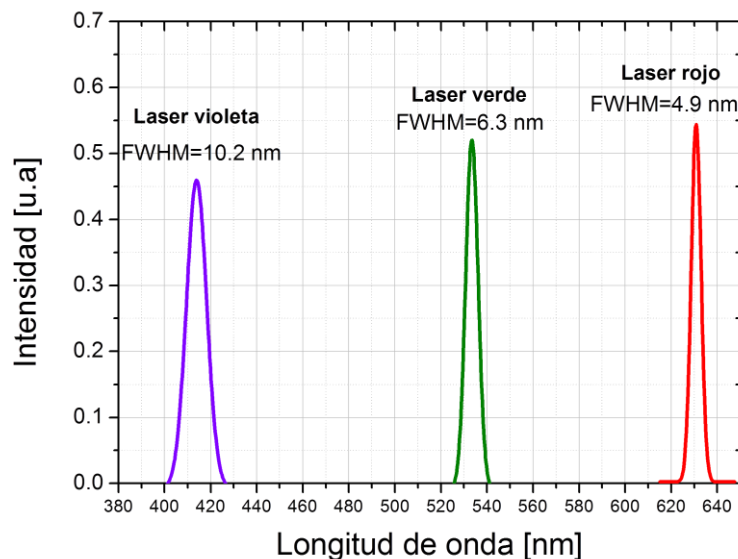
Para tener el EPR operativo y obtener perfiles espectrales de espesor óptico de los aerosoles, es necesario calibrar el sistema espectralmente; para esto se cuenta con diferentes fuentes de radiación patrones para las cuales sus espectros son dados por los fabricantes. En primera instancia se utilizaron tres fuentes láser con valores de intensidad máximas conocidos.

Para la calibración en longitud de onda, se siguió el “Método de calibración estándar para un Espectroradiómetro usando una fuente estándar de irradiancia” elaborado por la **ASTM** o sus siglas en inglés (National Institute of Standards and Technology), este método de calibración propone los siguientes pasos: (ASTM-International, 2003)

1. Alinear el sistema óptico de manera que al detector llegue la mayor cantidad de radiación. En este paso puede utilizarse una fuente láser.
2. Iluminar la óptica de entrada con una lámpara de calibración o una fuente láser. Si no se dispone de un láser, una lámpara de baja presión de mercurio puede utilizarse.
3. Seleccione una línea de emisión de longitud de onda conocida dentro de la región espectral de interés.
4. Ubique el pico espectral escaneando ubicación aproximada moviendo el monocromador hasta que está línea coincida con la rendija de salida.
5. Calcular y registrar el desplazamiento entre la longitud de onda ubicada por el monocromador y el pico real dado por el fabricante.
6. Compensar este desplazamiento en las siguientes etapas del procedimiento.

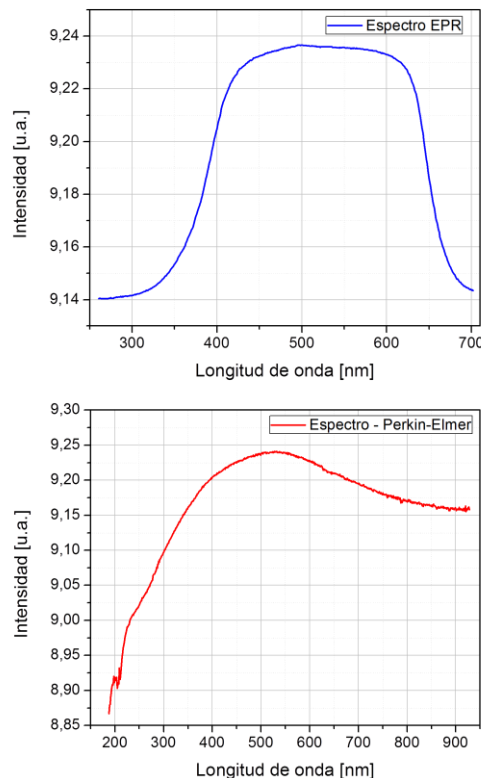
Para la calibración de espectroradiómetro se utilizó un diodo láser violeta a 416 nm, un diodo láser verde a 532 nm, y láser de He-Ne a 632,8 nm. En la figura 2-17 se ilustran los espectros obtenidos luego de la calibración espectral.

**Figura 2-17:** Calibración espectral con tres fuentes láser.



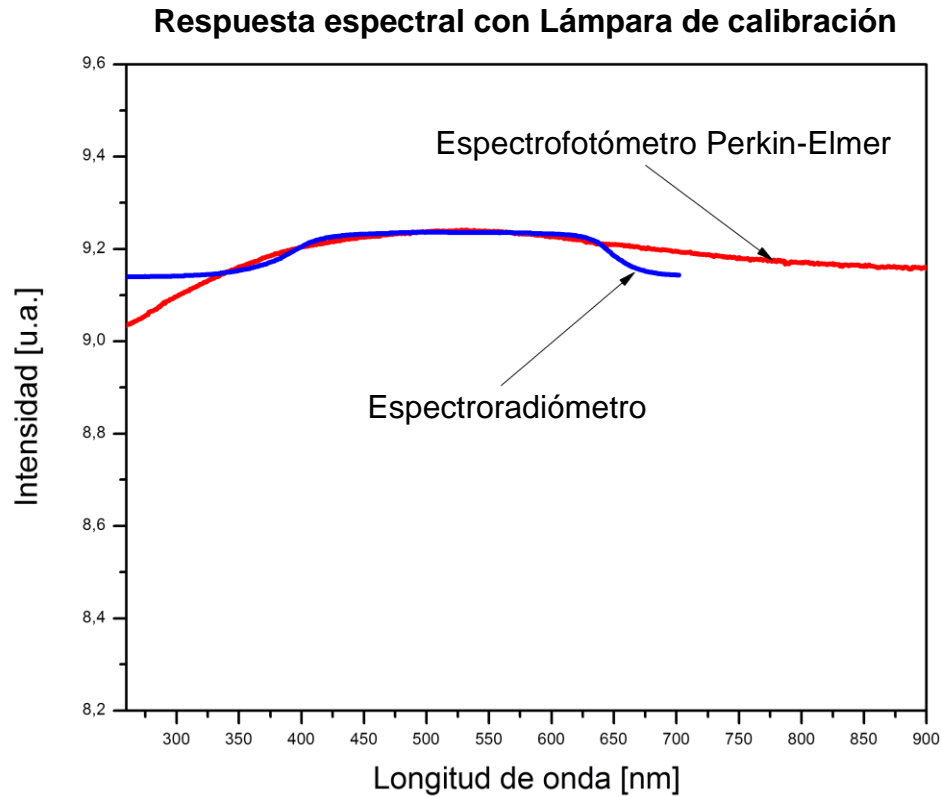
Otro método de calibración espectral utilizado, consistió en comparar la respuesta espectral del EPR con la respuesta de un **Espectrómetro Perkin-Elmer Lambda 35 UV-VIS**, el cual tiene un certificado de calibración dado por el fabricante. En esta comparación se utilizó como fuente una lámpara de calibración halógena de filamento de tungsteno. En la figura 2-18 se muestra individualmente los dos espectros registrados, mientras que en la figura 2-19, se ilustra la coincidencia de ambos espectros en la región de interés (360 nm – 650 nm). En las zonas fuera del rango de operación del Espectroradiómetro (<360 nm y >650 nm), la no coincidencia de los espectros se debe a que los dos equipos tienen diferentes detectores, por ejemplo el PMT Espectroradiómetro tiene mayor sensibilidad y eficiencia cuántica hacia los colores azules y el ultravioleta cercano, mientras que el detector de **Espectrómetro Perkin-Elmer Lambda 35 UV-VIS**, posee una respuesta extendida hacia los colores rojos y parte del infrarrojo cercano.

**Figura 2-18:** (Arriba) Respuesta espectral del Espectroradiómetro para la lámpara halógena de filamento. (Abajo) respuesta espectral del espectrómetro Perkin-Elmer Lambda 35 UV-VIS para la lámpara halógena de filamento.



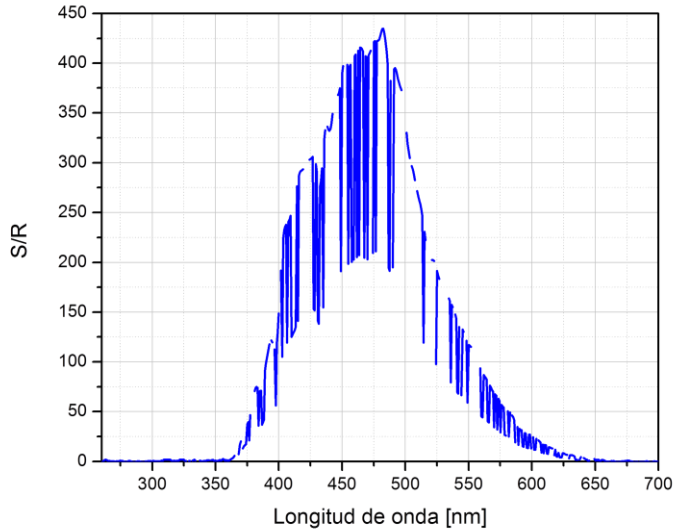


**Figura 2-19:** Calibración espectral con una fuente extendida del tipo lámpara halógena de filamento de tungsteno B011 4620.



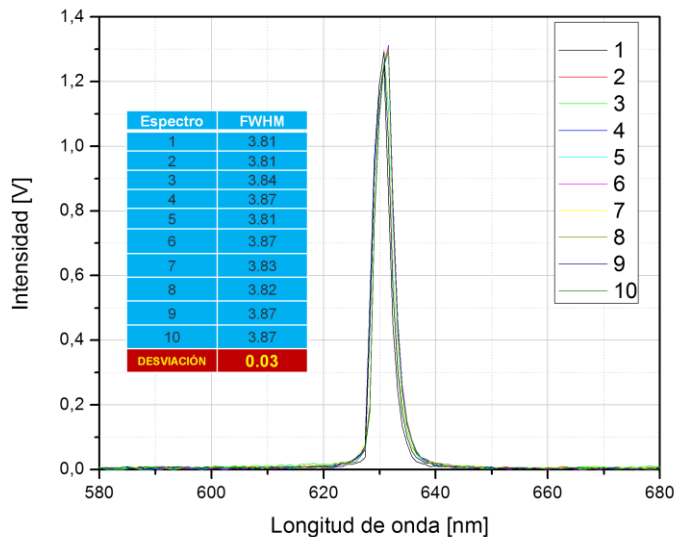
### 2.4.2 Relación Señal Ruido

El ruido está presente en cualquier tipo de configuración electrónica debido a pequeñas fluctuaciones que son consecuencia de: variaciones aleatorias en todo tipo de sistemas físicos y perturbaciones debidas a agentes naturales. El ruido electrónico genera una pérdida en la señal de interés, ya que cuando estas dos señales se encuentran inmersas y son de órdenes similares, se debe recurrir a sistemas sofisticados para recuperar la información. En este sentido, se calcula la relación señal ruido (S/R) de nuestro sistema, de manera que sea posible determinar el rango de operación del Espectroradiómetro. Este cociente indica el número de veces que es mayor la señal con respecto al ruido electrónico del sistema. La figura 2-20 muestra la relación S/R para un espectro solar obtenido con el EPR.

**Figura 2-20:** Relación Señal-Ruido

### 2.4.3 Repetitividad de los registros

Para realizar las pruebas de estabilidad y repetitividad del EPR, se utilizó un láser de He-Ne y se tomaron 10 espectros del mismo con el fin de verificar la estabilidad en la forma de la señal y las variaciones en el pico de mayor intensidad. En la figura 2-21 se observan los resultados superpuestos de los 10 espectros obtenidos, junto con las variaciones y desviación estándar del ancho a mitad de altura (FWHM). Además, en la tabla 2-4 se observa que las variaciones de la amplitud máxima no sobrepasan los 0.12 voltios

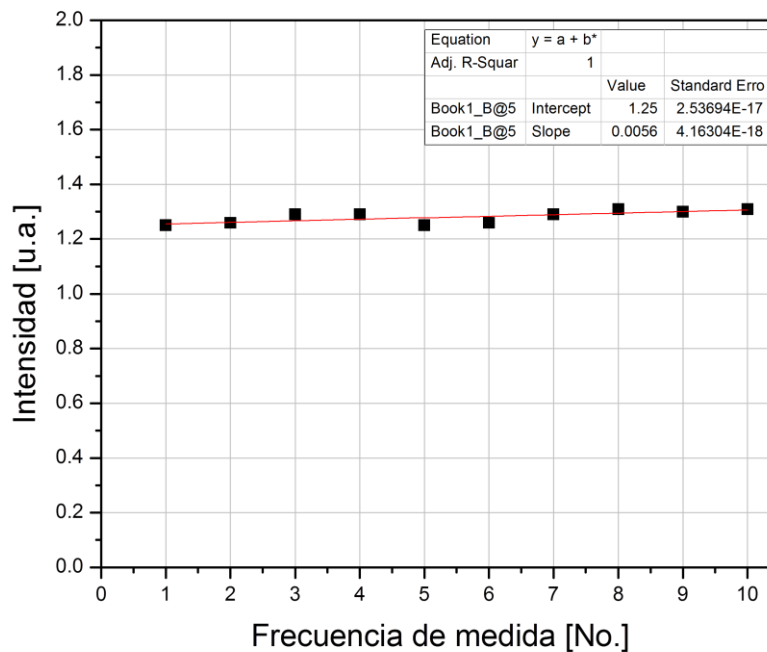
**Figura 2-21:** Estabilidad en la repetitividad de los registros obtenidos con el EPR.

**Tabla 2-4:** Variaciones del pico de mayor intensidad en los diez espectros obtenidos del láser de He-Ne.

Espectro	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Pico de Mayor intensidad [V]	1,25	1,26	1,29	1,29	1,25	1,26	1,19	1,31	1,30	1,31

Los datos de la Tabla 2-4 se representan gráficamente en la figura 2-22. En donde se muestra la variación de los máximos de intensidad correspondientes al láser de He-Ne. En esta figura, el ajuste lineal indica una buena fiabilidad en pruebas de repetitividad del sistema, ya que el valor de la pendiente (0.0056) hacer referencia a una sutil variación en el valor de los máximos de intensidad en cada una de las mediciones.

**Figura 2-22:** Registro de intensidad luminosa en función de la frecuencia de medida del fenómeno bajo las mismas condiciones y a intervalos de tiempo inferiores a 3 minutos.





# 3. Metodología para el cálculo del espesor óptico de los aerosoles mediante Espectroradiometría

Como se mencionó anteriormente, los aerosoles son en buena medida responsables de cambios climáticos y de la calidad del aire que respiramos, entonces su estudio es de gran importancia debido a que estos no solo se ven afectados por la dinámica atmosférica, sino que también son capaces de modificarla; además, sus efectos también se sienten en el balance radiativo entre la superficie de la tierra y la atmósfera por procesos de absorción y scattering de radiación y por su distribución vertical. A lo largo del mundo, se han venido realizando diferentes tipos de mediciones de los aerosoles atmosféricos (sistemas remotos, sistemas satelitales, mediciones *in-situ*, entre otras) con el fin de reducir las incertidumbres relacionadas con su impacto en el clima. (Toledano C. C., 2007)

Para entender cuáles son los efectos de los aerosoles, es necesario primero conocer sus propiedades ópticas y radiativas, tales como el espesor óptico en sus dos versiones, Aerosol Optical Thickness - AOT, y el Aerosol Optical Depth – AOD, los coeficientes de scattering ( $\sigma_s$ ), de absorción ( $\sigma_a$ ) y de extinción total ( $\sigma_e = \sigma_a + \sigma_s$ ), radio efectivo de tamaño, las cuales dependen directamente de la longitud de onda de la radiación con la cual interactúan. (Montilla, 2010)

## 3.1 Espesor óptico de los aerosoles - AOD

El AOD o longitud de camino óptico es una cantidad adimensional que representa la atenuación o extinción total de la radiación solar desde la parte superior de la atmósfera hasta la superficie causada debido a procesos de absorción y scattering por la columna

de aerosoles en suspensión. Cuanto mayor sea el valor de AOD, son más los aerosoles dentro de la columna, lo que se traduce en menor visibilidad, Valores de AOD menores que 0.2, representan bajas cantidades de aerosoles (alta visibilidad), AOD mayores que 1.0 indican que la visibilidad es baja. El AOD es una cantidad de suma importancia en la construcción de modelos climáticos.

El AOD es sensible a los eventos de acumulación de contaminantes, su distribución espacial y su rango de tamaños, hecho que resulta relevante para la exploración de la calidad del aire sobre Medellín, ya que los aerosoles son especies atmosféricas responsables en buena medida de influenciar la calidad del aire, los fenómenos meteorológicos, y el cambio climático.

Para determinar el espesor óptico de los aerosoles – AOD a partir de medidas de irradiancia solar directa, partimos de la ley de Beer-Lambert-Bouger, la cual nos dice que la radiación que pasa a través de un medio absorbente y dispersor tiene un comportamiento exponencial decreciente. Para este caso en particular, la radiación involucrada corresponde a la comprendida en cierto ángulo sólido y el medio es la atmósfera terrestre, en este caso la ley de Beer-Lambert-Bouger puede expresarse así (Alcántara, 2013):

$$E_{\lambda} = \frac{E_{0\lambda}}{R^2} e^{-m\tau_T} \quad (3.1)$$

Donde  $E_{\lambda}$  es la irradiancia directa medida en la superficie terrestre en función de la longitud de onda,  $E_{0\lambda}$  corresponde a la irradiancia en la parte superior de la atmósfera (extraterrestre) a la distancia media Tierra-Sol,  $m$  es la masa óptica a la hora de la medida,  $R^2$  es la distancia media Tierra-Sol y  $\tau_T$  es el espesor óptico total de la atmósfera, en el cual se incluyen todas las posibles atenuaciones debido a los principales componentes atmosféricos (Rollin, 2011; Pérez, 2010).

Reemplazando la irradiancia por la respuesta del detector (voltaje) a cada longitud de onda, podemos escribir la ecuación (3.1) de la forma:

$$V_{\lambda} = \frac{V_{0\lambda}}{R^2} e^{-m\tau_T} \quad (3.2)$$

---

Despejando el espesor óptico total de la ecuación (3.2) tenemos:

$$\tau_T = \frac{\text{Ln}\left(\frac{V_{0\lambda}}{R^2}\right) - \text{Ln}V_\lambda}{m} \quad (3.3)$$

Donde  $V_\lambda$  es la respuesta del detector en voltios y  $V_{0\lambda}$  corresponden a la respuesta que tendría el Espectroradiómetro si pudiese medir la radiación solar fuera de la atmósfera terrestre. Ambas señales de voltaje son función de la longitud de onda.

Debido a que el principal interés de este trabajo se centra en determinar el espesor óptico debido exclusivamente a los aerosoles  $\tau_A$  atmosféricos, se le debe restar al espesor óptico total  $\tau_T$  las contribuciones debido a moléculas  $\tau_R$  (dispersión Rayleigh) y la contribución del Ozono  $\tau_{OZ}$ . Según lo anterior, para determinar el AOD, debemos restarle al espesor óptico total los espesores ópticos debido a Rayleigh y al Ozono:

$$\tau_T = \tau_A + \tau_R + \tau_{OZ} \quad \rightarrow \quad \tau_A = \tau_T - \tau_R + \tau_{OZ} \quad (3.4)$$

En la ecuación (3.2) es evidente que para estimar el AOD -  $\tau_A$ , a partir de valores de voltaje registrados por el EPR  $V_\lambda$ , se debe determinar primero la masa óptica -  $m$ , la distancia media Tierra-Sol -  $R^2$ , el espesor óptico del Ozono -  $\tau_{OZ}$ , el espesor óptico Rayleigh -  $\tau_R$  y un método para encontrar el voltaje -  $V_{0\lambda}$  que tendría nuestro equipo si fuera ubicado en el tope de la atmósfera.

## 3.2 Cálculo de la masa óptica (m) y la distancia media Tierra-Sol ( $R^2$ )

Tanto la masa óptica como la distancia tierra sol son variables que dependen de la posición del sol, la cual a su vez depende de parámetros como: lugar en el que se realicen las mediciones (longitud y latitud), la época del año (día Juliano) y de la hora en la que se realicen las mediciones (posición del Sol).

### 3.2.1 Masa óptica

La masa óptica o masa de aire es una medida que define indirectamente la distancia entre la altura del Sol respecto al horizonte y un observador en tierra. Cuando el sol haya

alcanzado Zenit, la distancia será mínima, ya que los rayos solares forman un ángulo aproximadamente igual a  $90^\circ$  con respecto al horizonte, Cuando el Sol se encuentra más cercano al horizonte, la masa de aire crece y la distancia que tienen que atravesar los rayos para alcanzar la posición de un observador en tierra incrementa. A la posición de cenital se le asigna como referencia una masa de aire unitaria. En una primera aproximación para el valor de la masa óptica y si se supone una atmósfera plano paralela, la expresión para  $m$  en función del ángulo cenital es:

$$m = \frac{1}{\cos\theta_z} = \sec\theta_z \quad (3.5)$$

Sin embargo para una atmósfera real, la expresión para la masa óptica en función del ángulo cenital fue dada empíricamente por Kasten y Young en 1989. (Kasten, 1989)

$$m = (\cos\theta_z + 0,15 (93,885 - \theta_z)^{-1,253})^{-1} \quad (3.6)$$

En la ecuación (3.6) el valor del ángulo cenital  $\theta_z$  puede determinarse por un procedimiento recomendado por la **Earth System Research Laboratory** de la **NOAA** en la dirección <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/solareqns.PDF>. A continuación se muestra la expresión utilizada para determinar el ángulo cenital. (NOAA, 2015)

$$\cos\theta_z = \sin(lat) \sin(decl) + \cos(lat) \cos(decl) \cos(ha) \quad (3.7)$$

Donde **lat** corresponde a la latitud del lugar en el que se realicen las mediciones, **decl** es el ángulo de declinación solar el cual a su vez depende de la fracción de año y **ha** es un factor conocido como el ángulo de hora solar.

### 3.2.2 Distancia Tierra-Sol

La cantidad de radiación solar que llega a la tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el sistema Tierra-Sol ( $R^2$ ), Debido a que la tierra gira alrededor del Sol describiendo una trayectoria elíptica, con el Sol ubicado en uno de sus focos, el valor de  $R^2$  no es constante; por lo tanto un valor medio se denomina una unidad astronómica, de modo que 1AU es igual a  $1,496 \times 10^8$  Km. Este valor varía entre 0.967UA y 1.033UA según el día del año.

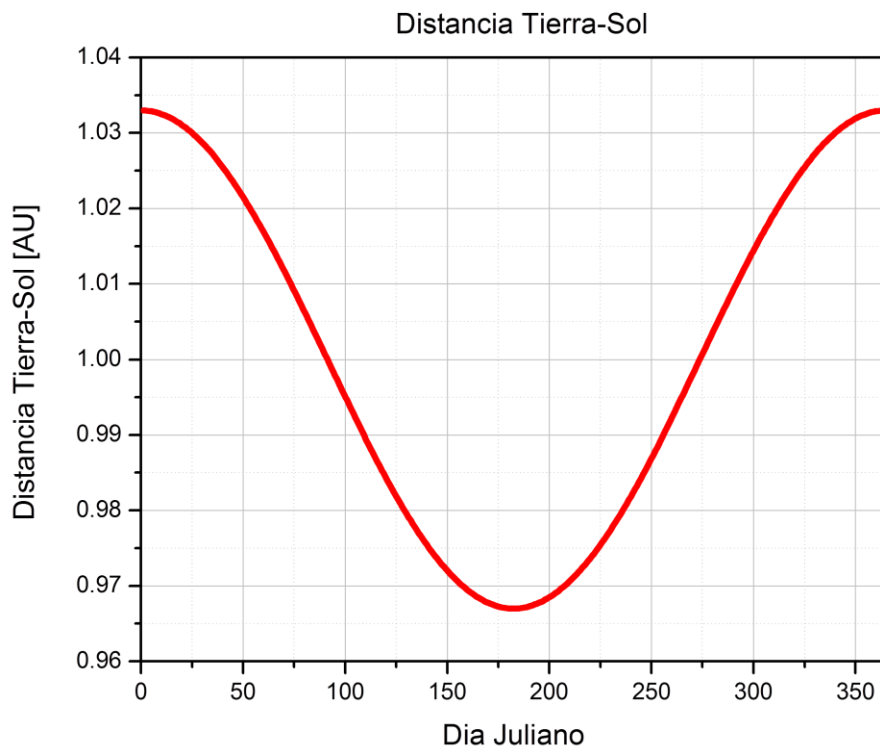


Una forma matemática simple para expresar este parámetro fue presentada por Duffie y Beckman, en la cual la distancia Tierra-Sol depende del día juliano del año  $d_n$ . (Duffie, 1975)

$$R^2 = \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{2\pi d_n}{365} \right) \right] \quad (3.8)$$

En la expresión 3.8 el día juliano toma de valores desde 1 hasta 365 con 1 igual al 01 de Enero y 365 al 31 de Diciembre. En la figura 3-1 se muestra la variación de la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas para un año calendario.

**Figura 3-1:** Variación de la distancia Tierra-Sol en función del día Juliano.



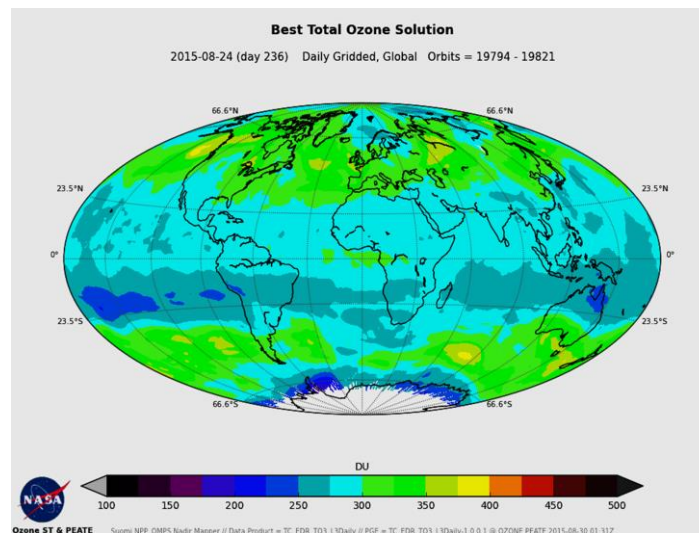
### 3.3 Espesor óptico del Ozono

El espesor óptico debido al ozono viene dado por la siguiente expresión:

$$\tau_{OZ}(\lambda) = A_{O_3}(\lambda)I_0 \quad (3.9)$$

Donde  $A_{O_3}$  es el coeficiente de absorción del ozono en  $\text{cm}^{-1}$  e  $I_0$  es la cantidad de ozono que por lo general se expresa en unidades Dobson, donde una unidad Dobson está definida como el espesor en cm que el ozono tendría si todo el ozono en columna estuviera a condiciones ideales (273 K y 1 atm),  $1\text{DU} = 0,001 [\text{cm},\text{atm}]$ . Los datos de concentración de ozono en DU para el sitio de la medición son obtenidos gracias a las mediciones del Espectrómetro TOMS del satélite Aura y pueden consultarse en la dirección <http://ozoneaq.gsfc.nasa.gov/>. La figura 3-2 ilustra un diagrama de color según la concentración de ozono en todo el globo terráqueo, donde los colores azules y violetas indican una baja concentración ( $\sim 150$  DU), mientras que los colores naranjas y rojos indican valores altos de concentración ( $\sim 450$  DU), (Pérez, 2010).

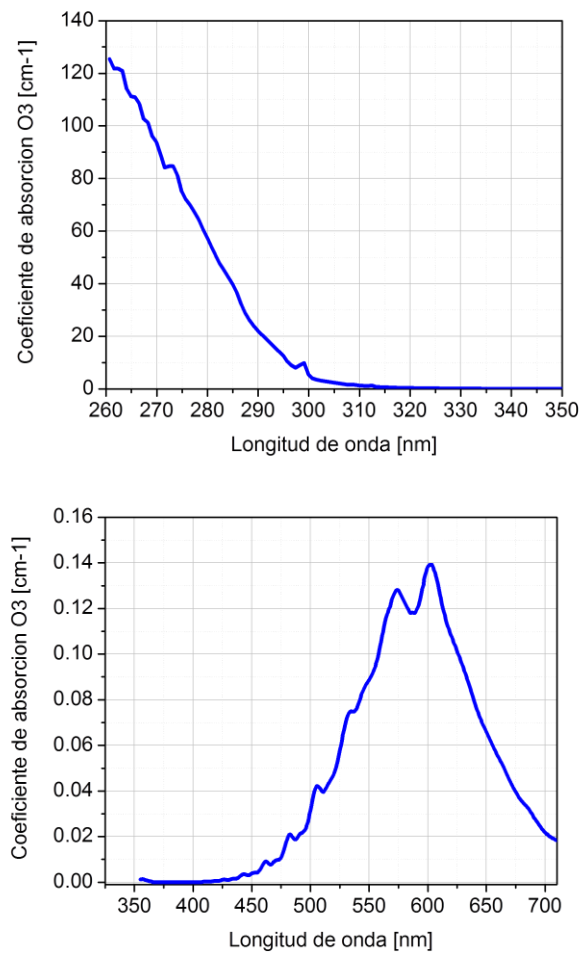
**Figura 3-2:** Mapa de color para la concentración de ozono en columna. Datos obtenidos del Espectrómetro TOMS del satélite AURA de la NASA.



El efecto de absorción espectral del ozono ( $A_{O_3}$ ) es muy apreciable por debajo de los 300 nm, y moderadamente entre 450 nm y 700 nm, Mientras que en entre 300 nm y 450 nm

su efecto es casi despreciable. En la figura 3-3 se muestra el comportamiento del coeficiente de absorción del ozono entre 260 nm y 710 nm, (Gueymard, 1995)

**Figura 3-3:** Coeficiente de absorción del ozono en el rango 260 nm hasta 700 nm. Estos datos fueron obtenidos de la tabla 3-1.



La tabla 3.1 contiene los valores del coeficiente de absorción del ozono  $A_{O_3}(\lambda)$  en el rango espectral 260 nm hasta 700 nm. Estos valores fueron tomados de (Gueymard, 1995) y adaptados según la resolución espectral del EPR (0.8 nm).

**Tabla 3-1:** Coeficiente de absorción del ozono.

$\lambda$	$A_{O_3}$	$\lambda$	$A_{O_3}$	$\lambda$	$A_{O_3}$	$\lambda$	$A_{O_3}$	$\lambda$	$A_{O_3}$
260,713	125,441	292,405	17,583	324,931	0,288	356,623	0,001	388,315	0,000
261,547	121,786	293,239	15,975	325,765	0,169	357,457	0,001	389,149	0,000
262,381	121,817	294,073	14,364	326,599	0,107	358,291	0,001	389,983	0,000
263,215	120,898	294,907	12,744	327,433	0,098	359,125	0,001	390,817	0,000
264,049	114,234	295,741	10,420	328,267	0,155	359,959	0,000	391,651	0,000
264,883	111,281	296,575	8,910	329,101	0,073	360,793	0,000	392,485	0,000
265,717	110,994	297,409	7,997	329,935	0,059	361,627	0,0001	393,319	0,000
266,551	108,450	298,243	8,957	330,769	0,073	362,461	0,0001	394,153	0,000
267,385	102,710	299,077	9,832	331,603	0,088	363,295	0,0001	394,987	0,000
268,219	101,262	299,911	5,538	332,437	0,043	364,129	0,0001	395,821	0,000
269,053	96,152	300,745	4,003	333,271	0,041	364,963	0,0001	396,655	0,000
269,887	93,974	301,579	3,528	334,105	0,069	365,797	0,0001	397,489	0,000
270,721	89,356	302,413	3,190	334,939	0,035	366,631	0,0001	398,323	0,000
271,555	84,146	303,247	2,878	335,773	0,022	367,465	0,0001	399,157	0,000
272,389	84,711	304,081	2,643	336,607	0,015	368,299	0,0001	399,991	0,000
273,223	84,684	304,915	2,369	337,441	0,045	369,133	0,0001	400,825	0,000
274,057	81,210	305,749	2,167	338,275	0,023	369,967	0,0001	401,659	0,000
274,891	75,214	306,583	1,955	339,109	0,013	370,801	0,0001	402,493	0,000
275,725	72,092	307,417	1,751	339,943	0,019	371,635	0,0001	403,327	0,000
276,559	69,969	308,251	1,619	340,777	0,018	372,469	0,0001	404,161	0,000
277,393	67,474	309,085	1,526	341,611	0,008	373,303	0,0001	404,995	0,000
278,227	64,538	309,919	1,255	342,445	0,009	374,137	0,0001	405,829	0,000
279,061	61,047	310,753	1,189	343,279	0,012	374,971	0,0001	406,663	0,000
279,895	57,764	311,587	1,078	344,113	0,016	375,805	0,0001	407,497	0,000
280,729	54,440	312,421	1,352	344,947	0,008	376,639	0,0001	408,331	0,000
281,563	50,864	313,255	0,792	345,781	0,009	377,473	0,0001	409,165	0,000
282,397	47,709	314,089	0,688	346,615	0,006	378,307	0,0001	409,999	0,000
283,231	45,171	314,923	0,628	347,449	0,006	379,141	0,0001	410,833	0,000
284,065	42,742	315,757	0,624	348,283	0,004	379,975	0,0001	411,667	0,000
284,899	40,128	316,591	0,470	349,117	0,004	380,809	0,0001	412,501	0,000
285,733	36,825	317,425	0,478	349,951	0,004	381,643	0,0001	413,335	0,000
286,567	32,6326	318,259	0,399	350,785	0,004	382,477	0,0001	414,169	0,000
287,401	28,9799	319,093	0,318	351,619	0,004	383,311	0,0001	415,003	0,000
288,235	26,2746	319,927	0,378	352,453	0,003	384,145	0,0001	415,837	0,000
289,069	24,0937	320,761	0,278	353,287	0,003	384,979	0,0001	416,671	0,000
289,903	22,2284	321,595	0,209	354,121	0,002	385,813	0,0001	417,505	0,000
290,737	20,6168	322,429	0,262	354,955	0,002	386,647	0,0001	418,339	0,000
291,571	19,1576	324,097	0,25932	355,789	0,002	387,481	0,0001	419,173	0,000

$\lambda$	$A_{O_3}$	$\lambda$	$A_{O_3}$	$\lambda$	$A_{O_3}$	$\lambda$	$A_{O_3}$	$\lambda$	$A_{O_3}$
420,007	0,000	451,699	0,001	483,391	0,009	515,083	0,018	546,775	0,034
420,841	0,000	452,533	0,001	484,225	0,009	515,917	0,018	547,609	0,035
421,675	0,000	453,367	0,002	485,059	0,009	516,751	0,019	548,443	0,035
422,509	0,000	454,201	0,002	485,893	0,009	517,585	0,019	549,277	0,036
423,343	0,000	455,035	0,002	486,727	0,009	518,419	0,020	550,111	0,036
424,177	0,000	455,869	0,002	487,561	0,008	519,253	0,020	550,945	0,036
425,011	0,000	456,703	0,002	488,395	0,008	520,087	0,021	551,779	0,037
425,845	0,000	457,537	0,002	489,229	0,008	520,921	0,021	552,613	0,037
426,679	0,000	458,371	0,003	490,063	0,008	521,755	0,022	553,447	0,037
427,513	0,000	459,205	0,003	490,897	0,008	522,589	0,022	554,281	0,038
428,347	0,000	460,039	0,003	491,731	0,008	523,423	0,023	555,115	0,038
429,181	0,000	460,873	0,003	492,565	0,009	524,257	0,023	555,949	0,039
430,015	0,000	461,707	0,004	493,399	0,009	525,091	0,024	556,783	0,039
430,849	0,000	462,541	0,004	494,233	0,009	525,925	0,024	557,617	0,040
431,683	0,000	463,375	0,004	495,067	0,010	526,759	0,025	558,451	0,040
432,517	0,000	464,209	0,004	495,901	0,010	527,593	0,025	559,285	0,040
433,351	0,000	465,043	0,004	496,735	0,011	528,427	0,026	560,119	0,041
434,185	0,000	465,877	0,004	497,569	0,011	529,261	0,027	560,953	0,041
435,019	0,001	466,711	0,004	498,403	0,011	530,095	0,027	561,787	0,042
435,853	0,001	467,545	0,003	499,237	0,012	530,929	0,028	562,621	0,044
436,687	0,001	468,379	0,003	500,071	0,012	531,763	0,029	563,455	0,045
437,521	0,001	469,213	0,003	500,905	0,012	532,597	0,030	564,289	0,045
438,355	0,001	470,047	0,004	501,739	0,013	533,431	0,030	565,123	0,046
439,189	0,001	470,881	0,004	502,573	0,013	534,265	0,031	565,957	0,046
440,023	0,001	471,715	0,004	503,407	0,014	535,099	0,031	566,791	0,047
440,857	0,001	472,549	0,004	504,241	0,015	535,933	0,031	567,625	0,048
441,691	0,001	473,383	0,005	505,075	0,016	536,767	0,031	568,459	0,049
442,525	0,001	474,217	0,005	505,909	0,017	537,601	0,031	569,293	0,049
443,359	0,001	475,051	0,005	506,743	0,018	538,435	0,031	570,127	0,050
444,193	0,001	475,885	0,006	507,577	0,019	539,269	0,031	570,961	0,051
445,027	0,001	476,719	0,006	508,411	0,020	540,103	0,031	571,795	0,051
445,861	0,001	477,553	0,006	509,245	0,020	540,937	0,031	572,629	0,051
446,695	0,001	478,387	0,007	510,079	0,020	541,771	0,032	573,463	0,052
447,529	0,001	479,221	0,007	510,913	0,019	542,605	0,032	574,297	0,052
448,363	0,001	480,055	0,008	511,747	0,017	543,439	0,033	575,131	0,052
449,197	0,001	480,889	0,009	512,581	0,017	544,273	0,033	575,965	0,052
450,031	0,001	481,723	0,009	513,415	0,017	545,107	0,033	576,799	0,052
450,865	0,001	482,557	0,009	514,249	0,017	545,941	0,034	577,633	0,052

$\lambda$	$A_{O_3}$	$\lambda$	$A_{O_3}$	$\lambda$	$A_{O_3}$	$\lambda$	$A_{O_3}$
578,467	0,051	610,159	0,053	641,851	0,033	673,543	0,018
579,301	0,051	610,993	0,053	642,685	0,032	674,377	0,017
580,135	0,050	611,827	0,052	643,519	0,032	675,211	0,017
580,969	0,050	612,661	0,051	644,353	0,031	676,045	0,017
581,803	0,049	613,495	0,051	645,187	0,031	676,879	0,016
582,637	0,048	614,329	0,050	646,021	0,030	677,713	0,016
583,471	0,048	615,163	0,049	646,855	0,030	678,547	0,016
584,305	0,048	615,997	0,048	647,689	0,029	679,381	0,015
585,139	0,047	616,831	0,048	648,523	0,028	680,215	0,015
585,973	0,047	617,665	0,047	649,357	0,028	681,049	0,015
586,807	0,047	618,499	0,046	650,191	0,027	681,883	0,014
587,641	0,047	619,333	0,046	651,025	0,027	682,717	0,014
588,475	0,047	620,167	0,045	651,859	0,027	683,551	0,014
589,309	0,046	621,001	0,045	652,693	0,026	684,385	0,014
590,143	0,046	621,835	0,044	653,527	0,026	685,219	0,013
590,977	0,046	622,669	0,044	654,361	0,026	686,053	0,013
591,811	0,046	623,503	0,043	655,195	0,026	686,887	0,013
592,645	0,047	624,337	0,043	656,029	0,025	687,721	0,013
593,479	0,047	625,171	0,042	656,863	0,025	688,555	0,012
594,313	0,048	626,005	0,042	657,697	0,025	689,389	0,012
595,147	0,049	626,839	0,041	658,531	0,024	690,223	0,012
595,981	0,050	627,673	0,041	659,365	0,024	691,057	0,012
596,815	0,051	628,507	0,040	660,199	0,024	691,891	0,011
597,649	0,051	629,341	0,040	661,033	0,023	692,725	0,011
598,483	0,052	630,175	0,039	661,867	0,023	693,559	0,011
599,317	0,052	631,009	0,039	662,701	0,022	694,393	0,011
600,151	0,053	631,843	0,038	663,535	0,022	695,227	0,011
600,985	0,053	632,677	0,038	664,369	0,021	696,061	0,010
601,819	0,054	633,511	0,037	665,203	0,021	696,895	0,010
602,653	0,054	634,345	0,037	666,037	0,020	697,729	0,010
603,487	0,054	635,179	0,036	666,871	0,020	698,563	0,010
604,321	0,055	636,013	0,036	667,705	0,019	699,397	0,009
605,155	0,055	636,847	0,035	668,539	0,019	700,231	0,009
605,989	0,055	637,681	0,035	669,373	0,019		
606,823	0,055	638,515	0,035	670,207	0,018		
607,657	0,054	639,349	0,034	671,041	0,018		
608,491	0,054	640,183	0,034	671,875	0,018		
609,325	0,054	641,017	0,033	672,709	0,018		

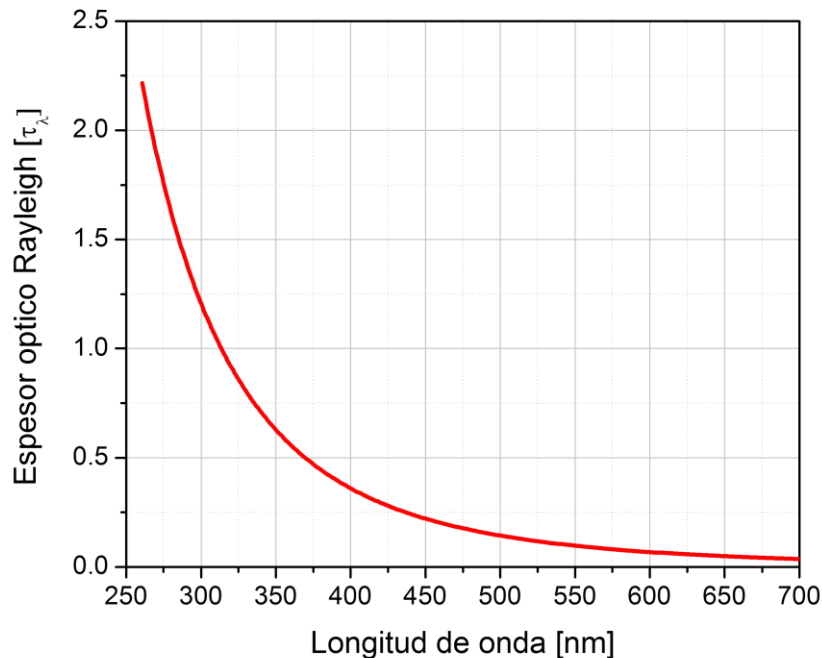
### 3.4 Espesor óptico Rayleigh

Como se mencionó anteriormente, el espesor óptico debido a moléculas (dispersión Rayleigh) es un proceso en el que los elementos dispersores presentes en la atmósfera tienen menor tamaño que la longitud de onda incidente. Este proceso es continuo espectralmente y sus efectos son mayores en longitudes de onda cercanas al ultravioleta. Una formulación empírica propuesta por Hansen en 1974, puede ser una guía para determinar la contribución Rayleigh, la cual se fundamenta en la ecuación (3.10a):

$$\tau_R = 0,008569\lambda^{-4}(1 + 0,0113\lambda^{-2} + 0,00013\lambda^{-4}) \quad (3.10a)$$

En la Figura 3-4 se ilustra la variación según la expresión 3.10a del espesor óptico debido a moléculas (Rayleigh) en función de la longitud de onda para el rango espectral 250 nm – 700 nm. (Hansen, 1974).

**Figura 3-4:** Variación espectral del espesor óptico debido a moléculas (Rayleigh) según la expresión 3.10a.



La expresión 3.10a corresponde a un caso general, de modo que para ajustar esta función a un sitio en particular, se debe realizar una corrección en altura multiplicando la expresión 3.10a por el factor  $\frac{P}{P_0}$ , donde  $P$  es la presión hidrostática del lugar o sitio de interés, que en nuestro caso particular se obtuvo a partir de los datos proporcionados por la estación meteorológica número 203 (UNAL-SEDE AGRONOMÍA) del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA, 2011). La presión  $P_0$  es la que corresponde a la del nivel del mar (1013.5 hPa). De modo que el espesor óptico Rayleigh toma la forma:

$$\tau_R = 0,008569\lambda^{-4}(1 + 0,0113\lambda^{-2} + 0,00013\lambda^{-4})\frac{P}{P_0}, \quad 3.10b$$

### 3.5 Método de calibración Langley

Para determinar la respuesta de nuestro detector en la parte superior de la atmósfera, se aplica el método de calibración Langley. Este método consiste en realizar medidas de irradiancia solar directa a diferentes horas del día (variando la masa óptica), de modo que, a medida que la cantidad de porción de atmósfera que atraviesan los rayos solares aumenta, la energía detectada por el EPR disminuye. Mediante la ley de Beer-Lambert-Bouguer se puede aplicar este método: (Alcántara, 2013; Tanaka, 1986)

$$V_\lambda = \frac{V_{0\lambda}}{R^2} e^{-m\tau_T} \quad (3.11)$$

Tomando el logaritmo en ambos lados de la expresión (linealización):

$$\ln V_\lambda = \ln \frac{V_{0\lambda}}{R^2} - m\tau_T \quad (3.12)$$

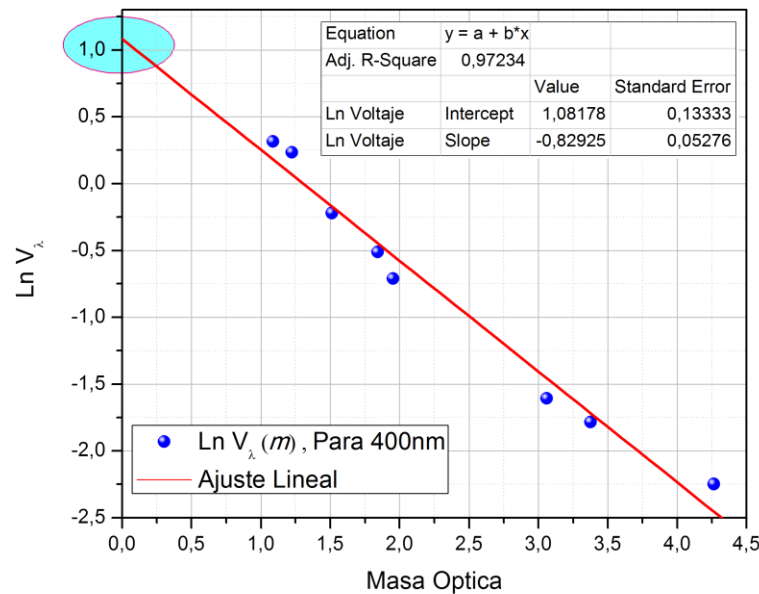
Si se toma una serie de medidas de  $V_\lambda$  a diferentes masas ópticas, se puede realizar una regresión lineal del logaritmo natural del voltaje medido por el Espectroradiómetro en función de la masa óptica, en la recta resultante, la pendiente corresponde al espesor óptico total, mientras que a partir del intercepto podemos encontrar el valor del voltaje cuando la masa óptica es cero, (calibración para voltaje extraterrestre). En este trabajo logró construir un espectro de calibración completo en el rango de longitudes de onda de 360 nm h 620 nm, con una resolución espectral de 0.8 nm. En la figura 3-5 se muestra un



ejemplo de la linealización para 400 nm, donde el valor del intercepto según la expresión 3.12 corresponde al factor  $Ln \frac{V_{0\lambda}}{R^2}$ . (Schmid, 1995).

Para aplicar el método de calibración Langley se debe tener una buena cantidad de medidas a diferentes horas del día para lograr una buena correlación en la regresión lineal. Además, las mediciones deben realizarse en intervalos de tiempo en los cuales el espesor óptico total permanezca lo más constante posible.

**Figura 3-5:** Regresión lineal para una serie de medidas de  $LnV_\lambda$  en función de la masa óptica  $m$ , para una longitud de onda de 400 nm. El círculo indica el valor correspondiente a  $m=0$  por extrapolación.



Para aplicar el método de calibración Langley se debe tener en cuenta las siguientes recomendaciones: (Alcántara, 2013)

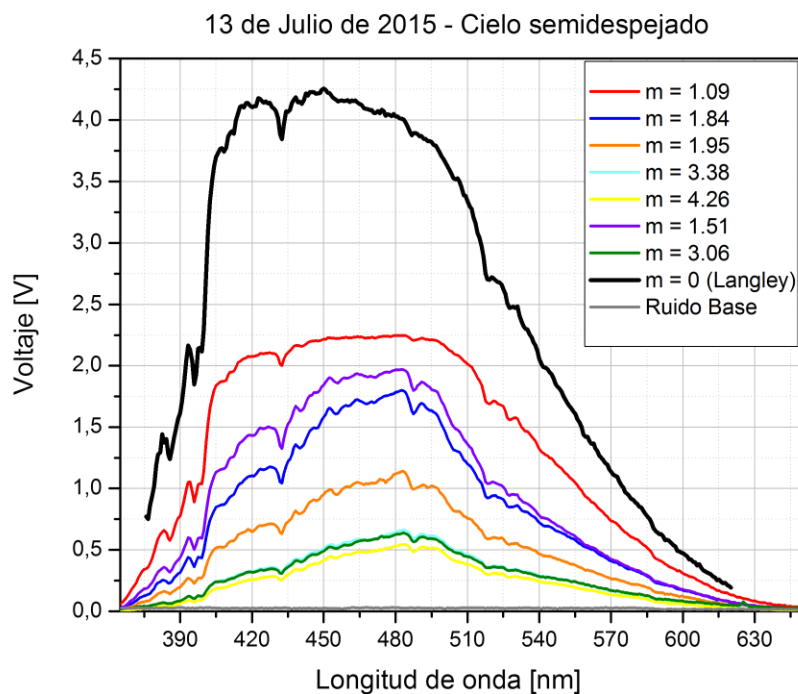
- Se recomienda ejecutar este método en condiciones de cielo despejado, ya que la presencia de nubes puede alterar la cantidad de radiación que recibe el instrumento en tierra, lo que resulta en una pérdida de la linealidad a la hora de

hacer la regresión. Además es importante garantizar en la medida de lo posible que los datos sean obtenidos bajo condiciones de variabilidad atmosférica baja.

- Realizar las mediciones en un lugar que se encuentre por encima la mayor parte del día de la capa de mezcla, de modo que se eviten al máximo las variaciones de la concentración de aerosoles a la hora de las medidas.
- No se recomienda aplicar este método de calibración en masas de ópticas muy cercanas a  $m=0$ , ya que en estas horas tiene lugar la mayor actividad Solar, lo que se traduce en un levantamiento de la capa de mezcla debido a fenómenos turbulentos.

En este trabajo se eligió el día 13 de Julio de 2015 para aplicar el método de calibración Langley, ya que durante el tiempo en el que se realizaron las mediciones, se contó con cielo despejado. En la figura 3-6 se muestran los espectros solares tomados a diferentes horas del día (diferentes masas ópticas) y el espectro de calibración correspondiente a  $V_{0\lambda}$ , luego de aplicar el método Langley entre 360nm y 620nm.

**Figura 3-6:** Espectros utilizados para el método de calibración Langley.



### 3.6 Cálculo del espesor óptico AOD del aerosol

A partir del espectro de calibración obtenido por el método Langley, se tienen todos los elementos para determinar el espesor óptico debido exclusivamente a los aerosoles. De esta forma, el AOD se puede obtener a partir de la ley de Beer-Lambert-Bouguer:

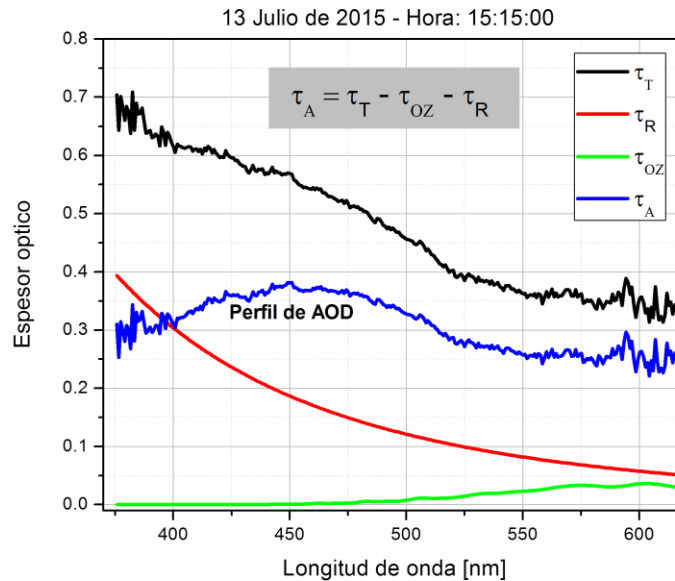
$$\tau_T = \frac{\text{Ln}\left(\frac{V_{0\lambda}}{R^2}\right) - \text{Ln}(V_\lambda)}{m} \quad (3.13)$$

Donde  $\tau_T$  es el espesor óptico total que comprende las contribuciones ozono y Rayleigh. Para el ozono, se emplea el procedimiento explicado en la sección 3.3, y para la contribución Rayleigh se procede según la sección 3.4. De esta forma fue posible obtener el espesor óptico  $\tau_A$  debido únicamente a los aerosoles, de acuerdo a la ecuación (3.14).

$$\tau_A = \tau_T - \tau_R + \tau_{OZ} \quad (3.14)$$

En la figura 3-7 se ilustran los perfiles del espesor óptico total, las correcciones de ozono y Rayleigh, y un perfil del espesor óptico de los aerosoles.

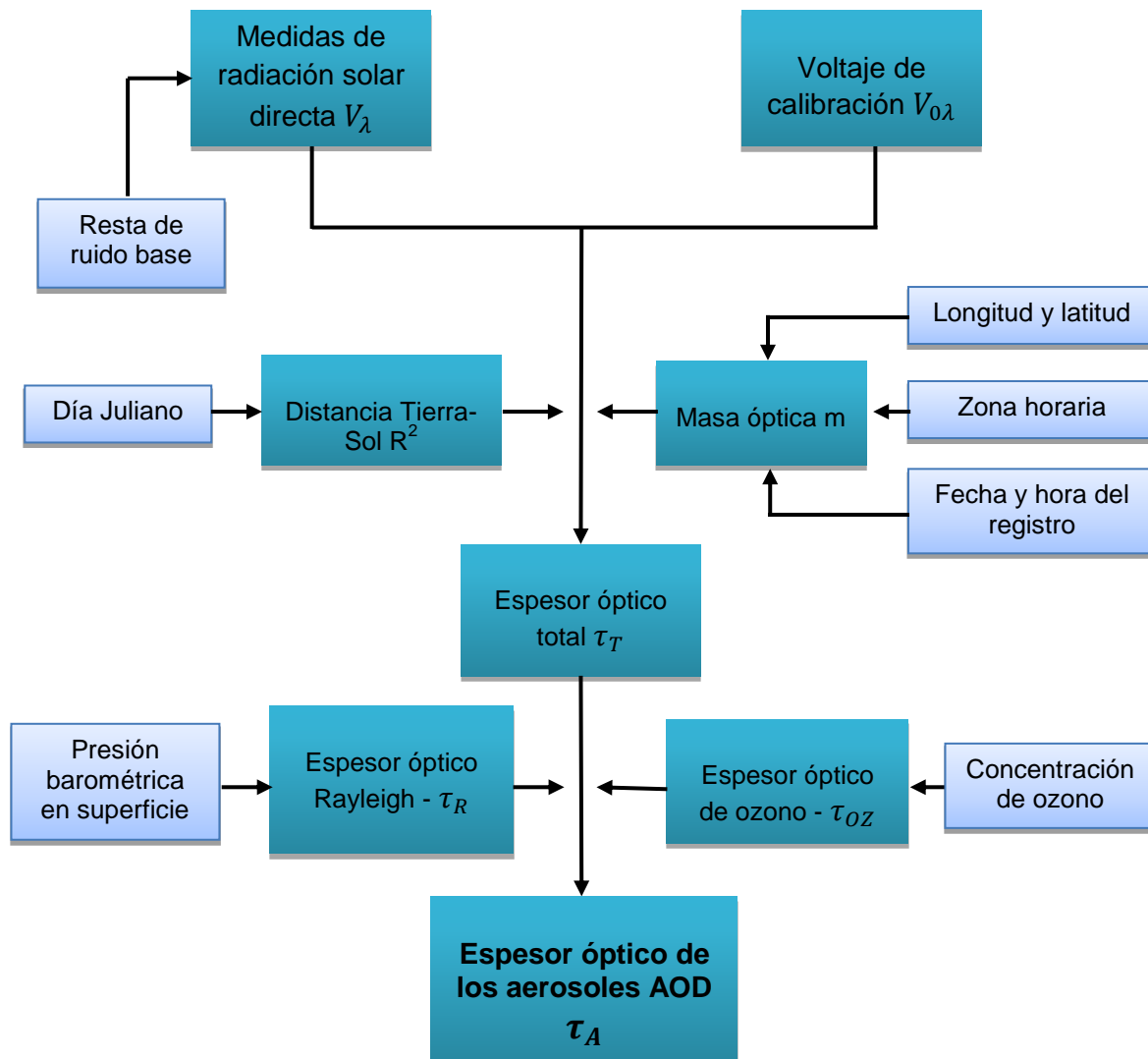
**Figura 3-7:** Perfil de AOD y perfiles de corrección.



A manera de resumen, en la figura 3-8, se muestra un diagrama esquemático para la obtención del espesor óptico de los aerosoles a partir de medidas de radiación solar directa. En este se ilustran las variables de entrada y los parámetros que se deben tener

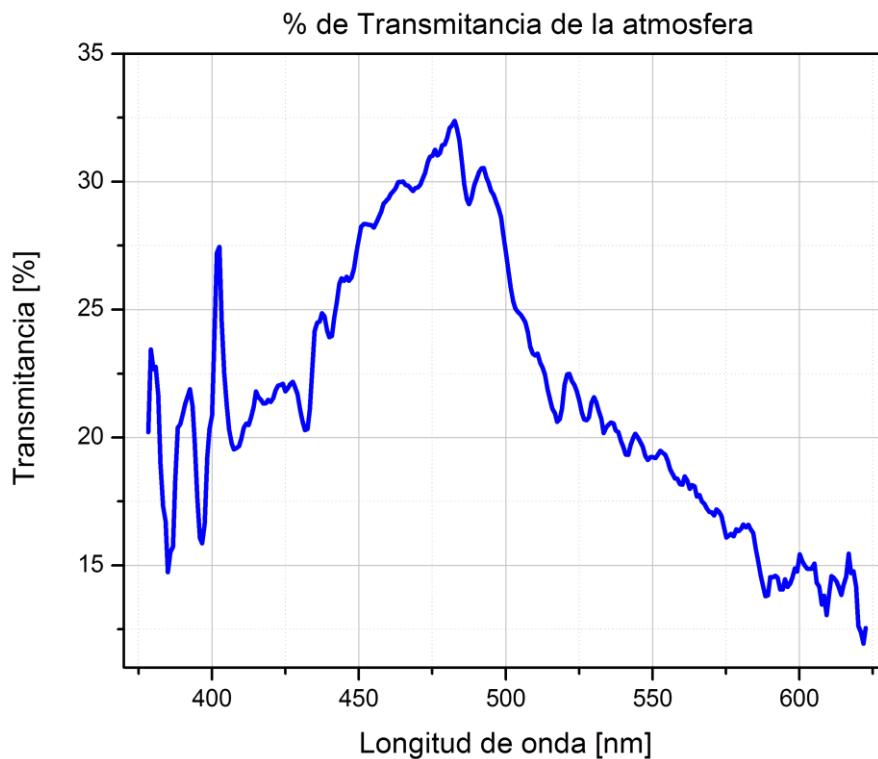
en cuenta en el algoritmo de inversión de señal de radiación solar directa a variable óptica de interés (AOD). En este diagrama se tiene en cuenta todos los ajustes y correcciones que se han explicado a lo largo de este trabajo, desde el registro de una señal de radiación solar directa, hasta la resta de las contribuciones atmosféricas. (Rollin, 2011)

**Figura 3-8:** Diagrama esquemático para la inversión de señal de radiación solar directa a variable óptica (AOD).



A partir del espectro de referencia obtenido con el método de Langley, es posible obtener un perfil espectral de la transmitancia atmosférica  $\left(\frac{I}{I_0}\right)$ , donde  $I_0$  es la intensidad de la radiación solar en función de la longitud de onda fuera de la atmósfera e  $I$  es la intensidad espectral registrada por el EPR. En nuestro caso  $I_0 = V_{0\lambda}$  e  $I = V_\lambda$ . En la figura 3-9 se ilustra la transmitancia (%) de la luz solar a través de la atmósfera según el registro del espectro registrado en tierra por el EPR.

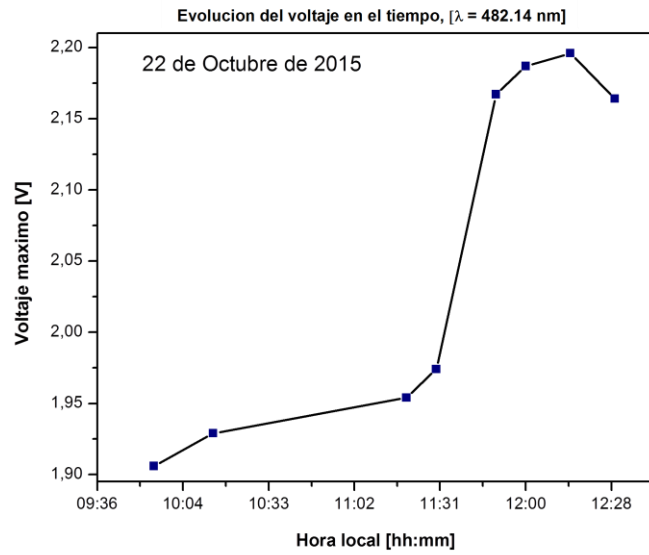
**Figura 3-9:** Espectro de Transmitancia de la luz solar a través de la atmósfera.



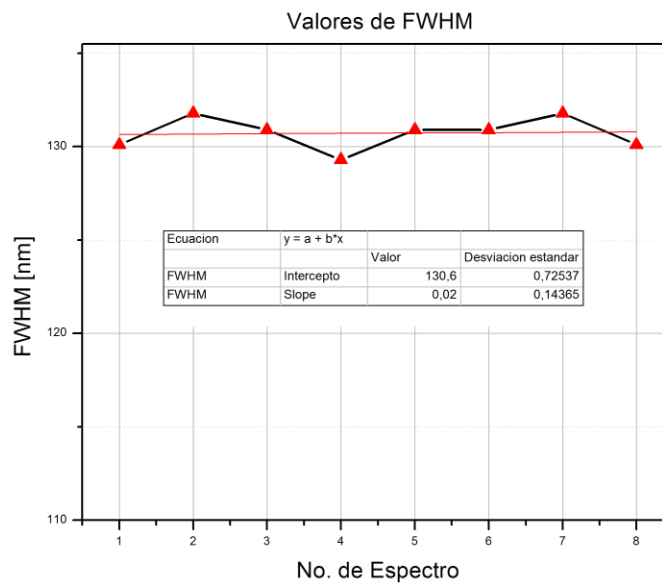
En la figura 3-10, se muestra la evolución del máximo valor de intensidad para una serie de espectros tomados el día 22 de Julio de 2015 entre las 09:55 y las 12:30. Estos valores fueron tomados de cada espectro en 482.14 nm y se obtuvieron variando la masa óptica antes y después del mediodía para un día bajo condiciones de cielo despejado. Además, en la figura 3-11, se ilustran los FWHM para cada uno de los espectros

obtenidos. En esta figura, el valor de la pendiente (aproximadamente cero) indica que los diferentes valores de FWHM son del mismo orden.

**Figura 3-10:** Evolución del máximo valor de intensidad para una serie de espectros tomados antes y después del mediodía.



**Figura 3-11:** Valores de FWHM para los espectros registrados entre las 09:55 y las 12:30.



## 4. Resultados

En la aplicación del EPR al registro de espectros de la luz solar al atravesar la atmósfera terrestre, se reportan a continuación las mediciones espectrales realizadas a intervalos de 15 minutos según el ritmo de la variabilidad atmosférica. Curvas espectrales que fueron la base para derivar el comportamiento del espesor óptico tanto en longitud de onda como en el tiempo, y finalmente se realizó la comparación con los datos de Fotometría solar y lidar del Observatorio Atmosférico así como la correlación con el material particulado colectado a nivel de superficie tipo el equipo PM2.5 del Laboratorio de Calidad del Aire – CLAIRE. La tabla 4-1 muestra el calendario de medidas obtenidos con el Espectroradiómetro.

**Tabla 4-1:** Calendario de medidas con el espectroradiómetro (año 2015).

Julio			1	2	3	Agosto	3	4	5	6	7
	6	7	8	9	10		10	11	12	13	14
	13	14	15	16	17		17	18	19	20	21
	20	21	22	23	24		24	25	26	27	28
	27	28	29	30	31		31				
Septiembre		1	2	3	4	Octubre				1	2
	7	8	9	10	11		5	6	7	8	9
	14	15	16	17	18		12	13	14	15	16
	21	22	23	24	25		19	20	21	22	23
	28	29	30				26	27	28	29	30

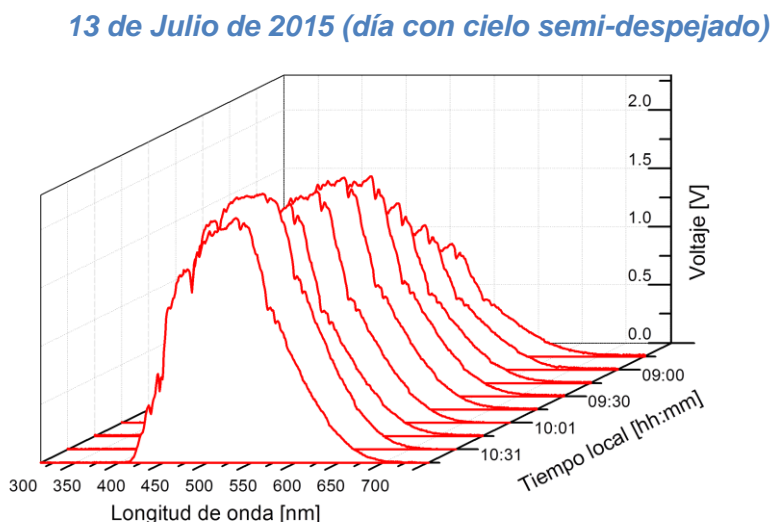
## 4.1 Características generales de la región de estudio

El Espectroradiómetro actualmente se encuentra en operación en las instalaciones del observatorio atmosférico LOA-UNAL, el cual está ubicado en el Valle de Aburrá, dentro de su zona urbana se encuentra la ciudad de Medellín (6,26N; -75,58W) a una altura sobre el nivel del mar de 1471 m y en plena zona andina tropical rodeada por sistemas montañosos que alcanzan los 2900 m.s.n.m en sus picos más elevados. Por su ubicación, la dinámica atmosférica del Valle de Aburrá está influenciada por los vientos Alisios los cuales ingresan por el nororiente permitiendo un continuo transporte de masas de aire que pueden llegar a penetrarlo, inyectando material particulado que puede combinarse con el producido al interior del valle, el cual es resultado del constante crecimiento del parque automotor e industrial.

## 4.2 Resultados del Espesor Óptico obtenido con el equipo EPR-UNAL

Se busca determinar el espesor óptico de los aerosoles - AOD mediante radiometría solar resuelta espectralmente, Para lograr esto, se muestra en la figura 4-1, una evolución de los espectros solares a diferentes horas, Luego en la figura 4-2 se muestran los AOD's correspondientes a cada espectro solar obtenido, después de aplicar la metodología expuesta en el capítulo 3.

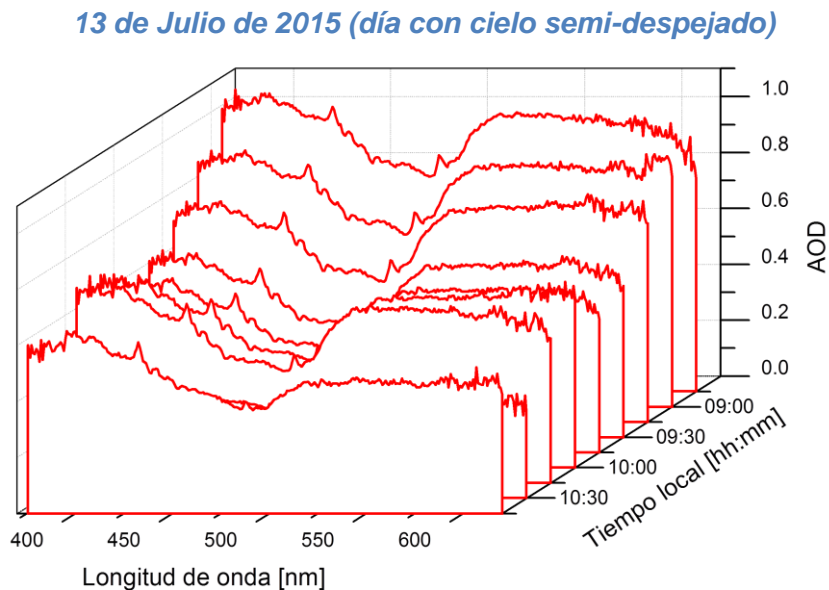
**Figura 4-1:** Evolución de espectros solares para el 13 de Julio de 2015.





En la serie de espectros registrados (desde las 08:55 am hasta las 10:45 am) se observa un crecimiento en la amplitud de la señal como consecuencia del aumento de la masa óptica (asociada a un mayor recorrido de la radiación solar en su paso a través de la atmósfera). Gracias a que este fue un día con poca cobertura nubosa sobre el Valle de Aburrá, en la evolución de los espectros se evidencia un crecimiento de la amplitud (respuesta de voltaje de detector) proporcional a la cantidad de radiación solar directa que colecta el Espectroradiómetro.

**Figura 4-2:** Evolución del espesor óptico de los aerosoles para el 13 de Julio de 2015



En la figura 4-2 se ilustra la evolución horaria del espesor óptico de los aerosoles. A diferencia de los que ocurre con los espectros solares, el AOD generalmente tiene sus valores más altos cuando la masa óptica es mayor, esto debido a que la radiación solar sufre una mayor atenuación cuando su camino a través de la atmósfera aumenta (ya que el número de elementos dispersores es mayor).

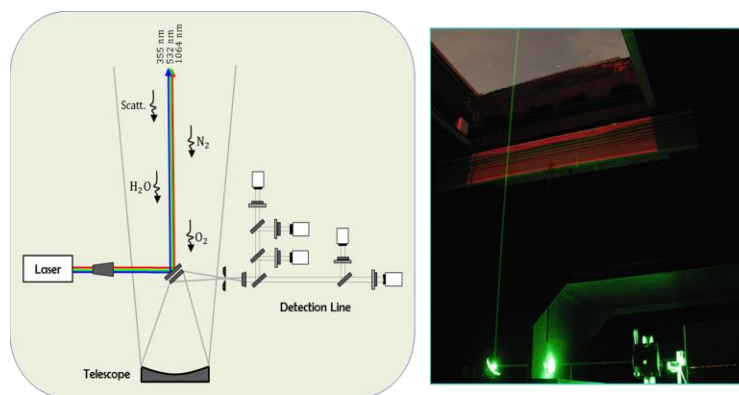
## 4.3 Comparación de los resultados de Espesor Óptico

### 4.3.1 Sistema Lidar-UNAL

El principio de funcionamiento del lidar es similar a la del radar, excepto que no utiliza ondas de radio sino ondas en la región ultravioleta, visible, e infrarroja cercana. Un lidar envía a la atmósfera un tren de pulsos de luz láser de alta potencia, generando un proceso de retrodispersión de ese tipo de luz, la cual es colectada a través de un telescopio. (Nisperuza D. , 2015; Bedoya, 2015)

En la Figura 4-3 se ilustra el sistema Lidar de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

**Figura 4-3:** Sistema lidar UNAL.



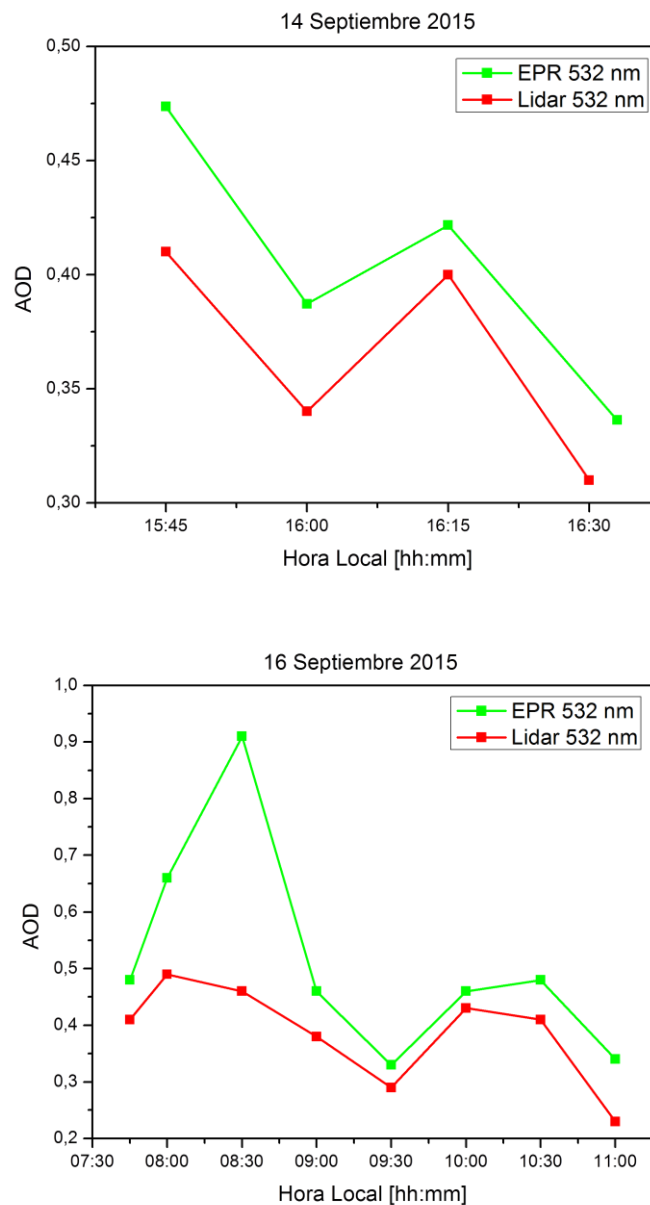
El tiempo de vuelo de la luz láser en la atmósfera es convertido a distancias por un sistema de detección y registro ultra-rápidos. De esta forma, cualquier evento en el aire será localizado desde tierra, permitiendo así determinar variables asociadas al comportamiento de la atmósfera, a sus propiedades y características. Algunas de las variables atmosféricas posibles de determinar con esta técnica son:

- Coeficientes de retrodispersión de los aerosoles
- Altura y evolución de la capa límite atmosférica
- Componentes longitudinal y transversal del viento
- Presión
- Temperatura
- Densidad de vapor de agua

- Concentración de algunos otros constituyentes atmosféricos

Uno de los productos del sistema Lidar-UNAL, es el espesor óptico de los aerosoles a 532 nm. En la Figura 4-4 y en la tabla 4-2 se muestra una comparación entre el AOD del EPR y el obtenido mediante la técnica Lidar para algunos días en los que ambos equipos operaron simultáneamente. Para obtener el valor de AOD en columna mediante el sistema Lidar, se realizó la integral de extinción sobre un perfil.

**Figura 4-4:** Comparación entre el AOD medido por el Espectroradiómetro y el Lidar para los días 14 y 16 de Septiembre del 2015



**Tabla 4-2:** Comparación entre las medidas de AOD con Espectroradiometría y Lidar para los días 19 de Agosto y 09,22 de Septiembre de 2015.

Día	Hora [hh:mm]	AOD EPR	AOD Lidar
19 Agosto	10:45	0,45	0,37
09 Septiembre	10:45	0,79	0,77
22 Septiembre	08:30	0,83	0,41

La diferencia en los valores del AOD proporcionados por las dos técnicas: Lidar y EPR es aproximadamente de un 20%. Posiblemente esta diferencia se debe fundamentalmente a que el EPR mide toda la columna de atmósfera, mientras que el lidar inicia desde unos 100 m de altura sobre la estación, (región de sombra u overlap según la configuración geométrica del sistema lidar); altura bajo la cual puede existir una significativa concentración de material particulado.

### 4.3.2 Fotómetro Solar de NASA-AERONET

La fotometría solar tiene sus orígenes en 1959 y aunque el método utilizado continúa siendo el mismo, ya que las medidas de la extinción espectral son filtradas directamente de la radiación del Sol a través de la ley de Beer-Lambert-Bourguer, a nivel instrumental los cambios son para nada despreciables en términos de la instrumentación electrónica involucrada, esto debido a que los primeros sistemas eran completamente análogos pero en la actualidad, sistemas digitales son interfazados con mecanismos de procesamiento de datos eficientes. (Rollin, 2011)

En la Figura 4-5 se ilustra el Fotómetro Solar CIMEL CE-317 de NASA, el cual se encuentra en funcionamiento en la estación UNALMED del grupo GLEO.

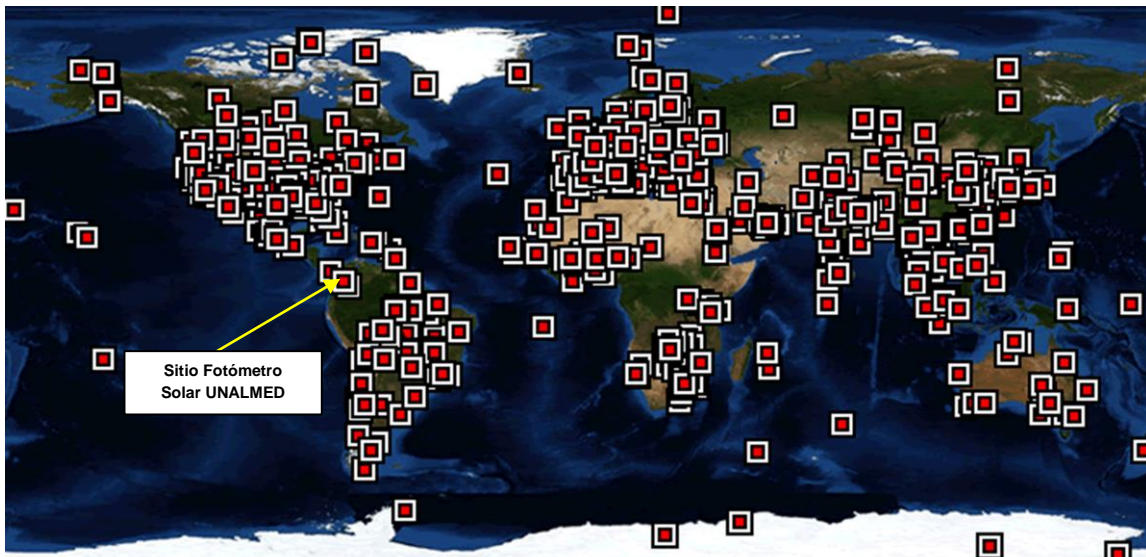
**Figura 4-5:** Fotómetro solar CIMEL CE-317.



El Fotómetro viene equipado con 8 filtros de interferencia espectral, centrados y seleccionados en longitudes de onda estratégicas con el fin de estudiar los aerosoles, además de un filtro adicional que se utiliza para el estudio de vapor de agua. Para la detección de las señales, tiene reservado dos fotodiodos de silicio, estos se encuentran en la cabeza detectora, la cual está aislada y protegida adecuadamente para evitar la humedad. El giro de los motores que siguen el sol está automatizado mediante una caja de control electrónico. (Alegría, 2015)

Las redes mundiales de monitoreo de aerosoles, entre ellas AERONET, cuenta con diversas estaciones en el mundo, que con el apoyo de la NASA en Estados Unidos, proporciona información distribuida globalmente del espesor óptico de aerosoles, de la cantidad de agua precipitable, y del ozono, entre otros. La figura 4-6 muestra la distribución espacial de los Fotómetros pertenecientes a la red AERONET, (NASA, AERONET - Aerosol Robotic Network, 2015)

**Figura 4-6:** Ubicación estaciones de monitoreo de aerosoles de la red AERONET.

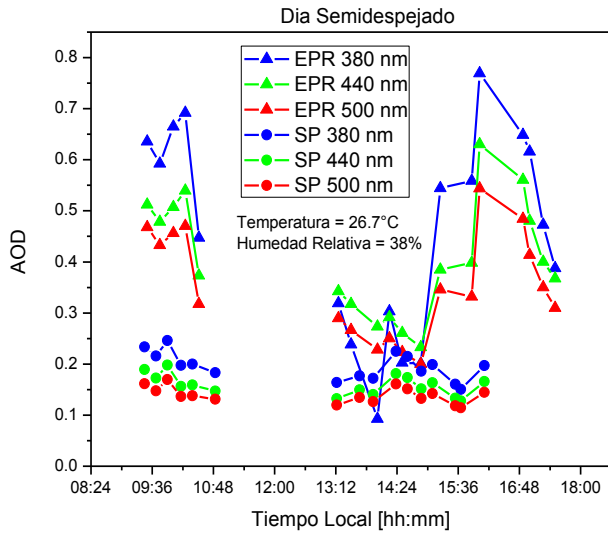
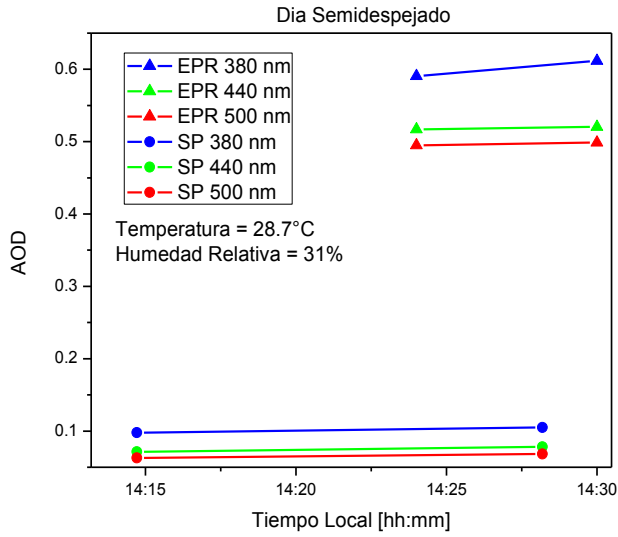


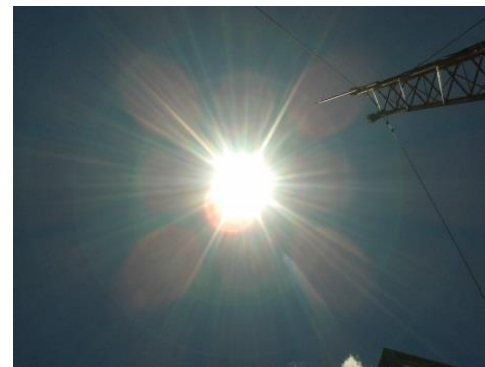
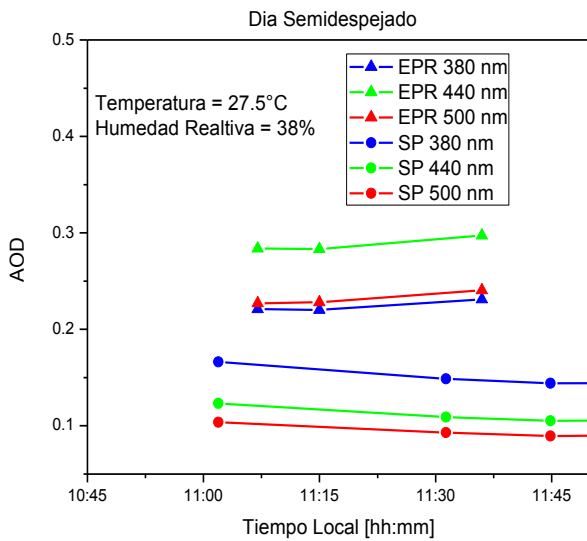
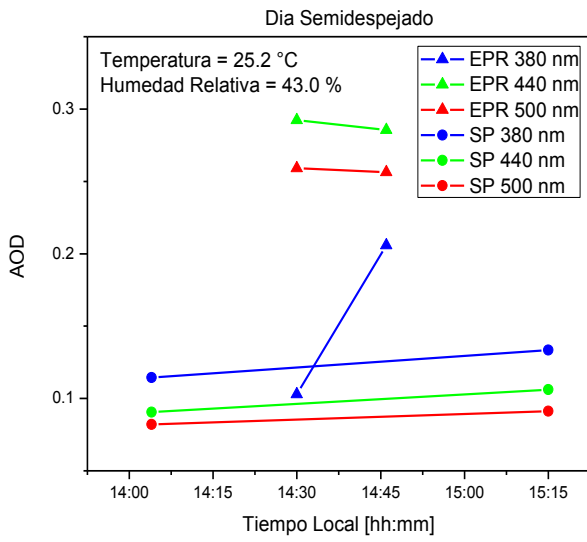
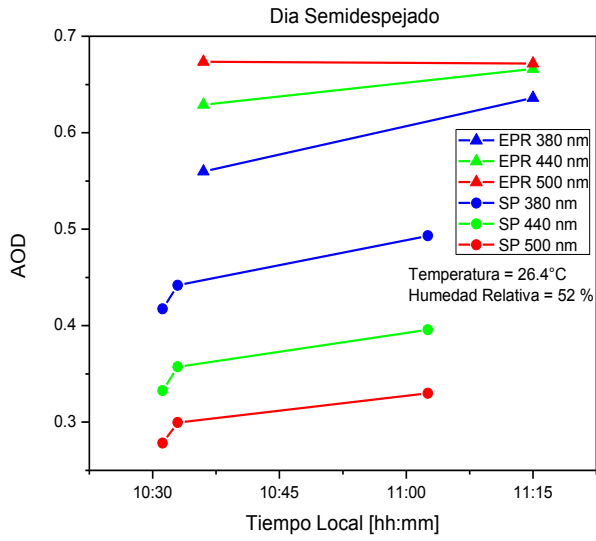
Tanto el Espectroradiómetro – EPR como el Fotómetro solar operan de manera similar, ya que a través de medidas de transmitancia de la radiación solar en la atmósfera y aplicando la ley de Beer-Lambert-Bouger, pueden obtener propiedades ópticas y microfísicas de los aerosoles. El Fotómetro determina el valor de AOD solo para ciertos valores discretos en longitud de onda, mientras que el espectroradiómetro proporciona perfiles de esta variable óptica en un rango espectral continuo. En este sentido ambos equipos son complementarios en la obtención de información sobre las propiedades de los aerosoles atmosféricos.

En la figura 4-7 se muestran los resultados de la comparación de los valores de AOD tanto del Fotómetro solar como del Espectroradiómetro para las longitudes de onda 380 nm, 440 nm y 500 nm.

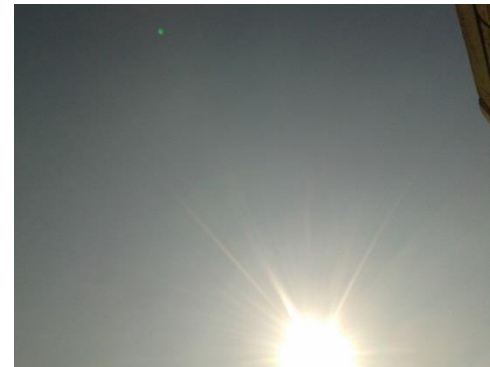
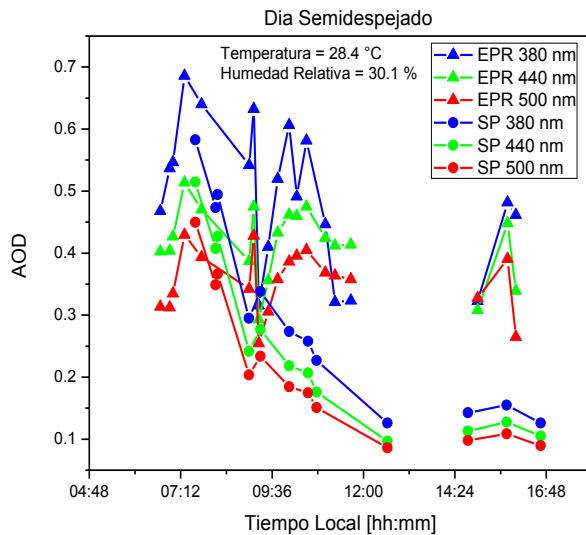
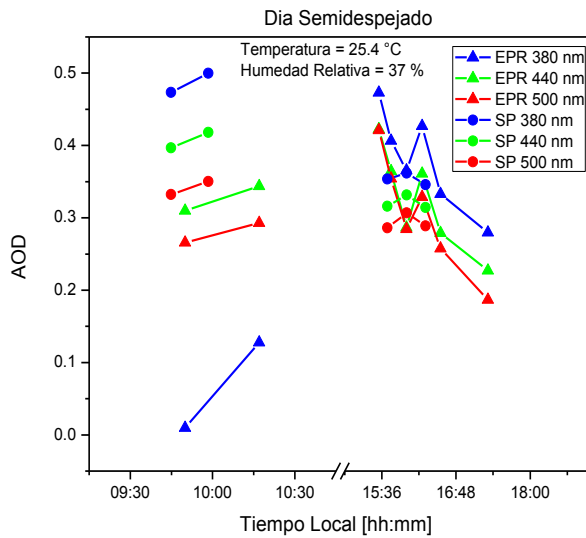
Los resultados comparados en la figura 4-7 corresponden a mediciones de AOD para días con condiciones atmosféricas similares (cielo semi-despejado y poca cobertura nubosa), además, estos dos días de comparación estuvieron bajo condiciones de valores de humedad relativa y temperatura similares, de forma que la comparación se realice bajo los mismos parámetros.

**Figura 4-7:** Comparación entre el AOD medido por el Fotómetro solar y el Espectroradiómetro para 7 días con condiciones atmosféricas similares.









Los resultados presentados en la figura 4-7, muestran que los valores de AOD del EPR son mayores que los del Fotómetro Solar CIMEL CE-317. Esto tal vez se deba, en parte, a que se han involucrado los datos del Cimel de nivel 2.0.

### 4.3.3 Concentración de aerosol de 2.5 micras de tamaño

*Método extractivo:* este método consiste en tomar una muestra del objeto de estudio mediante bombas de extracción, luego se traslada al laboratorio en un recipiente especializado donde se procede a su análisis, el estado del recipiente debe ser especial, ya que es posible que la muestra sufra daños en su traslado hasta el laboratorio. Aunque

esta técnica puede arrojar resultados muy confiables e interesantes, tiene la gran desventaja de que los análisis no se pueden realizar en tiempo real, por otro lado al extraer una porción del objeto de estudio, su modificación es inminente.

Una vez succionadas las partículas, estas van a quedar retenidas en un filtro por el que pasa la muestra y cuyo peso es conocido, con el fin de poder calcular mediante el método gravimétrico la concentración de partículas que se han capturado. En el análisis completo del material particulado que contiene una muestra de atmosférica consiste en tres etapas:

1. La cuantificación de la masa
2. Caracterización de la distribución por tamaños de partículas
3. Análisis físico y químico de las fracciones particuladas

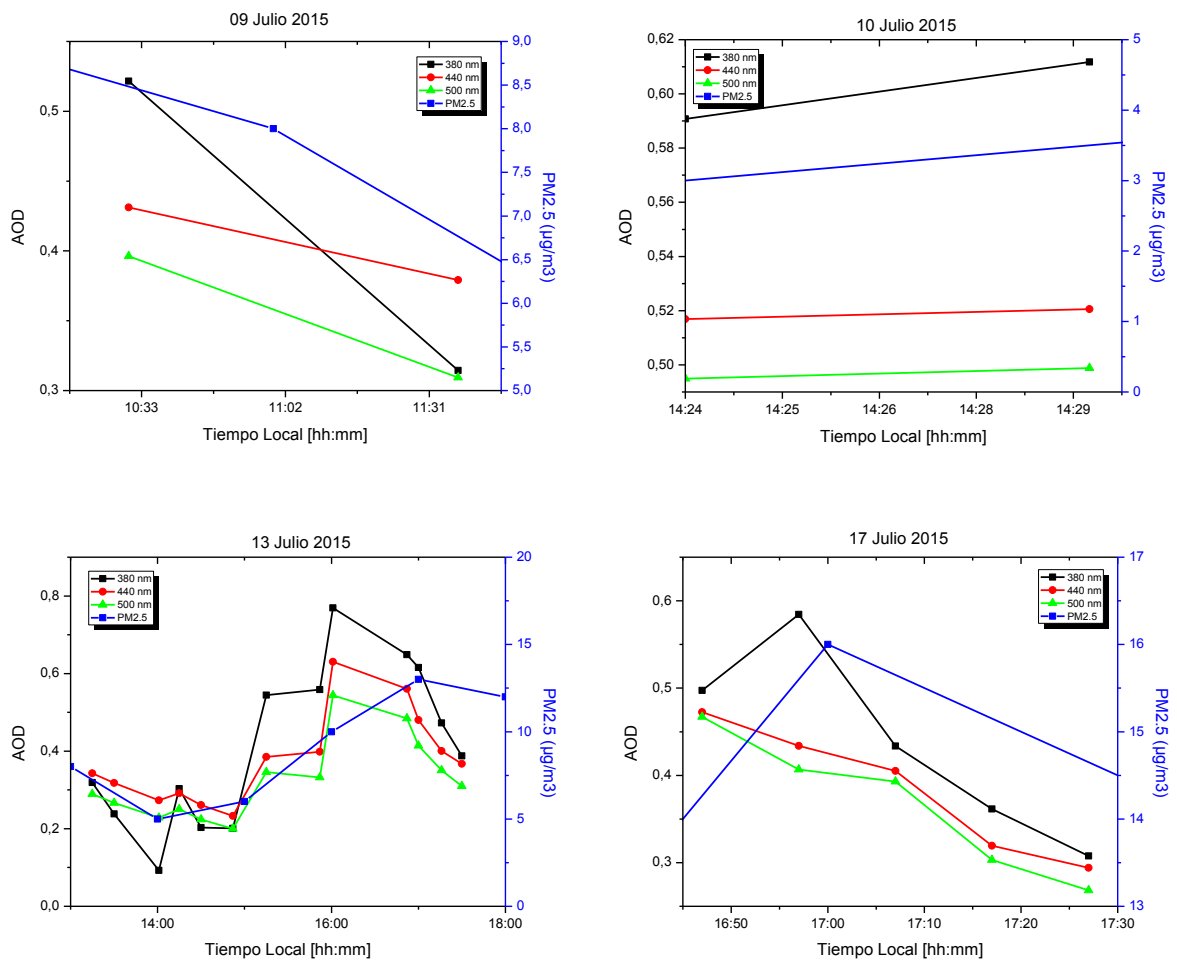
En la Figura 4-8 se muestra el impactador de aerosoles en tierra PM 2.5 del laboratorio de calidad del aire - CALAIRE de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

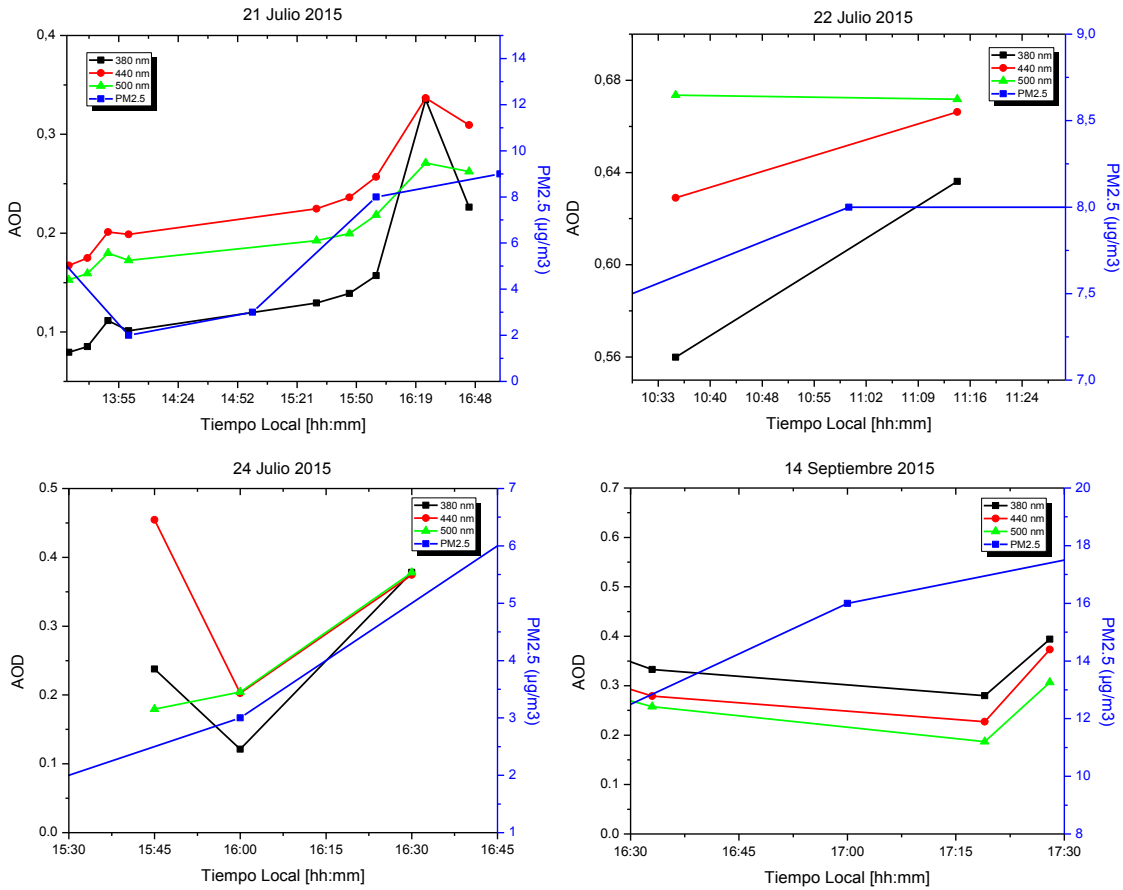
**Figura 4-8:** Impactador de material particulado PM2.5 del Laboratorio de Calidad del Aire – CALAIRE.



Si bien los resultados proporcionados por el impactor de material particulado PM2.5 y el Espectroradiómetro no son los mismos, una comparación de la evolución del espesor óptico de los aerosoles y la concentración de material particulado PM2.5, sirve para entender cómo se relaciona la cantidad de aerosoles en columna atmosférica con la cantidad de material particulado a nivel de superficie. En la Figura 4-9 se muestra la evolución en varios días de la concentración de material particulado obtenida con el impactor y el espesor óptico de los aerosoles para tres longitudes de onda.

**Figura 4-9:** Evolución de la concentración de material particulado y el espesor óptico de los aerosoles para los días 09,10,13, 17, 21, 22 y 24 de Julio, y 14 de Septiembre





En la figura 4-9, se puede notar que la evolución del AOD para las tres longitudes de onda 380 nm, 440 nm y 500 nm del EPR, sigue un comportamiento similar en comparación con los valores de concentración de material particulado PM2.5, sobretudo en horas de la mañana.

## 5. Conclusiones

- Se ha desarrollado de manera exitosa un equipo de registro espectral, siguiendo una metodología que permitió integrar tres campos de la física: mecánica, electrónica y óptica, aplicados a los estudios de la atmósfera terrestre.
- Se logró un fortalecimiento en el aprendizaje de la óptica, el cual fue respaldado por el ejercicio experimental, tomando como estrategia el trabajo de diseño e implementación de un equipo de espectrometría dirigido al estudio de interacción radiación solar - atmósfera.
- El trabajo de automatización del EPR, fue realizado con el desarrollo de circuitos eléctricos y electrónicos, tarjetas de comunicación a PC en doble vía, elementos electro-mecánicos y por supuesto la implementación de un software gratuito para el control y manejo del Espectroradiómetro.
- Se adquirió una valiosa experiencia en el proceso de calibración del EPR, con la adopción de métodos y desarrollo de protocolos para tal fin.
- La idea inicial que motivó este trabajo, respecto al desarrollo de un equipo con resolución espectral para realizar aplicaciones y derivar productos (en particular el espesor óptico de los aerosoles - AOD), para complementar el estudio de la atmósfera en esta región, se ve plenamente cumplido, mostrando resultados de una de las variables más importantes en la micro-escala de la atmósfera. Los valores del espesor óptico son comparables a los valores estándar del fotómetro solar CIMEL, y también se pueden relacionar con los datos de los colectores en superficie como el PM 2.5 y los derivados desde el sistema lidar. Esto muestra la

potencialidad de un desarrollo tecnológico realizado plenamente en la Universidad Nacional, con características competitivas y de un relativo bajo costo.

- El EPR fue desarrollado con el objetivo de tener la disponibilidad de un equipo de fotometría que pudiera acompañar la operatividad del lidar, en aquellas épocas en que no se dispusiera del CIMEL. (El fotómetro solar CIMEL de NASA-AERONET sólo permanece 6 meses en el sitio Medellín). Además, los datos del EPR serán usados para el cálculo de las razones lidar.
- Mediante esta técnica, se pretende determinar el espesor óptico de los aerosoles atmosféricos – AOD con el fin de obtener una base de datos que pueda involucrarse en el diagnóstico de la calidad del aire en la ciudad de Medellín. De esta forma el Grupo GLEO tiene un espectrómetro que se ha integrado a las campañas de mediciones lidar y CIMEL. Los datos se analizan y se estudian de manera conjunta con Laboratorio de Calidad del Aire – CALAIRE de la Facultad de Minas de la Sede Medellín. Las expectativas de las mediciones remotas que realiza el GLEO consisten en proporcionar información que contribuya a un mejor entendimiento de la atmósfera baja en el Valle de Aburrá, y su impacto en la calidad del aire.

## 6. Bibliografía

- Alcántara, A. (Marzo de 2013). CARACTERIZACIÓN DE LAS PROPIEDADES RADITATIVAS Y MICROFÍSICAS DEL AEROSOL ATMOSFÉRICO EN LA CAMPAÑA VELETA 2002. Granada, España.
- Alegría, D. (Marzo de 2015). Propiedades microfísicas de los aerosoles troposféricos derivadas de medidas de fotómetro solar y Lidar en el Valle de Aburrá. Medellín, Colombia.
- ASTM-International. (July de 2003). Standard Test Method for Calibration of a Spectroradiometer Using a Standard Source of Irradiance. West Conshohocken, PA, United States.
- Baron, P. K. (1994). *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*. New Jersey: WILEY.
- Bedoya, A. (Abril de 2015). Lidar Ultravioleta para estudiar el origen de aerosoles en la baja tropósfera de Medellín. Medellín, Colombia.
- BENTHAM. (2014). A GUIDE TO SPECTRORADIOMETRY, Instrument & Applications for the Ultraviolet. USA.
- Correa, M. P. (2012). *INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA ESPECTROSCÓPICO PARA ESPECTROSCOPIA RAMAN Y DE FLUORESCENCIA*. Universidad Pontificia Bolivariana, Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Duffie, J. B. (1975). *Solar Engineering Of Thermal Processes*. New York: John Wiley & Sons, INC.
- Gueymard, C. (1995). A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment.

- HAMAMATSU. (1998). Photomultiplier Tubes: Construction and Operating Characteristics Connections to External Circuits. Shimokanzo, Japan.
- HAMAMATSU. (11 de 11 de 2014). *Hamamatsu Photonics*. Recuperado el 16 de Julio de 2015, de <http://www.hamamatsu.com/jp/en/support/glossary/r/index.html>
- Hansen, J. T. (1974). Light scattering in planetary atmospheres. *Space Science Reviews*, 16, 527-610.
- IOptron - Corporation. (2007). *IOptron*. Recuperado el 10 de 07 de 2015, de <https://www.ioptron.com/index.cfm?select=productdetails&phid=857582d3-fa73-4ac2-8788-1b879cc1f939>
- Kasten, F. Y. (15 de Noviembre de 1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *APPLIED OPTICS*, 28(22), 4735-4738.
- Kiehl, J. T. (1997). Earth's annual global mean energy budget. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78, 197-208.
- Kumar, S. (2005). *Basics of Remote Sensing and GIS*. Nueva Delhi: Laxmi Publications.
- LambdaResearchCorporation. (2015). *TracePro*. Recuperado el 16 de Julio de 2015, de <http://www.lambdares.com/>
- López, L. (Julio de 2013). Diseño de un sistema de generación y registro de luz multiespectral. Medellín, Colombia.
- Meszaros, E. G. (1991). *Atmospheric Particles and Nuclei*. Budapest, Hungria.
- Montilla, E. (2010). Determinación de las propiedades de absorción de los aerosoles atmosféricos: Aplicación en la zona Sub-Ártica de Noruega. Valladolid, España.
- Múnera, M. (30 de Enero de 2013). Implementación de un Sistema de Espectroradiometría Solar. Medellín, Colombia.
- NASA. (15 de Abril de 2015). *AERONET - Aerosol Robotic Network*. Recuperado el 21 de Julio de 2015, de <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- Nisperuza, D. (Marzo de 2010). Diseño y construcción de un sistema óptico de monitoreo atmosférico aplicado a la determinación de la capa límite atmosférica en la ciudad de Medellín. Medellín, Colombia.
- Nisperuza, D. (Abril de 2015). *Propiedades ópticas de los aerosoles atmosféricos en la región Andina Colombiana mediante análisis de mediciones remotas: Lidar, Fotométricas y Satelitales*. Medellín, Colombia.



- NOAA. (2015). *National Oceanic & Atmospheric Administration*. Recuperado el 15 de Julio de 2015, de <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/grad/solcalc/solareqns.PDF>
- Olsen, E. (1986). *Métodos Ópticos de Análisis*. Madrid: Editorial Reverté S.A.
- Pérez, D. (Junio de 2010). CARACTERIZACIÓN DEL AEROSOL ATMOSFÉRICO EN LA CIUDAD DE GRANADA MEDIANTE FOTOMETRÍA SOLAR Y ESTELAR. Granada, España.
- Requena, A. Z. (2004). *Espectroscopía*. Madrid: PEARSON EDUCACION.
- Rollin, E. (2011). An introduction to the use of Sun-photometry for the atmospheric correction of airborne sensor data. Southampton, Reino unido.
- Schmid, B. W. (1995). Comparison of Sun photometer calibration by use of the Langley technique and the standard lamp. *APPLIED OPTICS*, 34(21), 4500-4512.
- Schrenk, W. (1986). Historical Development of Flame Excitation Sources for Analytical Spectroscopy. *APPLIED SPECTROSCOPY*, 40(1), xix - xxviii.
- SIATA. (2011). *Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá*. Recuperado el 09 de 10 de 2015, de <http://siata.gov.co/boletinnp.php>
- Sobrino, J. (2001). *Teledetección*. Valencia: Publicacions de la Universitat de València.
- Tanaka, M. N. (1986). Calibration of a Sunphotometer by Simultaneous Measurements of Direct-Solar and Circumsolar Radiations. *Applied Optics*, 1170-1176.
- Toledano, C. (Octubre de 2005). Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación "El Arenosillo" de la red AERONET. Valladolid, España.
- Toledano, C. C. (2007). Aerosol optical depth and Angstrom exponent climatology at El Arenosillo AERONET site (Huelva, Spain). *Royal Meteorological Society*, 795-807.