

Universidad de Nariño
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Física



**Tecnología de Sensado Remoto para la
Vigilancia de la Atmósfera y la Calidad del
Aire En Pasto, Nariño**

TESIS DE MAESTRÍA

Para obtener el título de:
Magister en Física

Janneth Fernanda Chapues Andrade

San Juan de Pasto, Colombia
Junio 2023

Universidad de Nariño
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Departamento de Física

**Tecnología de Sensado Remoto para la Vigilancia de la Atmósfera y la
Calidad del Aire En Pasto, Nariño**

JANNETH FERNANDA CHAPUES ANDRADE

TESIS DE MAESTRÍA

Director

Luis Andrés Santacruz Almeida
Magister en Ciencias-Física

Codirector

Alvaro Efraín Bastidas Gustin
Doctor en Ciencias-Física

Pasto, Nariño
2023

©2023 - Janneth Fernanda Chapues Andrade

“Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado son responsabilidad exclusiva de los autores”

Artículo 1. del acuerdo No. 324 del 11 de Octubre de 1966, emanado por el Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

Todos los derechos reservados.

Nota de Aceptación

Luís Andrés Santacruz Almeida
Director

Sandra Esperanza Sánchez Sierra
Jurado

Karla Patricia Reyes Sánchez
Jurado

Carlos Augusto Galindez Jamioi
Jurado

San Juan de Pasto, junio 2023

Agradecimientos

Primeramente agradezco al profesor Álvaro Bastidas de la Escuela de Física de la Universidad Nacional Sede Medellín, quién desde el comienzo mostró su interés en trabajar en la región. Gracias a su apoyo y a pesar de la distancia, fue posible llevar a cabo este trabajo.

Al profesor Luís Andrés Santacruz Almeida del Departamento de Física de la Universidad Nariño, que a pesar de que actualmente lleva sus estudios de doctorado en la Universidad Nacional, asesoró este trabajo.

Al profesor Alberto Quijano, por facilitar el telescopio y un espacio en el observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño para llevar a cabo las mediciones experimentales.

A la Maestría en Física de la Universidad de Nariño, que a través de su beca completa, me permitieron seguir aprendiendo sobre lo que más me apasiona.

Al Dr. Fernando Garzón, Director del Liceo de La Universidad de Nariño, quien siendo mi jefe inmediato tuvo inmensas consideraciones para que yo pudiera realizar mi trabajo experimental.

Finalmente agradezco a mi familia: Gloria Andrade, Enrique Chapues, Marcela Chapues, Gloria Chapues y a Harvey Zambrano por su incondicionalidad durante todo este trabajo.

A todas las mujeres Nariñenses, en especial a la más luchadora y trabajadora que conozco: María Gloria Andrade Ruíz, mi madre.

Tecnología de Sensado Remoto para la Vigilancia de la Atmósfera Y la Calidad del Aire en Pasto, Nariño

Resumen

Las actividades de vigilancia y seguimiento de la fenomenología de la atmósfera terrestre usando las técnicas de sensado remoto se vuelven simples y eficientes para el estudio de fenómenos que se relacionan directamente con el tipo de aire disponible en la capa rugosa de la Tierra.

En este trabajo se presenta el desarrollo de un sistema de detección del espectro de la luz solar cuando ésta atraviesa una columna de atmósfera comprendida entre su límite superior hasta la superficie terrestre. El sistema está integrado por un receptor tipo telescopio Cassegrain de apertura 5" y distancia focal 1,9 m, un acople a fibra óptica desde el ocular del telescopio hasta el detector que es un espectrómetro de red de difracción fija y un arreglo extendido de sensores CCD que permite obtener un espectro instantáneo y un registro binario en un computador. Este registro espectral de la columna atmosférica involucra tanto la absorción como la transmisión de la luz solar afectada por las partículas de aerosol suspendidas en el aire característico de la zona urbana de Pasto, según su tamaño, forma y procedencia. Se reporta aquí el resultado de la identificación de algunas especies moleculares a partir del análisis de los registros de espectros de sol en un periodo de 30 días en el horario de 6:00 a.m. a 12:00 m. en el mes de diciembre.

Remote sensing technology for measuring Air Quality in Pasto, Nariño

Abstract

The monitoring activities of the phenomenology of the Earth's atmosphere using remote sensing techniques become simple and efficient for the study of phenomena that are directly related to the type of air available in the Earth's rough layer.

This work presents the development of a system for detecting the spectrum of sunlight as it passes through a column of atmosphere from its upper limit to the Earth's surface. The system is composed of a 5" aperture Cassegrain telescope-type receiver with a 1,9 m focal length, a fiber optic coupler from the telescope eyepiece to the detector which is a fixed diffraction grating spectrometer, and an extended array of CCD sensors that allow for instantaneous spectrum acquisition and binary recording on a computer. This spectral recording of the atmospheric column involves both absorption and transmission of sunlight affected by air pollutants characteristic of the urban zone of Pasto, Nariño. The research results are reported here based on the analysis of the records of sun spectra over a period of 30 days from 6:00 a.m. to 12:00 p.m. during the month of December.

Contenido

Resumen	7
Abstract	8
1 Introducción	16
2 Marco Teórico	18
2.1 Teledetección y Sensores Remotos	18
2.2 Espectroscopía	20
2.2.1 Interacción entre la Radiación y la Materia	20
2.2.2 Interacción de la atmósfera con la radiación electromagnética	22
2.2.3 Firmas espectrales	24
2.2.4 Cálculo de los Espesores Atmosféricos	26
2.3 Contaminantes más comunes de la atmósfera	29
2.3.1 Material particulado	29
2.3.2 Gases	30
2.3.3 Criterio de medición de Contaminantes	32
2.4 Sistemas de Vigilancia en la Calidad de Aire (SVCA) en Colombia	33
3 Metodología	35
3.1 Ensamblaje del equipo de Sensado Remoto	35
3.2 Montaje	37
3.2.1 Calibración del espectrómetro	38
3.3 Recolección de datos	38
4 Resultados y Análisis	43
4.1 Picos de Absorción:	43
4.2 Ajuste de los espectros	46
4.3 Cálculo de FWHM	49
4.4 Cálculo de Espesor τ_R	55
4.5 Cálculo de Espesor τ_{tot} experimental	57
5 Conclusiones	64
6 Perspectivas	65
Anexos	69

Lista de Figuras

2.1	Tipos de transiciones atómicas y moleculares que resultan de las interacciones de la radiación con una muestra con su respectiva longitud de onda	21
2.2	Diferentes Espectros de Absorción.	22
2.3	Diferencia entre Espectros de gases, solvente no polar y polar Absorción.	22
2.4	Curva de de la radiación de un cuerpo negro a 6000 K y curva de Irradiancia H_λ en función de la Longitud de Onda donde se observan picos de absorción de O_3 , H_2O y CO_2	23
2.5	Irradiancia espectral de la iluminación del sol en la superficie de la tierra.	24
2.6	Firmas espectrales de de los principales gases atmosféricos	25
2.7	Tipos de SVCA según su tecnología	34
3.1	Proceso de creación del cilindro: 1. Diseño del cilindro de acuerdo a las características del telescopio. 2. Modelado 3D en el software <i>Solidworks</i>	36
3.2	Proceso de creación del cilindro: 3. Impresión 3D del cilindro en la impresora del departamento de Química de la Universidad de Nariño. 4. Cilindro terminado con las especificaciones esperadas.	36
3.3	Acople ocular creado para el trabajo experimental	36
3.4	Montaje del equipo de Sensado Remoto, donde se observa el telescopio, caja de cartón envuelta de papel aluminio (con el espectrómetro adentro)	37
3.5	Computador portátil con señales del programa Spectrum.	37
3.6	Montaje del equipo de Sensado Remoto sobre mesa de trabajo.	37
3.7	Vista hacia la zona sur.	38
3.8	Vista hacia la zona oriente.	38
3.9	Vista hacia la zona volcán.	38
3.10	Ejemplo de un espectro tomado por el espectrómetro y mostrado por <i>Spectrum Studio</i>	39
3.11	Ejemplo de evolución temporal del SO_2 en Pasto el 23 de diciembre 2022	41
3.12	Ejemplo de evolución temporal del $PM_{2,5}$ en Pasto el 23 de diciembre 2022	41
3.13	Ejemplo de evolución temporal PM_{10} en Pasto el 23 de diciembre 2022	41
3.14	Ejemplo de evolución temporal del O_3 en Pasto el 23 de diciembre 2022	42
3.15	Ejemplo de evolución temporal del CO en Pasto el 23 de diciembre 2022	42
3.16	Ejemplo de evolución temporal NO_2 en Pasto el 23 de diciembre 2022	42
4.1	Espectros tomados el 28 de diciembre del 2022. Zona: Volcán	43
4.2	Espectros de las 9:00 AM y 11:30 AM, tomados el 20 de diciembre del 2022. Zona: Volcán	44
4.3	Espectros de las 8:300 AM y 11:00 AM, tomados el 12 de diciembre del 2022. Zona: Oriente.	44
4.4	Espectros de las 7:30 AM y 10:00 AM, tomados el 4 de diciembre del 2022. Zona: Sur.	45
4.5	Espectro de la zona sol, tomado a las 9:30 AM el 28 de diciembre del 2022, ajustado con la distribución de valores extremos.	47

4.6	Espectro de la zona Sur, tomado a las 8:30 AM el 28 de diciembre del 2022, ajustado con la distribución de valores extremos.	48
4.7	Acercamiento del pico de absorción del ozono en el espectro de la zona Oriente, tomado a las 8:00 AM el 30 de diciembre del 2022 y medida del FWHM con el programa Origin.	49
4.8	Acercamiento del pico de absorción del ozono en el espectro de la zona Oriente, tomado a las 10:30 AM el 30 de diciembre del 2022 y medida del FWHM con el programa Origin.	50
4.9	Acercamiento del pico de absorción del ozono en el espectro de la zona Oriente, tomado a las 9:00 am el 30 de diciembre del 2022 y medida del FWHM con el programa Origin.	51
4.10	fotografía de la zona oriente al tomar la medida el 30 de diciembre del 2022 a las 9:00 am.	51
4.11	Acercamiento del pico de absorción del ozono en el espectro de la zona Oriente, tomado a las 10:00 am el 30 de diciembre del 2022 y medida del FWHM con el programa Origin.	52
4.12	fotografía de la zona oriente al tomar la medida el 30 de diciembre del 2022 a las 10:00 am.	52
4.13	Acercamiento del pico de absorción del ozono en el espectro de la zona Oriente, tomado a las 11:00 am el 30 de diciembre del 2022 y medida del FWHM con el programa Origin.	53
4.14	fotografía de la zona oriente al tomar la medida el 30 de diciembre del 2022 a las 11:00 am.	53
4.15	Acercamiento del pico de absorción del ozono en el espectro de la zona Oriente, tomado a las 12 m el 30 de diciembre del 2022 y medida del FWHM con el programa Origin.	54
4.16	fotografía de la zona oriente al tomar la medida el 30 de diciembre del 2022 a las 12:00 m.	54
4.17	Gráficas del espesor τ_R en función de λ , para el día 28 de diciembre del 2022.	56
4.18	Fotografía tomada a las 7:00 am.	57
4.19	Fotografía tomada a las 8:00 am.	57
4.20	Fotografía tomada a las 9:00 am.	58
4.21	Fotografía tomada a las 10:00 am.	58
4.22	Fotografía tomada a las 11:00 am.	59
4.23	Fotografía tomada a las 12:00 m.	59
4.24	Gráfica de $\text{Ln}[I](m)$ en los 569 nm.	61
4.25	Gráfica de $\text{Ln}[I](m)$ en los 636 nm.	62
4.26	Gráfica de $\text{Ln}[I](m)$ en los 676 nm.	62
1	Medida del FWHM en una curva.	71
2	Diagrama de Potencia radiante emitida por la fuente I_0 y Potencia transmitida por una solución absorbente I de concentración C	72
3	Gráfica de una distribución de valores extremos donde se observa el parámetro W	73
4	Gráfica de una distribución de valores extremos donde se observa el parámetro x_c y y_0+A	74
5	Gráfica de una distribución de valores extremos donde se observa el parámetro A y y_0	74

Lista de Anexos

Anexo A: Full Width at Half Maximum (FWHM)	71
Anexo B: Ley de Lambert-Beer	72
Anexo C: Distribución de Valores Etremos.	73
Anexo D: Propagación de Cifras Significativas.	75

Lista de Tablas

2.1	Exposición prolongada - Valores anuales permitidos según la Normatividad de calidad del aire en Colombia.	32
2.2	Exposición de corta duración (24 horas) - Valores diarios permitidos según la Normatividad de calidad del aire en Colombia.	33
2.3	Exposición de corta duración (8 horas) - Valores Octohorarios permitidos según la Normatividad de calidad del aire en Colombia.	33
2.4	Costos de inversión inicial según tipo de tecnología.	34
3.1	Ejemplo de datos del índice ultra violeta y parámetros ambientales tomados para la ciudad de Pasto el 23 de diciembre del 2022 de la página weather.com	40
3.2	Ejemplo de datos del índice de la Calidad del aire y densidad de los principales contaminantes tomados para la ciudad de Pasto el 23 de diciembre del 2022 de la página weather.com	40
4.1	Valores de FWHM del pico del Ozono el 30 de diciembre del 2022, zona Oriente y en diferentes horas.	55
4.2	Tabla de valores de $\cos(\theta_z)$ para la ciudad de Pasto en diciembre del 2022.	60
4.3	Tabla de valores del ángulo zenital θ_z para la ciudad de Pasto en diciembre del 2022.	60
4.4	Tabla de valores de la hora solar ha	60
4.5	Tabla de valores de la masa óptica para la ciudad de Pasto en diciembre del 2022.	60
4.6	Tabla de valores de $\ln(I)$ para diferentes longitud de onda.	61

Glosario

Absorbancia: es una medida de cuánta radiación electromagnética es absorbida por una sustancia al pasar a través de ella. Se utiliza comúnmente en espectroscopia.

Dobson: las unidades Dobson son una medida utilizada para expresar la concentración de ozono en la atmósfera terrestre, específicamente en la capa de ozono. Una unidad Dobson (DU) es equivalente a 0,01 mm ($10\ \mu m$) de espesor de ozono a presión atmosférica y temperatura estándar (1013,25 hPa y 0°C) en la superficie terrestre.

Energía radiante: es una forma de energía que se propaga a través del espacio en forma de ondas electromagnéticas. Estas ondas pueden variar en longitud de onda y frecuencia, dando lugar a diferentes tipos de radiación electromagnética, como luz visible, rayos X, rayos gamma, rayos ultravioleta, rayos infrarrojos y ondas de radio.

Intensidad radiante: describe la distribución angular de la energía radiante emitida por una fuente y se expresa en vatios por estereorradián (W/sr).

Irradiancia: es una medida de la potencia de la radiación electromagnética que incide sobre una superficie por unidad de área. Se expresa generalmente en vatios por metro cuadrado (W/m^2).

Irradiancia espectral: es una medida de la irradiancia en función de la longitud de onda o frecuencia. Proporciona información sobre cómo se distribuye la energía radiante en diferentes longitudes de onda en el espectro electromagnético.

Radiancia: es una medida de la cantidad de energía radiante que emite, refleja o pasa a través de un objeto por unidad de área y por unidad de ángulo sólido. Se expresa en vatios por metro cuadrado por estereorradián ($W/m^2 \cdot sr$).

Radiancia espectral: es una medida de la radiancia en función de la longitud de onda o frecuencia. Proporciona información sobre cómo se distribuye la energía radiante en diferentes longitudes de onda en el espectro electromagnético.

Resolución espacial: tamaño mínimo de un objeto que puede ser discernido por un sistema de sensado remoto.

Resolución espectral: capacidad de un sensor o instrumento para distinguir y separar las longitudes de onda o frecuencias adyacentes en el espectro electromagnético.

Resolución temporal: frecuencia con la que un sensor de sensado remoto adquiere imágenes de una misma área en diferentes momentos.

Unidades Arbitrarias (u. a.): son un término utilizado en ciencia y tecnología para describir valores que no están expresados en unidades de medida estándar o convencionales, como metros, kilogramos o segundos. Las unidades arbitrarias se utilizan comúnmente en situaciones en las que el objetivo principal es comparar datos dentro de un mismo conjunto de experimentos o mediciones, y donde no es esencial la comparación con otros conjuntos de datos. Por ejemplo, las unidades arbitrarias se pueden usar en espectroscopia para comparar la intensidad de señales de diferentes muestras (Skoog et al., 2017).

Capítulo 1

Introducción

Actualmente alrededor del mundo, se implementan distintas técnicas para el control de la calidad del aire con sensado remoto, por ejemplo, el monitoreo de aerosoles, para el cual existen redes con diversas estaciones por todo el mundo, entre ellas AERONET (Aerosol RObotic NETwork), EARLINET (European Aerosol Research Lidar NETwork), SPALINET (Spanish and Portuguese Lidar NETwork), ACTRIS (Aerosol, Cloud and Trace Gases Research Network), el centro ESTEC (European Space Research and Technology Centre), quienes se apoyan de la información que brindan la agencia espacial Europea (ESA) y la NASA sobre el ozono, el espesor óptico de aerosoles, la cantidad de agua precipitable, entre otros (Nisperuza, 2015).

Desde 1967 se ha monitoreado el aire en Colombia, siendo actualmente el IDEAM quien lleva el control de la calidad del aire en el país. No obstante, la información brindada en los reportes por esta entidad sobre la ciudad de Pasto es ínfima, ya que están enfocados mayoritariamente en las ciudades más grandes e importantes del país como Bogotá, Cali o Medellín; pero respecto a ciudades pequeñas como Pasto, las mediciones carecen de continuidad, además es obtenida a partir de tecnologías convencionales y no tan precisas como las que pueden obtenerse con la tecnología de sensado remoto (IDEAM, 2021). Pasto, a pesar de no ser una zona industrial podría presentar problemas de contaminación atmosférica ya que es una zona con actividad volcánica y como es conocido los volcanes son fuentes naturales de contaminación, debido a que alteran la calidad del aire con la presencia de sustancias y elementos tóxicos que se producen en las reacciones químicas de las emisiones volcánicas con los factores ambientales (R. Pérez y Rodríguez, 2005). Además, esta región es de creciente desarrollo, lo que implica un continuo aumento del material particulado proveniente de fuentes urbanas como empresas o vehículos, por lo que hace falta contar con sistemas más eficientes pero a la vez económicos para el estudio y seguimiento de la calidad del aire.

La presente investigación se centra en la implementación de un equipo de sensado remoto atmosférico para contribuir al diagnóstico de la calidad del aire en la ciudad de Pasto, ya que a pesar de que el IDEAM monitorea y estudia la calidad del aire, no se encuentran reportes sobre la calidad del aire de la ciudad y tampoco han implementado tecnologías de sensado remoto, las cuales permitirían un análisis más general, rápido, preciso y económico del estado del Aire. Así mismo, este trabajo de grado permite el fortalecimiento de la óptica y la fotónica como líneas de investigación, no sólo en la Universidad de Nariño sino en la región y constituiría un primer paso hacia proyectos más ambiciosos como, por ejemplo, la implementación a futuro de un laboratorio de óptica especializado, que permita el continuo monitoreo de las condiciones atmosféricas de la región, así como la propuesta y desarrollo de proyectos de investigación relacionados con esta temática.

El equipo de sensado remoto pasivo, está compuesto por un telescopio para la recepción de la luz, un detector tipo espectrómetro a fibra óptica, y un equipo de cómputo para el registro de señales digitales. Usando el espejo primario del telescopio se pretende recolectar la luz, y la porción que de esta sea recolectada por el telescopio será llevada al ocular y adaptada para viajar a través de fibra óptica a la red de difracción del espectrómetro, el cual realizará la separación espectral correspondiente, donde el arreglo de detección convierte la luz monocromada en señal eléctrica, que pasa como señal digital al computador. Para el desarrollo de este proyecto, se utilizaron recursos propios para los gastos menores, pero el Telescopio y Espectrómetro, que son los equipos más costosos, fueron prestados por la Universidad de Nariño y la Universidad Nacional Sede en Medellín, respectivamente.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Teledetección y Sensores Remotos

La Teledetección es el conjunto de conocimientos y técnicas que permiten determinar las características físicas y biológicas de los objetos a partir de mediciones realizadas a distancia, sin contacto con el objeto. Estas mediciones se toman a través de un sensor, ya que estos son capaces de almacenar energía proveniente de los objetos, convertirla en una señal y extraer información.

En cuanto al tipo de energía utilizada en la transmisión de información en los sensores, esta puede ser acústica (sonares, sismógrafos, sismómetros, etc), gravitacional (gravímetros) o electromagnética (radiómetros). Teniendo en cuenta que la energía electromagnética se propaga en el vacío con una velocidad de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$, es la más útil para las actividades de teledetección, ya que posibilita la transmisión rápida de información entre los objetos de interés y el sensor. (Villegas, 2008).

Un sistema de Teledetección incluye los siguientes elementos:

- **Fuente de energía:** Hace referencia al flujo energético que es detectado por el sensor. Puede tratarse de un foco externo al mismo, en cuyo caso se habla de teledetección pasiva, o de un haz energético emitido por este (teledetección activa).
- **Sistema sensor:** Está compuesto por el sensor y la plataforma que lo sustenta. Tiene como función la de captar la energía procedente del objeto de interés, codificarla o enviarla directamente a un sistema de recepción.
- **Sistema de recepción:** Donde se reciben los datos transmitidos desde el sensor y se graban en un formato y en un medio apropiados, para hacerlos accesibles a sus usuarios.
- **Procesador:** Manipula los datos del sensor en formato digital, para generar claves temáticas o cuantitativas, orientadas a facilitar la evaluación del problema en estudio.
- **Intérprete:** Analiza los productos generados por el procesador.

Un Sensor Remoto permite la Teledetección ya que recolecta información a distancia usando ondas electromagnéticas, es decir, sin estar físicamente presente. Los sistemas sensores pueden ser clasificados de diferentes maneras (*Tema 3: Sensores Remotos*, s.f.; D. Pérez, 2007):

- **Según la fuente emisora:** Se dividen en *pasivos* y *activos*. Los primeros detectan la radiación solar reflejada o emitida por los objetos de la superficie. Los activos son aquellos que producen su propia radiación.
- **Según la banda del espectro electromagnético utilizado:** Se dividen en función de la banda del espectro electromagnético que captan, según este criterio los sensores se clasifican en:
 - a. Sensores de frecuencia ultra-alta (UHF)
 - b. Sensores de frecuencia extremadamente alta
 - c. Sensores de microondas
 - d. Sensores ultravioleta
 - e. Sensores visibles
 - f. Sensores del infrarrojo
 - g. Sensores de frecuencia baja
- **Según el tipo información registrada:**

Se dividen en *sensores fotográficos*, los cuales registran la información en emulsiones fotográficas en el momento de ser recibidas y los *sensores no fotográficos*, los cuales proyectan la información recibida en una pantalla o se registra en forma gráfica.
- **Según ubicación espacial de la fuente emisora y receptora**

Se basa en la posición relativa de la fuente emisora de energía y la fuente receptora de la misma, se clasifican en :

 - a. Sensores monoestáticos: cuando las fuentes de emisión de energía ocupan la misma posición en el espacio. Por ejemplo: el radar.
 - b. Sensores biestáticos: la fuente de emisión tiene una posición espacial diferente de la fuente de recepción. Por ejemplo: la cámara fotográfica.
- **Según los mecanismos utilizados para captar la información:** Con base a este criterio se clasifican en:
 - a. Sensores fotográficos.
 - b. Sensores electro-óptico formadores de imagen.
 - c. Sensores electro-ópticos no formadores de imagen.
 - d. Sensores de microondas.

2.2. Espectroscopía

La espectroscopia es una rama de la óptica que estudia la interacción entre la luz y la materia, y cómo esta interacción puede ser utilizada para obtener información sobre las propiedades de la materia. En particular, la espectroscopia se utiliza para medir la absorción, emisión o dispersión de la radiación electromagnética en función de la longitud de onda o frecuencia.

Existen varios tipos de espectroscopías, cada una con sus propias aplicaciones y principios fundamentales. Por ejemplo:

- **Espectroscopia de absorción:** mide la cantidad de luz que es absorbida por una muestra de materia en función de la longitud de onda. Esta técnica se utiliza en espectrofotometría para medir la concentración de sustancias en una solución.
- **Espectroscopia de emisión:** mide la cantidad de luz emitida por una muestra de materia en función de la longitud de onda. Por ejemplo, con espectroscopia de fluorescencia se estudia la estructura de proteínas o la presencia de ciertas moléculas en una muestra.
- **Espectroscopia de dispersión:** mide la desviación o dispersión de la luz en función de la longitud de onda. Por ejemplo, esta técnica se utiliza en la espectroscopia Raman para estudiar la estructura molecular de una muestra.
- **Espectroscopia de resonancia magnética nuclear (RMN):** mide la absorción y emisión de energía por los núcleos atómicos en un campo magnético. Esta técnica se utiliza para determinar la estructura de moléculas orgánicas.

La espectroscopia tiene una amplia variedad de aplicaciones en campos como la química, la física, la astronomía, la biología, la medicina y la ingeniería, entre otros.

2.2.1. Interacción entre la Radiación y la Materia

Las interacciones más interesantes y útiles en espectroscopia son aquellas en las que ocurren transiciones entre diferentes niveles de energía de especies químicas. Existen también otras interacciones, como la reflexión, refracción, dispersión elástica, interferencia y difracción, a menudo están relacionadas con las propiedades generales de los materiales en lugar de los niveles de energía únicos de moléculas o átomos específicos. Aunque estas interacciones generales también son de interés en espectroscopia, resulta más provechoso enfocarse en aquellas interacciones en las que ocurren transiciones de nivel de energía.

Los tipos específicos de interacciones observados dependen fuertemente de la energía de la radiación utilizada y el modo adecuado de detección según su lugar en el espectro electromagnético (Figura 2.1). (D. Skoog, West, Holer, y Crouch, 2014)

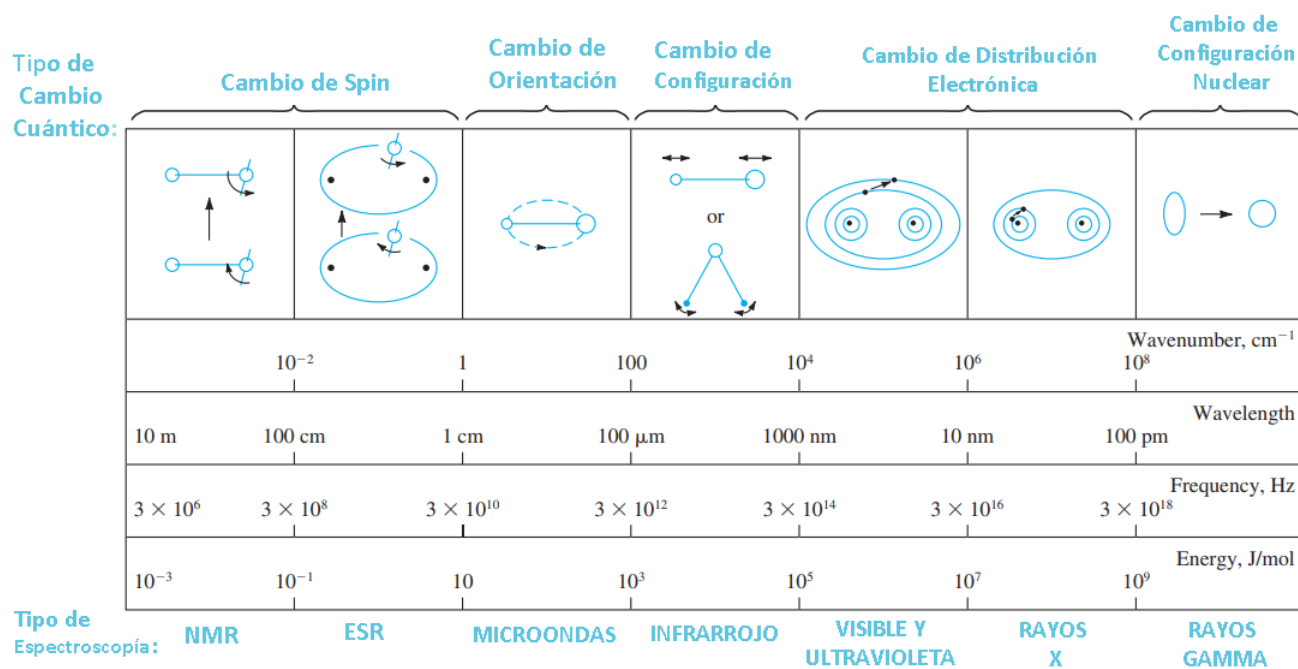


Figura 2.1: Tipos de transiciones atómicas y moleculares que resultan de las interacciones de la radiación con una muestra con su respectiva longitud de onda

Fuente: Tomada de (D. Skoog et al., 2014)

2.2.1.0.1. Absorción de Radiación Cada tipo de enlace químico y de grupo funcional tiene una frecuencia natural de vibración que está relacionada con la masa y la fuerza de los enlaces. Cuando una molécula interactúa con la radiación electromagnética en una región específica del espectro, los enlaces químicos de la molécula vibran y absorben la radiación. El ancho de la banda de absorción se relaciona con la cantidad de moléculas que absorben la radiación y su distribución de frecuencias de vibración. Por ejemplo, una muestra que contiene varias moléculas diferentes con vibraciones que se superponen puede tener una banda de absorción más ancha que una muestra que contiene una sola molécula con una vibración muy bien definida.

En la figura 2.2 a), podemos ver en el espectro de un gas muchas líneas debido a que se evidencia sus transiciones electrónicas, vibracionales y rotacionales. Por ejemplo: el vapor de Na (fig. 2.3 (a) y (b)).

En un solvente no polar (*b*), las transiciones electrónicas pueden ser observadas, pero la vibración y la estructura rotacional se ha perdido. Por ejemplo: Benceno en Hexano (fig. 2.3 (c)).

En un solvente polar (*c*), las fuerzas fuertes intermoleculares han causado los picos electrónicos para dar como resultado solo un suave pico de absorción. Por ejemplo: Bifenilo en Hexano (fig. 2.3 (d)).

De un espectro de absorción se puede obtener información sobre la sustancia absorbente, como su concentración a través de la ley de Lambert-Beer (Anexo B) e información de su composición molecular a través de la medida del FWHM (Anexo A).

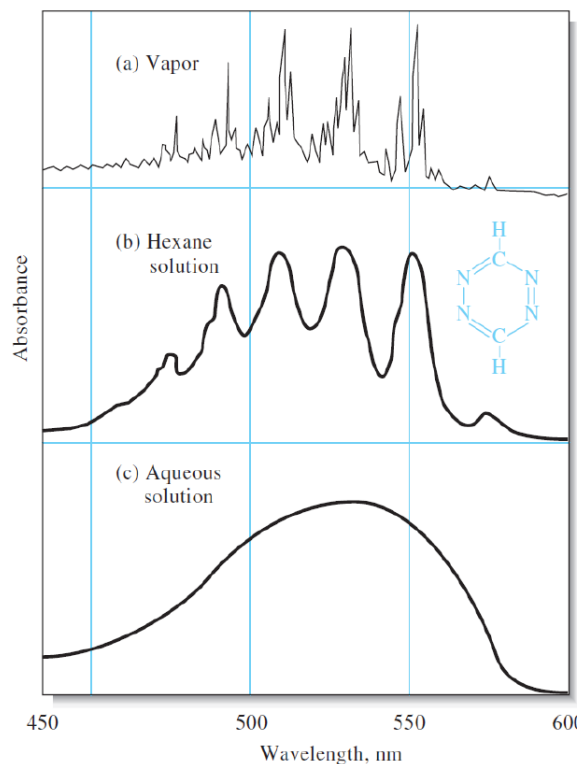


Figura 2.2: Diferentes Espectros de Absorción.
Fuente: Tomada de (D. Skoog et al., 2014)

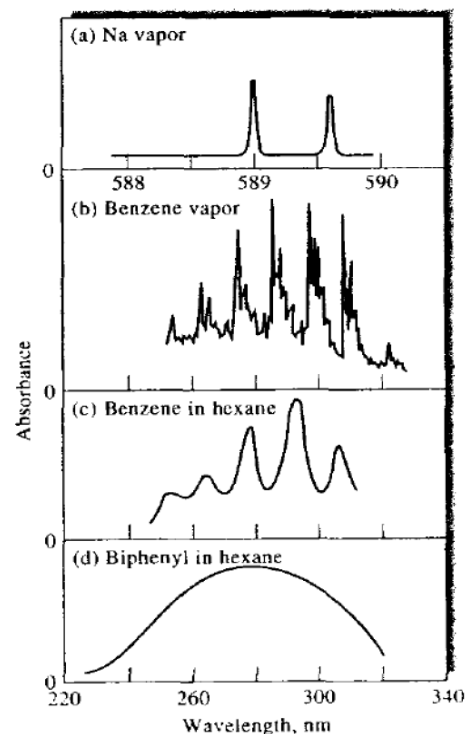


Figura 2.3: Diferencia entre Espectros de gases, solvente no polar y polar Absorción.
Fuente: Tomada de (D. Skoog et al., 2014)

2.2.2. Interacción de la atmósfera con la radiación electromagnética

La cantidad de energía que los sistemas de teledetección detectan depende de cómo la fuente emite la energía y de los materiales con los que la energía interactúa durante su recorrido hacia el detector. Aunque pueda parecer que este recorrido es sencillo, en realidad existen muchos factores que deben ser considerados. La atmósfera es el medio en el que la radiación solar viaja desde el sol hasta el sensor, además contiene oxígeno, nitrógeno y cantidades significativas de vapor de agua, ozono y dióxido de carbono, los cuales interactúan con la radiación electromagnética de diversas formas. Estas interacciones generan un efecto de red que consiste en la absorción de energía en rangos específicos de longitud de onda, conocidos como bandas, a través de transiciones vibracionales y rotacionales (Villegas, 2008).

La atmósfera afecta a la radiación incidente mediante los siguientes mecanismos (D. Pérez, 2007):

1. **Dispersión (Scattering):** Es la difusión impredecible de la radiación por las partículas en la atmósfera. La dirección de la energía es modificada sin previsión y en forma caótica en función de las partículas atmosféricas. Los efectos de la dispersión son más notables en las longitudes de onda del visible y del Infrarrojo. Existen tres tipos básicos de dispersión:
 - **Dispersión Rayleigh:** Ocurre cuando la radiación se dispersa al interactuar con partículas y moléculas atmosféricas que son mucho más pequeñas que la longitud de onda. Estas partículas pueden ser moléculas de aire, por ejemplo, la dispersión Rayleigh es responsable de la apariencia azul del cielo en un día despejado.

- **Dispersión mie:** Ocurre cuando la radiación interactúa con partículas que son aproximadamente del mismo tamaño que la longitud de onda. Estas partículas pueden ser esferas, cilindros, etc., y pueden encontrarse en una variedad de materiales, incluyendo aerosoles, polvo, humo, gotas de lluvia y nieve. Esto es lo que causa los colores de las nubes, el humo y otros aerosoles en la atmósfera.

- **No selectiva:**

Ocurre cuando las partículas del medio que atraviesa la radiación tienen un tamaño mucho mayor que la longitud de onda de la luz. En este caso, todas las longitudes de onda se dispersan por igual y no se produce ninguna distorsión en el color de la luz. La dispersión no selectiva es común en materiales como el humo, la niebla, las nubes y el polvo. Cuando la luz pasa a través de estos materiales, las partículas en el aire dispersan la luz en todas las direcciones, lo que hace que la luz parezca más difusa y menos brillante.

2. **Absorción:** Es el proceso mediante el cual la energía radiante que entra en la atmósfera es retenida por una sustancia. Al ser absorbida, la energía radiante se transforma irreversiblemente en otra forma de energía, dependiendo de la naturaleza del medio o elemento que está absorbiéndola (Figura 2.4). La atmósfera absorberá solamente una porción de la energía total, mientras que el resto será reflejado, refractado o esparcido. Asimismo, la energía absorbida puede transmitirse en otras partes de la atmósfera a través del proceso de transmisión, en el cual la radiación se propaga a través de un medio.

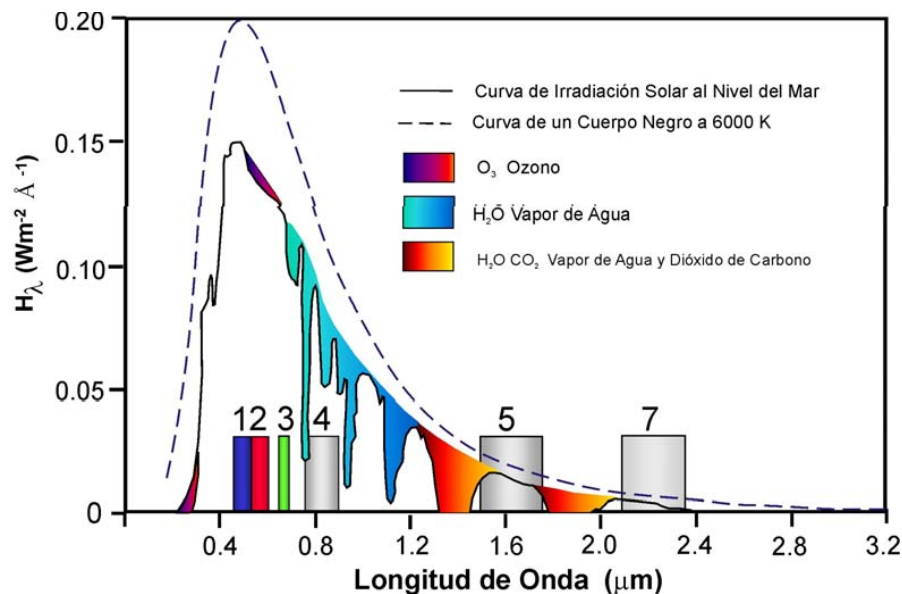


Figura 2.4: Curva de de la radiación de un cuerpo negro a 6000 K y curva de Irradiancia H_λ en función de la Longitud de Onda donde se observan picos de absorción de O_3 , H_2O y CO_2 .

Fuente: Tomada de (D. Pérez, 2007)

Aproximadamente el 50 % del espectro electromagnético es inutilizable, ya que no toda la radiación solar incidente sobre el planeta puede penetrar la atmósfera, esto se puede ver en la Figura 2.5 que muestra la variación de la irradiancia en relación con longitudes de onda del espectro electromagnético. La curva continua es la irradiación solar al nivel del mar, mientras las curva punteada es la curva de irradiación solar fuera de la atmósfera terrestre (Villegas, 2008).

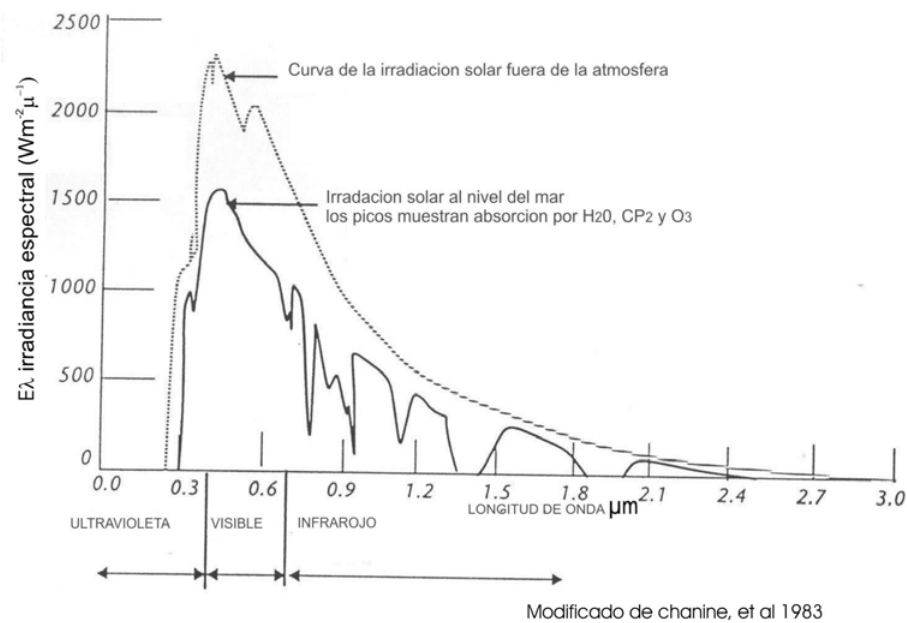


Figura 2.5: Irradiancia espectral de la iluminación del sol en la superficie de la tierra.
Fuente: Tomada de (Villegas, 2008)

Existen regiones del espectro para las cuales la atmósfera es **opaca**, o sea que no permite el paso de la radiación electromagnética; estas regiones definen las “*Bandas de Absorción de la Atmósfera*”. Las porciones del espectro electromagnético donde la atmósfera es **transparente** a la radiación solar, son conocidas como “*Ventanas Atmosféricas*” (Villegas, 2008).

3. **Emisión:** La atmósfera emite radiación electromagnética en diferentes longitudes de onda debido a la presencia de gases, aerosoles y partículas en suspensión. Estas emisiones se producen principalmente en la región infrarroja del espectro electromagnético y son el resultado de la temperatura de los gases y las partículas de la atmósfera.

La emisión de la atmósfera tiene un impacto en el clima y en el calentamiento global, ya que la emisión de gases de efecto invernadero como el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso contribuyen al calentamiento de la atmósfera y del planeta. Además, la emisión de la atmósfera también puede tener efectos en la transmisión de señales de radio y televisión, ya que la radiación electromagnética emitida por la atmósfera puede interferir con las señales de comunicación.

2.2.3. Firmas espectrales

La proporción del flujo de energía incidente que es reflejado, absorbido y transmitido depende de las características del material que se observa. Dado que esa proporción varía en distintas bandas del espectro electromagnético, es muy interesante conocer el comportamiento de dichos materiales en diversas longitudes de onda. Las firmas espectrales representan el modo peculiar con el que una determinada cubierta refleja o emite energía a distintas longitudes de onda. Son curvas específicas que suelen obtenerse en el laboratorio, para los principales materiales que constituyen la superficie de la tierra. En dichas curvas el eje de las “X” representa las longitudes de onda, mientras el de las “Y” muestra la

reflectancia o intensidad. Algunas de estas curvas tienden a presentar una respuesta uniforme en distintas longitudes de onda, mientras otras ofrecen un comportamiento mucho más selectivo (Villegas, 2008).

El comportamiento de una especie o una mezcla de especies en el espectro electromagnético, está influido por sus propias características y también por una serie de factores externos que modifican su comportamiento espectral teórico.

Algunos de estos factores son: el ángulo de iluminación solar, la influencia de la atmósfera, las variaciones medio ambientales y el ángulo de observación.

Como se puede ver en la figura 2.6 cada material presenta una cierta variabilidad espectral. Las curvas de reflectividad, absorción o transmitancia son útiles para interpretar los datos obtenidos en la teledetección, ya que relacionan los valores adquiridos por el sensor con valores, patrones y características ya conocidos y que son únicos para diferentes especies.

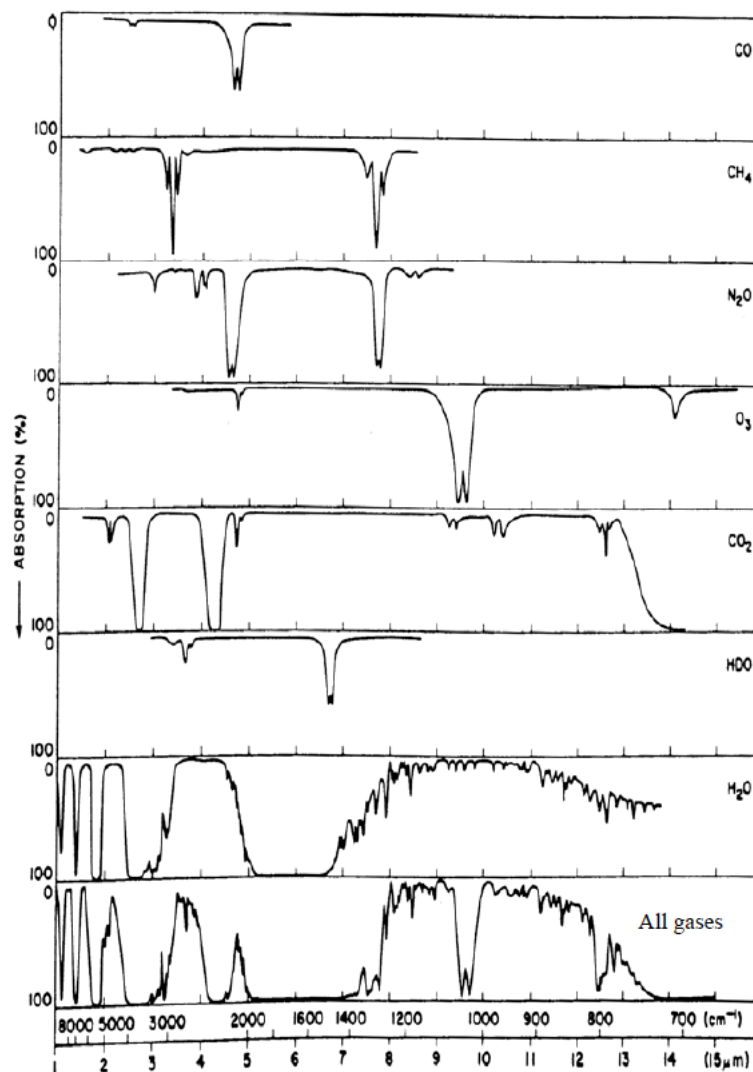


Figura 2.6: Firmas espectrales de de los principales gases atmosféricos .
Fuente: Tomada de (Sokolik, 2009)

2.2.4. Cálculo de los Espesores Atmosféricos

Para estudios de la atmósfera, la radiación solar directa que atraviesa la atmósfera puede ser modelizada mediante la ley de Lambert-Boguer-Beer:

$$I = \frac{I_0}{R^2} \text{EXP} (-m \cdot \tau_{tot}). \quad (2.1)$$

Donde, I es la atenuación de la radiación directa e I_0 es el flujo de energía espectral que alcanza la cima de la atmósfera. La masa óptica (m), la distancia media Tierra-Sol (R^2) y el espesor óptico (τ_{tot}) de todas las especies atmosféricas, que aparecen en el exponente, describen la transmisión de energía a través de la atmósfera (Molineaux, Ineichen, y Delaunay, 1995; Alcántara, 2013).

El espesor óptico total se calcula con la siguiente ecuación:

$$\tau_{tot} = \tau_A + \tau_{Oz} + \tau_R, \quad (2.2)$$

en la cual se observa que el espesor óptico total es una suma del espesor óptico debido a los aerosoles (τ_A), el espesor óptico debido al ozono τ_{Oz} y el espesor óptico debido a la dispersión Rayleigh, para el oxígeno molecular y nitrógeno (τ_R).

Se pueden determinar τ_{tot} , τ_A , τ_{Oz} , τ_R , m y R^2 de la siguiente manera:

- **Masa óptica (m):** Es una variable que depende 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).

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 el Zenit, la distancia será mínima, ya que los rayos solares forman un ángulo aproximadamente igual a 90° 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.

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).

$$m = (\cos(\theta_z) + 0,15(93,885 - \theta_z)^{-1,253})^{-1} \quad (2.3)$$

El valor de θ_z puede determinarse por un procedimiento recomendado por la **Earth System Research Laboratory de la NOAA** con la siguiente expresión:

$$\cos(\theta_z) = \sin(\text{lat}) \sin(\text{decl}) + \cos(\text{lat}) \cos(\text{decl}) \cos(\text{ha}), \quad (2.4)$$

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. (Múnica, 2015; *General Solar Position Calculations*, s.f.)

■ Distancia media Tierra-Sol (R^2):

Al igual que la masa óptica, depende de la posición del sol ya que la tierra gira alrededor del Sol describiendo una trayectoria elíptica, con el Sol ubicado en uno de sus focos, y por lo tanto el valor de R^2 no es constante. Este valor varía entre 0,967 UA y 1,033 UA según el día del año.

Una forma matemática simple para expresar este parámetro es la siguiente:

$$R^2 = \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi d_n}{365} \right) \right], \quad (2.5)$$

la cual fue presentada por Duffie y Beckman en 1975, donde se ve que R^2 depende del día juliano del año d_n (Múnera, 2015).

■ Espesor óptico Total (τ_{tot}) :

Es posible encontrar este valor si encontramos el valor de τ_A , τ_{Oz} y τ_R , sin embargo, se puede encontrar su valor experimental para cada longitud de onda, si trabajamos con la ecuación 2.1, si aplicamos logaritmo natural a ambos lados obtenemos:

$$\ln(I) = \ln \left(\frac{I_0}{R^2} \right) - m \cdot \tau_{tot}, \quad (2.6)$$

Por lo cual, si se realiza una gráfica de $\ln(I)$ en función de m , al ajustar los datos experimentales a una línea recta se obtendrá el valor de una pendiente que correspondería al valor del τ_{tot} experimental.

Para el anterior método, es recomendable lo siguiente (Alcántara, 2013):

- 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 significa una pérdida de la linealidad a la hora de hacer la regresión. Además es importante en la medida de lo posible que los datos sean obtenidos bajo condiciones de variabilidad atmosférica baja.
- No aplicar este método de calibración en masas ópticas muy cercanas a $m = 0$, ya que habría mayor actividad solar, que significaría en un levantamiento de la capa de mezcla debido a fenómenos turbulentos.

Este método es la base de la conocida Calibración Langley (Múnera, 2015).

■ Espesor óptico debido al ozono (τ_{Oz}) :

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

$$\tau_{Oz} = A_{03}(\lambda)L_0 \quad (2.7)$$

Donde A_{03} es el coeficiente de absorción del ozono en cm^{-1} y L_0 es la cantidad de ozono que por lo general se expresa en unidades Dobson. Una de las maneras de obtener los datos de

concentración de ozono en DU para el sitio de la medición es gracias al espectrómetro TOMS del satélite Aura y pueden consultarse en :ozoneaq.gsfc.nasa.gov. Por otra parte, los valores de A_{03} se los puede tomar de algunas fuentes literarias (Gueymard, 1995), sin embargo deben ser adaptados según la resolución espectral del espectrómetro utilizado durante las mediciones.

■ **Espesor óptico debido a la dispersión Rayleigh (τ_R) :**

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. Las siguientes son formulaciones empíricas propuestas para el espesor óptico debido a la dispersión molecular (Hansen y Travis, 1974; Múnera, 2015; Martinez, 2004):

$$\text{Moller (1957)} \quad \tau_R = 0,008735 \lambda^{-4,09} \frac{p}{p_0} \quad (2.8)$$

$$\text{Hanse y Travis (1974)} \quad \tau_R = 0,008569 \lambda^{-4} (1 + 0,0113 \lambda^{-2} + 0,00013 \lambda^{-4}) \frac{p}{p_0} \quad (2.9)$$

$$\text{Leckner (1978)} \quad \tau_R = 0,008735 \lambda^{-4,09} \frac{p}{p_0} \quad (2.10)$$

$$\text{LOWTRAN-5 (1980)} \quad \tau_R = \lambda^{-4} (115,6406 - 1,3366 \lambda^{-2})^{-1} \frac{p}{p_0} \quad (2.11)$$

Las anteriores son una guía para determinar la contribución Rayleigh, las cuales para ajustarse a un sitio en particular, debe ser multiplicada por la razón entre la presión del lugar donde se tomaron las mediciones (p) y la presión atmosférica a nivel del mar ($p_0 = 1013,5$ hPa).

■ **Espesor óptico debido a los aerosoles (τ_A) :**

Existen muchas maneras de calcular este valor, una de las más comunes es con la siguiente relación (Múnera, 2015):

$$\tau_A = \tau_{tot} - \tau_{Oz} - \tau_R, \quad (2.12)$$

debido a que es más sencillo encontrar los valores de τ_{tot} , τ_{Oz} y τ_R .

No obstante, Ångström propuso la siguiente expresión para calcular el espesor óptico de los aerosoles en todo el mundo (Ångström, 1929, 1930):

$$\tau_A = \beta \lambda^{-\alpha}, \quad (2.13)$$

donde, β es el coeficiente de turbidez de Ångström el cual varía típicamente de 0,01 y 0,5 (ya sea cerca del polo sur o en una atmósfera extremadamente turbia) y α es el coeficiente espectral de Ångström (Molineaux et al., 1995).

2.3. Contaminantes más comunes de la atmósfera

Las sustancias que se introducen en el aire, tienen diversos orígenes y composición, y se han clasificado según sus efectos en la salud o en el ambiente como: contaminantes criterio, tóxicos o peligrosos, climáticos de vida corta y de efecto invernadero. A través de diversos estudios epidemiológicos se determinaron como perjudiciales para la salud y el bienestar de los humanos, siendo los más comunes: Partículas Suspendidas Totales (PST), Material Particulado menor a 10 micras (PM_{10}) y Material Particulado menor a 2,5 micras ($PM_{2,5}$), Dióxido de Nitrógeno (NO_2), Dióxido de Azufre (SO_2), Ozono troposférico (O_3) y Monóxido de Carbono (CO). (IDEAM, 2021)

El origen de estas sustancias es diverso, ya que pueden ser emitidas a la atmósfera a partir de fuentes naturales como erupciones volcánicas, incendios forestales, erosión del suelo, procesos de polinización, entre otros, que son propios de la dinámica terrestre. También existen emisiones por el desarrollo de actividades antropogénicas tales como:

- Uso de combustibles fósiles en la industria y en el transporte.
- Desarrollo de actividades mineras.
- Uso de fertilizantes.
- Labores de arado.
- Quema de residuos al aire libre.

Diversos estudios epidemiológicos realizados a nivel mundial han demostrado que el material particulado no es un factor causal directo en enfermedad o mortalidad respiratoria aguda sino un factor asociado que en combinación con otros factores produce un aumento de las enfermedades respiratorias y cuyo riesgo para el individuo varía en función de las condiciones fisiológicas de la edad y de los antecedentes de enfermedad cardio respiratoria. Estos contaminantes pueden clasificarse como material particulado y gases. (IDEAM, 2021)

2.3.1. Material particulado

Es una mezcla bastante compleja de partículas líquidas y sólidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire que varían en tamaño forma y composición, según su tamaño se clasifican en partículas suspendidas totales, partículas menores a 10 micras o partículas menores a 2,5 micras.

2.3.1.0.1. Partículas suspendidas totales Son partículas dispersas en el aire que no se sedimentan en periodos cortos sino que permanecen suspendidas debido a su tamaño y densidad.

2.3.1.0.2. Partículas menores a 10 micras Son llamadas también partículas gruesas, tienen un tamaño comprendido entre $2,5 \mu m$ y $10 \mu m$, aproximadamente el ancho de un séptimo de cabello.

2.3.1.0.3. Partículas menores a 2,5 micras Se conocen como partículas finas de menos de 2,5 micras de diámetro. Suponen un mayor peligro a la salud debido a que al inhalarlas pueden alcanzar las zonas periféricas de los bronquiolos. (IDEAM, 2021)

2.3.2. Gases

Estos gases pueden tener efectos diferentes en la atmósfera y en los seres vivos que la habitan, y algunos de ellos son considerados gases de efecto invernadero, lo que significa que pueden contribuir al cambio climático. (IDEAM, 2017)

2.3.2.0.1. Dióxido de Azufre SO_2 Gas incoloro que se forma a partir de la combustión de sustancias que contienen azufre, principalmente petróleo y carbón, así como de numerosos procesos industriales. En los seres humanos causa broncoconstricción, bronquitis y traqueítis. Agrava enfermedades respiratorias y cardiovasculares existentes.

2.3.2.0.2. Monóxido de Carbono CO Se forma a partir de la combustión incompleta de combustibles que contienen carbono. Este es un caso común donde una proporción del carbón se oxida solamente a monóxido de carbono, mientras que la combustión completa conduce a la formación de dióxido de carbono. Inhabilita el transporte de oxígeno a las células. En los humanos provoca mareos, dolor de cabeza, náuseas, estados de inconciencia e incluso la muerte.

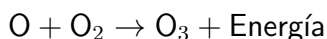
2.3.2.0.3. Dióxido de Nitrógeno NO_2 En un proceso paralelo al SO_2 , el nitrógeno en los combustibles se convierte por combustión a altas temperaturas a óxidos de nitrógeno. Irrita las vías respiratorias. En los humanos causa bronquitis y pulmonía. Reduce significativamente la resistencia respiratoria a las infecciones.

2.3.2.0.4. El Ozono O_3 El ozono es un gas compuesto por tres átomos de oxígeno (O_3) que se encuentra en la atmósfera terrestre y tiene un papel importante en la protección de la vida en la Tierra, tanto como un filtro para la radiación ultravioleta dañina del sol como en la purificación del aire. Sin embargo, en concentraciones elevadas, el ozono puede ser tóxico y tener efectos negativos en la salud humana y el medio ambiente. (Benavides, Sepúlveda, y Ayala, 2019)

El O_3 se forma cuando la radiación UV del sol interactúa con moléculas de oxígeno (O_2) en la atmósfera y las divide en dos átomos de oxígeno individuales.



Estos átomos de oxígeno pueden unirse a otras moléculas de oxígeno para formar moléculas de ozono.



Este proceso se conoce como la reacción de Chapman. Según su altura puede clasificarse en:

- **Ozono Estratosférico** El ozono estratosférico es una capa de gas que se encuentra en la atmósfera de la Tierra, específicamente en la estratosfera, una capa que se encuentra aproximadamente entre los 10 y 50 kilómetros de altura sobre la superficie terrestre. El ozono estratosférico es un gas compuesto por moléculas de ozono (O_3) que se forman a través de una serie de reacciones químicas que involucran la radiación solar.

Esta capa de ozono estratosférico tiene una función vital para la vida en la Tierra, ya que actúa como un filtro natural que absorbe la radiación ultravioleta (UV) del sol y por lo tanto protege contra la radiación UVB, que causa daño en la piel y puede provocar cáncer de piel.

La disminución del ozono estratosférico, también conocida como agujero de ozono, es causada principalmente por la emisión de gases que contienen cloro y bromo, como los clorofluorocarbonos utilizados en la industria y en productos de consumo.

A diferencia del ozono superficial, el ozono estratosférico no es dañino para la salud ni el medio ambiente porque se encuentra a una altitud donde no hay contacto directo con los seres humanos y otros seres vivos (Benavides et al., 2019).

- **Ozono Troposférico** El ozono que se encuentra en la troposfera, es decir, en la capa más baja de la atmósfera que se extiende desde la superficie terrestre hasta aproximadamente los 10 kilómetros de altura en las zonas ecuatoriales, se conoce como ozono troposférico. El ozono troposférico se concentra principalmente en la parte de la atmósfera que va desde la superficie terrestre hasta unos 100 metros de altura, y a esta porción se le llama *ozono superficial*. Aunque todas las moléculas de ozono son iguales, es decir, contienen tres átomos de oxígeno, el ozono estratosférico y el ozono superficial tienen diferentes implicaciones ambientales para los seres humanos y otras formas de vida.

El ozono troposférico, especialmente el ozono superficial, es un problema diurno ya que la luz solar juega un papel importante en su formación y además es un contaminante generado por reacciones fotoquímicas, principalmente en las áreas urbanas, debido a diversas fuentes de emisión, como el tráfico y la industria.

La alta concentración de ozono superficial es perjudicial para la salud humana, ya que este gas reacciona fuertemente para destruir o alterar otras moléculas, lo que lo convierte en un contaminante tóxico. La exposición al ozono puede causar problemas respiratorios y pulmonares, como inflamación de los tejidos respiratorios, dolor en el pecho, irritación de la garganta y los ojos, aumento de las afecciones asmáticas, empeoramiento de enfermedades cardíacas preexistentes, tos, jadeo, dificultad para respirar durante el ejercicio y alteraciones en el sistema inmunológico. La exposición repetida al ozono durante varios meses puede causar daños permanentes en los pulmones, y las personas que pasan mucho tiempo al aire libre están en mayor riesgo.

El ozono superficial también tiene efectos nocivos sobre la vegetación, ya que deteriora las hojas de los árboles y plantas, reduciendo el rendimiento de los cultivos y el crecimiento de los bosques debido a que interfiere en la capacidad de almacenar y producir nutrientes, lo cual, hace más susceptibles las plantas a insectos, a otros contaminantes y a las inclemencias del tiempo.

En general, los efectos negativos del ozono superficial contrastan con los efectos positivos del ozono estratosférico. Sin embargo, un aspecto positivo de la presencia natural del ozono superficial es el de contribuir a remover otros gases emitidos por actividades humanas o naturales, como es el metano, el monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno. (Benavides et al., 2019)

Finalmente, el incremento del ozono en la baja atmósfera, al igual que del dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido nitroso (N_2O) y los gases que contienen compuestos halogenados, considerados como gases de efecto invernadero (*GEI*), están generando un cambio en

el balance radiativo de la atmósfera de la Tierra, entre la radiación solar entrante y la radiación infrarroja saliente. (Benavides et al., 2019)

2.3.3. Criterio de medición de Contaminantes

La evaluación de la calidad del aire se realiza mediante el uso de equipos especializados que emplean métodos y principios de detección estandarizados y reconocidos por agencias gubernamentales e instituciones científicas internacionales. Estos métodos y principios garantizan que las mediciones realizadas para cada sustancia contaminante sean precisas y fiables, lo cual es importante para asegurar la certeza de los resultados y la confiabilidad de la información que se utiliza para tomar decisiones sobre la gestión y el control de la contaminación del aire. (IDEAM, 2017; Acuerdo 2254, 2017)

2.3.3.1. Unidades de reporte para calidad del aire

Según lo establecido en la Resolución 2254 de 2017 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, las mediciones de la calidad del aire, se notifican como concentraciones medias horarias, octohorarias, diarias o anuales, expresada en microgramos por metro cúbico ($\mu g/m^3$) de aire. Sin embargo, a nivel nacional muchos reportes se continúan realizando en miligramos por metro cúbico (mg/m^3), partes por millón (ppm) o partes por billón (ppb), razón por la cual es necesario que las Autoridades Ambientales realicen las correspondientes conversiones, considerando las condiciones de presión y temperatura locales y de referencia, con el fin de informar clara y correctamente a la población, sobre los niveles de calidad del aire que se presentan en una estación de monitoreo.

2.3.3.2. Niveles máximos permisibles en Colombia

Los niveles máximos permisibles para los contaminantes, en Colombia están regulados por la Resolución 2254 de 2017 emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. Esta norma atiende a publicaciones realizadas por la Organización Mundial de la Salud – OMS, entidad que ha promulgado una serie de recomendaciones orientadas a proteger la salud pública, las cuales se basan en los resultados de múltiples estudios epidemiológicos. Sin embargo, y teniendo en cuenta que cada país cuenta con una capacidad económica, política, social, e institucional diferente, la OMS definió varios niveles objetivo, para que los países, de acuerdo a su nivel de desarrollo y a su propia capacidad, avancen en relación con la gestión de la calidad del aire.

La normativa actual establecida en la Resolución 2254 de 2017, es correspondiente con el objetivo intermedio –3 de la Organización Mundial de la Salud y se pueden ver los valores máximos de concentración permitidos en las tablas 2.1, 2.2 y 2.3.

Contaminante	Concentraciones $\mu g/m^3$
PST	100
PM_{10}	50
$PM_{2,5}$	25
SO_2	80
NO_2	60

Tabla 2.1: Exposición prolongada - Valores anuales permitidos según la Normatividad de calidad del aire en Colombia.

Adaptado de (IDEAM, 2017; Acuerdo 2254, 2017)

Contaminante	Concentraciones $\mu g/m^3$
PM_{10}	75
$PM_{2,5}$	37
SO_2	50
NO_2	150

Tabla 2.2: Exposición de corta duración (24 horas) - Valores diarios permitidos según la Normatividad de calidad del aire en Colombia.

Adaptado de (IDEAM, 2017; Acuerdo 2254, 2017)

Contaminante	Concentraciones $\mu g/m^3$
O_3	100
CO	5000

Tabla 2.3: Exposición de corta duración (8 horas) - Valores Octohorarios permitidos según la Normatividad de calidad del aire en Colombia.

Adaptado de (IDEAM, 2017; Acuerdo 2254, 2017)

2.4. Sistemas de Vigilancia en la Calidad de Aire (SVCA) en Colombia

De conformidad con el Parágrafo 2 del artículo 5, del Decreto 1600 de 1994 emitido por el Ministerio de Ambiente de Colombia, *"los laboratorios que produzcan información cuantitativa, física, química y biótica para los estudios o análisis requeridos por las autoridades ambientales competentes, y los demás que produzcan información de carácter oficial relacionada con la calidad del medio ambiente y de los recursos naturales renovables, deberán poseer certificado de acreditación correspondiente otorgado por el IDEAM"*. En 2017 de los 23 sistemas de vigilancia de calidad del aire existentes en el país únicamente 2 (CORPOGUAJIRA y CORPOCESAR) estaban acreditados ante el IDEAM (IDEAM, 2017).

A pesar de la cobertura existente en el país, existen municipios que a pesar de cumplir con los criterios y de tener problemas específicos de calidad del aire, no cuentan con la cobertura de ninguno de los Sistemas de Vigilancia instalados a nivel nacional. También existen casos, en los que el Sistema de Vigilancia implementado no corresponde a la complejidad indicada en el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire, razón por la cual el monitoreo y seguimiento de este recurso podría no ser el adecuado (IDEAM, 2017).

Según el IDEAM se utilizan los siguientes tipos de SVCA en Colombia (MAVDT, 2010b; IDEAM, 2007):

1. **Manuales:** Están constituidos totalmente por equipos manuales, por ejemplo: muestreadores y semiautomáticos. Requieren un laboratorio como apoyo para el análisis de las muestras tomadas y una rutina para la recolección de las muestras, de acuerdo con una periodicidad preestablecida. (Figura 2.7 b))
2. **Automáticas:** Están constituidos totalmente por equipos y sistemas automáticos, por ejemplo: analizadores automáticos y sensores remotos. Estos sistemas no requieren análisis posterior de la muestra tomada. Por medio de métodos ópticos o eléctricos se analiza la muestra directamente proporcionando datos en tiempo real, de modo que se puedan tomar acciones inmediatas ante la ocurrencia de un evento de concentraciones altas de algún contaminante. (Figura 2.7 a))

3. **Mixtas:** : Están constituidos por la combinación entre equipos manuales y automáticos. (Figura 2.7 c))

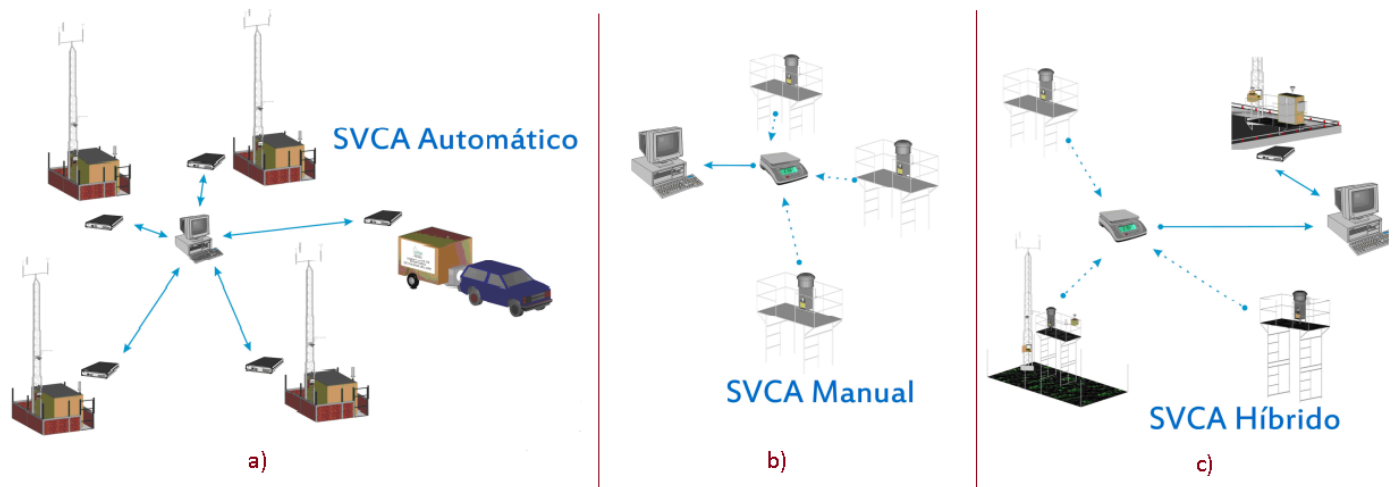


Figura 2.7: Tipos de SVCA según su tecnología
Fuente: Tomada y adaptada de (MAVDT, 2010b)

Los muestreadores, son empleados para la recolección de muestras, las cuales posteriormente deben ser llevadas al laboratorio para desarrollar los análisis físico-químicos y realizar las respectivas cuantificaciones de la presencia del contaminante deseado. Estos equipos pueden ser de dos tipos: manuales o semiautomáticos.

Los analizadores, que funcionan de manera automática, y a diferencia de los muestreadores, no solamente recolectan la muestra sino que internamente cuentan con los accesorios necesarios para que a partir de procedimientos como fluorescencia UV, quimioluminiscencia, absorción infrarroja, absorción de rayos beta y microbalanza, permiten determinar las concentraciones de cada contaminante específicamente.(MAVDT, 2010a)

Se estima que los costos estimados de inversión según el tipo de tecnología en dólares de Estados Unidos son aproximadamente los que se observan en la tabla 2.4.

Tecnología	Inversión (USD)
Equipos Pasivos	\$1-\$3 por muestra
Equipos Activos Manuales	\$5000-\$15000 por unidad
Analizadores automáticos	\$10000-\$25000 por monitor
Sensores Remotos	\$25000-\$30000 por sensor

Tabla 2.4: Costos de inversión inicial según tipo de tecnología.

Adaptado de (MAVDT, 2010a)

A los costos de equipo habría que sumarle además, los costos de instalación, operación, análisis y mantenimiento (MAVDT, 2010a).

Capítulo 3

Metodología

3.1. Ensamblaje del equipo de Sensado Remoto

En este trabajo se implementó un equipo de sensado remoto atmosférico con equipamiento básico, útil para el estudio de la calidad del aire de la zona urbana de la ciudad de Pasto.

El equipo fue integrado por:

- **Fuente de radiación electromagnética en la region del visible:** Se trabajó con Luz solar, por lo que se utilizó un sensor remoto pasivo.
- **Telescopio para recepción de la luz:** Se trabajó con un telescopio Cassegrain de Marca Meade ETX-125, con una longitud focal de $f/15$ y una apertura de 5", el cual fue prestado por el Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño, bajo la supervisión del Profesor Alberto Quijano Vodniza.
- **Detector tipo espectrómetro a fibra óptica:** Se trabajó con un espectrómetro de red de difracción fija, con ultraresolución de 0,5 nm y un arreglo extendido de sensores CCD que permite obtener un espectro instantáneo y un registro binario en un computador, el cual fue prestado por la Universidad Nacional con Sede en Medellín, bajo la supervisión del Profesor Álvaro Bastidas Gustín.
- **Equipo de cómputo para el registro de señales digitales.** : Se trabajó con un computador portátil marca Asus con 12 Gb de Ram y procesador i5 de séptima generación perteneciente a la maestrante. Sin embargo, es importante destacar que no se requería obligatoriamente las características técnicas del equipo utilizado, ya que el software *Spectrum Studio*, que brinda los datos del espectrómetro utilizado se puede ejecutar en computadores de bajo presupuesto.

Adicionalmente, fue necesario crear un acople ocular, para mantener la fibra óptica en una posición adecuada en el ocular en el momento de la toma de datos.

Este acople Ocular consiste en un cilindro hueco de una tapa color negro, con 40 mm de longitud y 33,8 mm de diámetro, el cual fue creado en una impresora 3D (figuras 3.1 y 3.2). Este Cilindro contiene un pequeño orificio central en la tapa por donde se ensambla un conector SMA hembra adaptado para fibra óptica el cual permite el acople directo a la fibra del espectrómetro (figura 3.3).

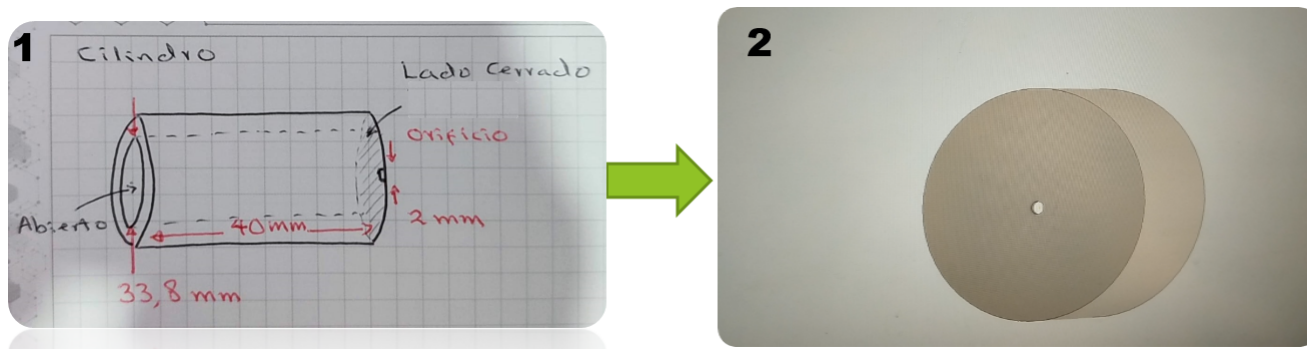


Figura 3.1: Proceso de creación del cilindro: **1.** Diseño del cilindro de acuerdo a las características del telescopio. **2.** Modelado 3D en el software *Solidworks*.

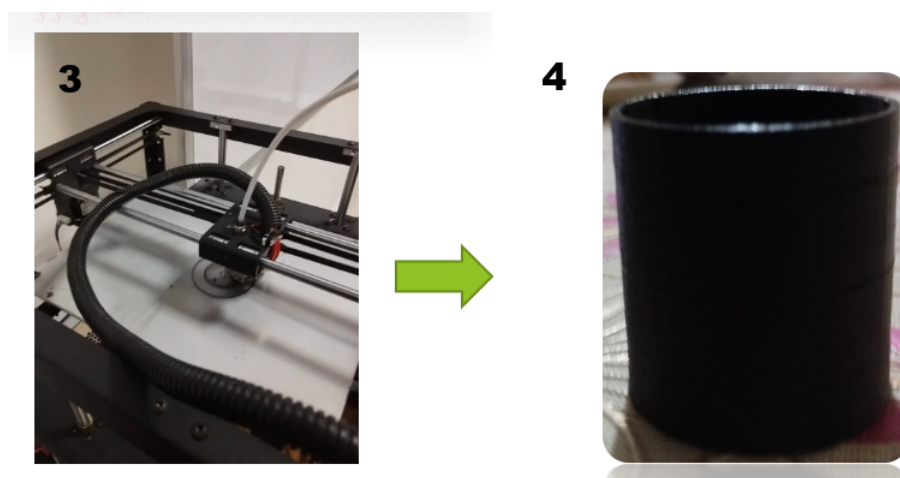


Figura 3.2: Proceso de creación del cilindro: **3.** Impresión 3D del cilindro en la impresora del departamento de Química de la Universidad de Nariño. **4.** Cilindro terminado con las especificaciones esperadas.



Figura 3.3: Acople ocular creado para el trabajo experimental

3.2. Montaje

El equipo de sensado remoto, se ubicó en la terraza del Observatorio Astronómico de la Universidad de Nariño (longitud= $1^{\circ}12'47''$ N y latitud= $77^{\circ}17'29''$), ubicado en la ciudad de Pasto. Para obtener medidas sobresalientes, era necesario ubicar este equipo en una mesa de aproximadamente 1 m de alto. El computador se ubicó dentro del Observatorio con el fin de que este no estorbara en el momento de cambiar la dirección del telescopio hacia las diferentes zonas y a casi medio metro del montaje, lo cual no tuvo inconvenientes, ya que se utilizaron cables de extensión BD 9 para la conexión del espectrómetro y computador portátil. Fue necesario usar una caja de cartón cubierta de papel aluminio con el fin de proteger al espectrómetro de los días muy soleados y evitar el recalentamiento del mismo.



Figura 3.4: Montaje del equipo de Sensado Remoto, donde se observa el telescopio, caja de cartón envuelta de papel aluminio (con el espectrómetro adentro)

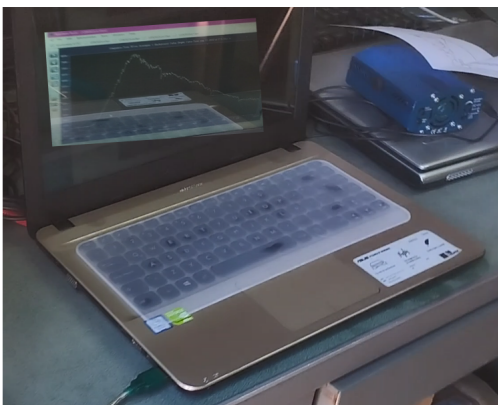


Figura 3.5: Computador portátil con señales del programa Spectrum.



Figura 3.6: Montaje del equipo de Sensado Remoto sobre mesa de trabajo.

Este montaje permitió conocer algunas características de la atmósfera de la ciudad de Pasto.

3.2.1. Calibración del espectrómetro

Para calibrar el espectrómetro se utilizó un láser verde, un láser rojo y el software: *Spectrum Studio*. Este software incluye la herramienta: cambiar la calibración de longitud de onda (Change Wavelength Calibration), en esta herramienta, los coeficientes de calibración de longitud de onda (C_0 , C_1 , C_2 y C_3) se pueden cambiar o se utiliza el botón “Restablecer” para volver a los valores del fabricante almacenados en el espectrómetro.

Al conectar el espectrómetro al computador y abrir el software, se evidencia que al capturar el espectro del láser verde o rojo, las longitudes de onda mostradas no son correctas. Por consiguiente, es necesario ajustar los valores a $C_0 = 460$, $C_1 = 0,12$ y $C_2 = C_3 = 0$ con el fin de que el software muestre las longitudes de onda correctas para las fuentes espectrales.

3.3. Recolección de datos

Las mediciones se realizaron desde el 1 diciembre del 2022 hasta el 31 de diciembre del 2022, desde las 6:00 AM hasta las 12:00 M y con una periodicidad 30 minutos.

En cada media hora de medición se tomaron 4 medidas diferentes, cambiando la dirección del telescopio hacia zonas diferentes: Zona Volcán, Zona Nororiente, Zona Suroccidente y Zona cercana a la posición del Sol. Las últimas 3 zonas las llamaremos durante este trabajo zona oriente, zona sur y zona sol respectivamente.



Figura 3.7: Vista hacia la zona sur.



Figura 3.8: Vista hacia la zona oriente.



Figura 3.9: Vista hacia la zona volcán.

Estas medidas, se realizaron apuntando el telescopio hacia la zona deseada, ubicando el ocular donde se observara la cima de cualquier montaña al ras con el cielo o nubes según el clima.

En el transcurso del 1 de diciembre de 2022 al 31 de diciembre de 2022, se experimentaron dificultades que ocasionalmente impidieron la toma de todas las mediciones previstas. Algunos de estos problemas incluyeron montañas completamente nubladas, también la presencia de lluvia o llovizna, que podrían dañar el telescopio y el espectrómetro. Así mismo, la falta de intensidad luminosa en la mayoría de los días a las 6:00 am y 6:30 am causó que el espectrómetro no registrara los datos correctamente durante este horario.

Durante la toma de mediciones, fue necesario el uso del software Spectrum Studio, el cual está vinculado con el espectrómetro que se usó en la experiencia. Este software brinda las gráficas del espectro (Intensidad vs Longitud de Onda) de manera instantánea y sus respectivos valores numéricos al tomar la medida.

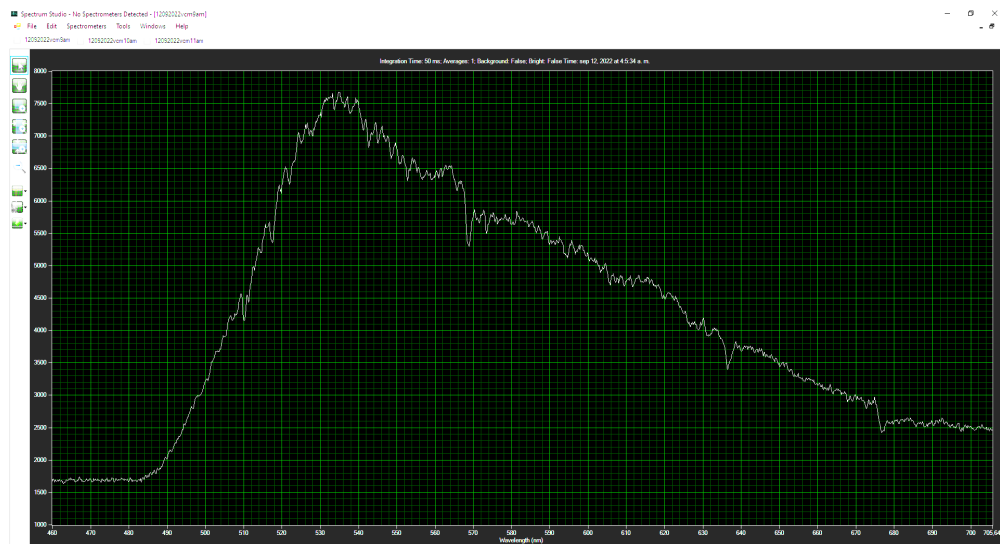


Figura 3.10: Ejemplo de un espectro tomado por el espectrómetro y mostrado por *Spectrum Studio*.

Los datos obtenidos a través de *Spectrum Studio*, se guardan en un formato que no es leído por programas como Excel u Origin, por lo que en cada medición fue necesario realizar un proceso de cambio de formato y con esto fue posible leer la información en cualquier programa de procesamiento de datos. Posteriormente, se realizaron las gráficas y demás operaciones.

Adicionalmente, a través de la página: weather.com, se tomaron datos de: presión, temperatura, humedad, índice ultra violeta, índice de la calidad del aire (Tablas 3.1 y 3.2) cada media hora. Además, se tomaron datos de la densidad de los principales contaminantes (Tabla 3.2) y se realizaron sus respectivas gráficas con el fin de observar la evolución temporal de estos durante el día (Figuras 3.11, 3.12, 3.13, 3.14, 3.15 y 3.16). Estos datos pueden llegar a ser útiles para determinar algunos parámetros físicos, como por ejemplo, el espesor óptico de Rayleigh (τ_R).

Hora	Temperatura °C	Presion (mbar)	Humedad	Índice UV
6:00 am	8	1014,9	95 %	0 de 10
6:30 am	8	1014,9	93 %	0 de 10
7:00 am	9	1015,2	92 %	0 de 10
7:30 am	11	1014,9	86 %	1 de 10
8:00 am	12	1014,9	82 %	2 de 10
8:30 am	14	1014,6	77 %	4 de 10
9:00 am	15	1014,2	72 %	5 de 10
9:30 am	16	1013,9	66 %	7 de 10
10:00 am	17	1013,2	61 %	9 de 10
10:30 am	17	1012,9	57 %	extremo
11:00 am	18	1012,5	53 %	extremo
11:30 am	18	1011,9	50 %	extremo
12:00 m	19	1011,2	50 %	extremo

Tabla 3.1: Ejemplo de datos del índice ultra violeta y parámetros ambientales tomados para la ciudad de Pasto el 23 de diciembre del 2022 de la página weather.com

Fuente: Este trabajo

Calidad del aire							
Hora	Principales contaminantes $\mu g/m^3$						Índice de la calidad del aire
	$PM_{2,5}$	CO	NO ₂	O ₃	PM ₁₀	SO ₂	
6:00 am	5,44	110,2	1,04	28,13	7,71	1	24
6:30 am	5,44	110,2	1,04	28,13	7,71	1	24
7:00 am	5,57	111,47	1,12	26,73	7,89	1	24
7:30 am	5,57	111,47	1,12	26,73	7,89	1	24
8:00 am	5,76	107,69	1	31,08	8,17	1	23
8:30 am	5,76	107,94	1	31,15	8,17	1	23
9:00 am	5,86	104,69	1	34,77	8,3	1	24
9:30 am	5,86	104,94	1	34,85	8,3	1	24
10:00 am	5,96	102,44	1	37,5	8,48	1	24
10:30 am	5,96	102,44	1	37,5	8,48	1	24
11:00 am	6,16	100	1	39,41	8,79	1	24
11:30 am	6,16	100	1	39,41	8,79	1	24
12:00 m	6,18	100	1	40,89	8,84	1	24

Tabla 3.2: Ejemplo de datos del índice de la Calidad del aire y densidad de los principales contaminantes tomados para la ciudad de Pasto el 23 de diciembre del 2022 de la página weather.com

Fuente: Este trabajo

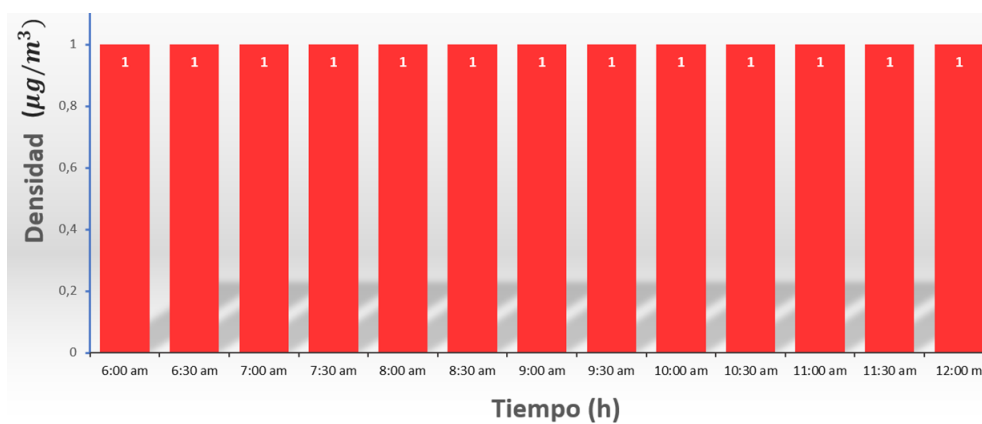


Figura 3.11: Ejemplo de evolución temporal del SO_2 en Pasto el 23 de diciembre 2022

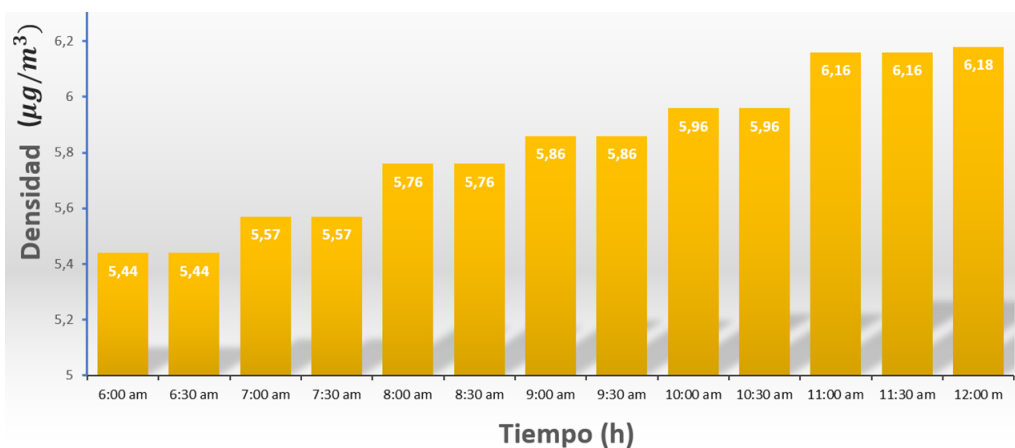


Figura 3.12: Ejemplo de evolución temporal del $\text{PM}_{2,5}$ en Pasto el 23 de diciembre 2022

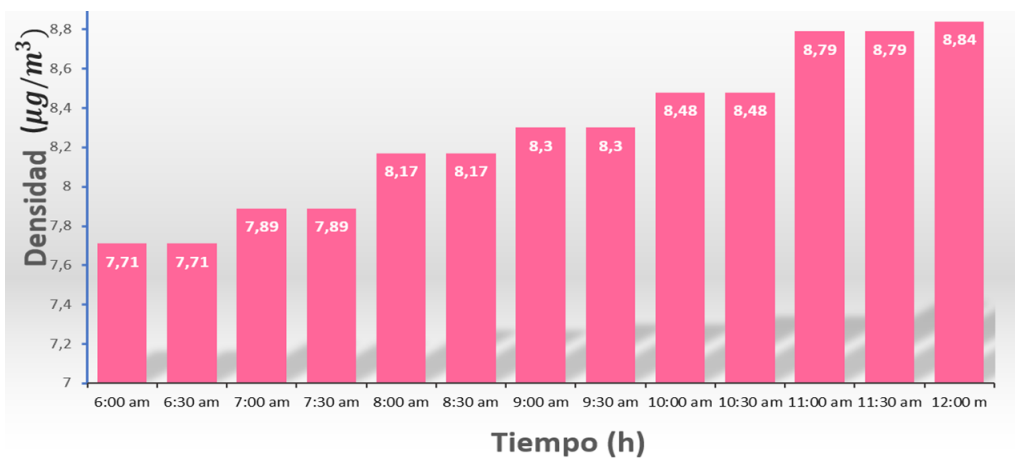


Figura 3.13: Ejemplo de evolución temporal PM_{10} en Pasto el 23 de diciembre 2022

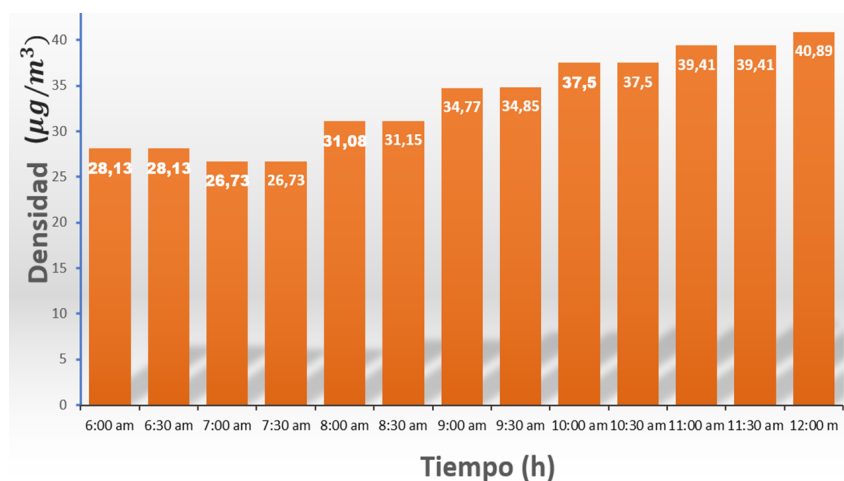


Figura 3.14: Ejemplo de evolución temporal del O_3 en Pasto el 23 de diciembre 2022

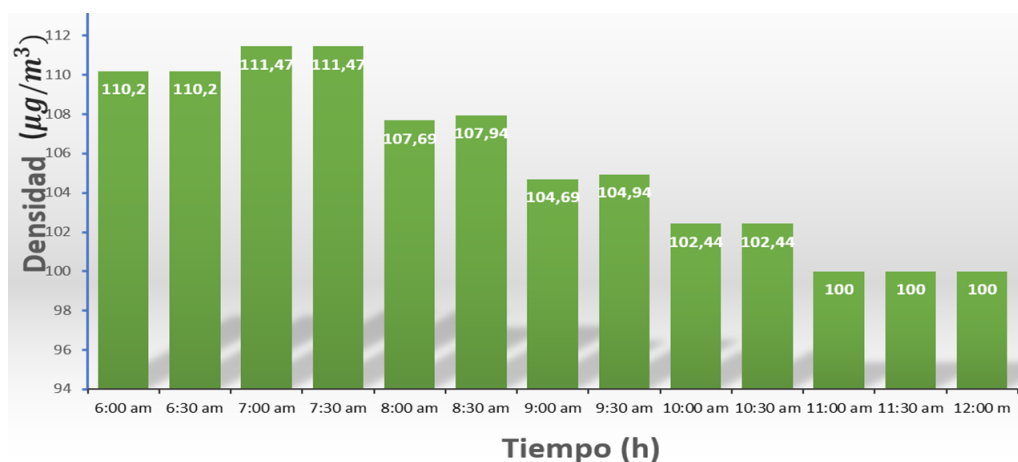


Figura 3.15: Ejemplo de evolución temporal del CO en Pasto el 23 de diciembre 2022

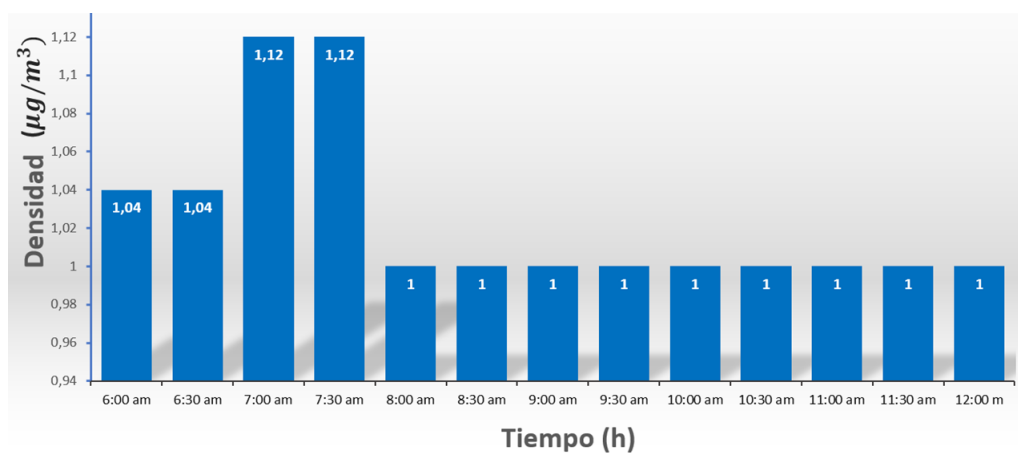


Figura 3.16: Ejemplo de evolución temporal NO_2 en Pasto el 23 de diciembre 2022

Capítulo 4

Resultados y Análisis

De los datos recopilados durante este trabajo experimental, se obtuvieron los siguientes resultados junto con su correspondiente análisis:

4.1. Picos de Absorción:

Con los datos obtenidos en la toma de mediciones, se graficaron, distintos días con el fin de observar los picos de absorción sobresalientes. En general, durante la experiencia, se obtuvieron gráficas similares a las mostradas en las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4, solamente con algunos cambios en las amplitudes de intensidad.

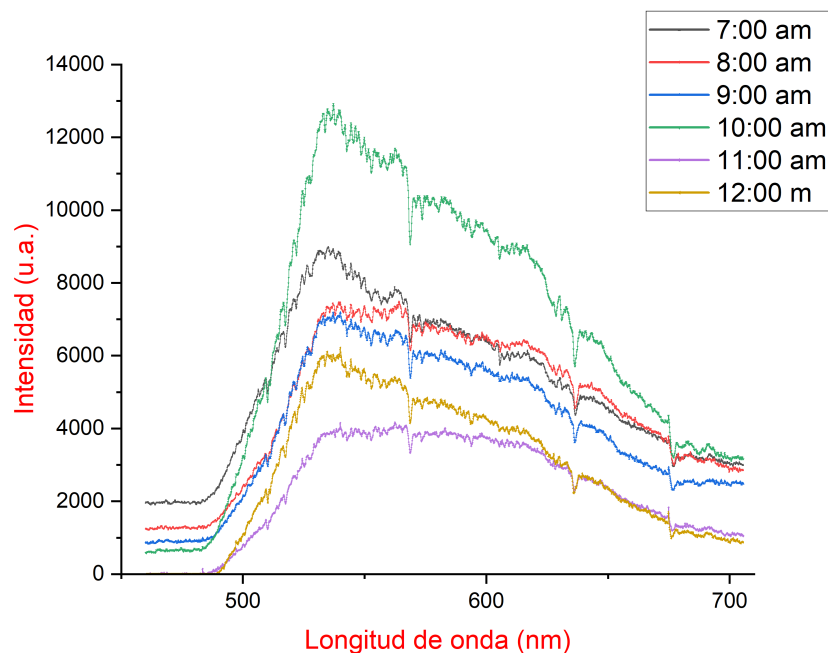


Figura 4.1: Espectros tomados el 28 de diciembre del 2022. Zona: Volcán
Fuente: Este trabajo.

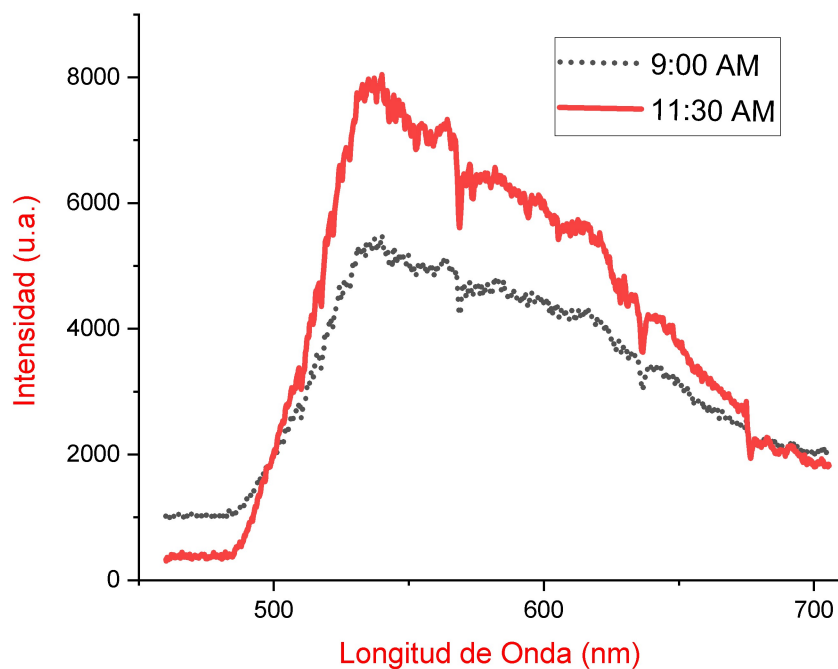


Figura 4.2: Espectros de las 9:00 AM y 11:30 AM, tomados el 20 de diciembre del 2022. Zona: Volcán
Fuente: Este trabajo.

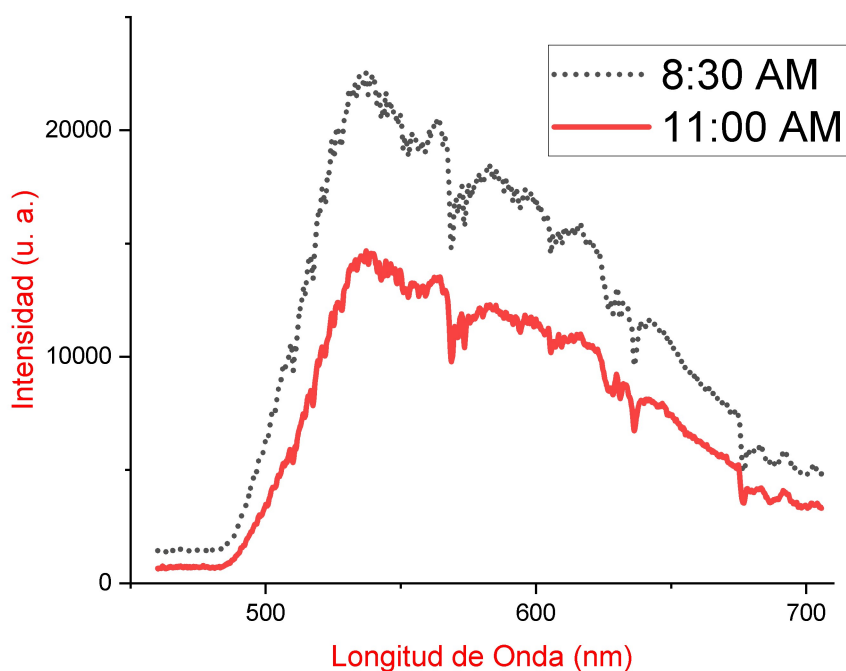


Figura 4.3: Espectros de las 8:300 AM y 11:00 AM, tomados el 12 de diciembre del 2022. Zona: Oriente.
Fuente: Este trabajo.

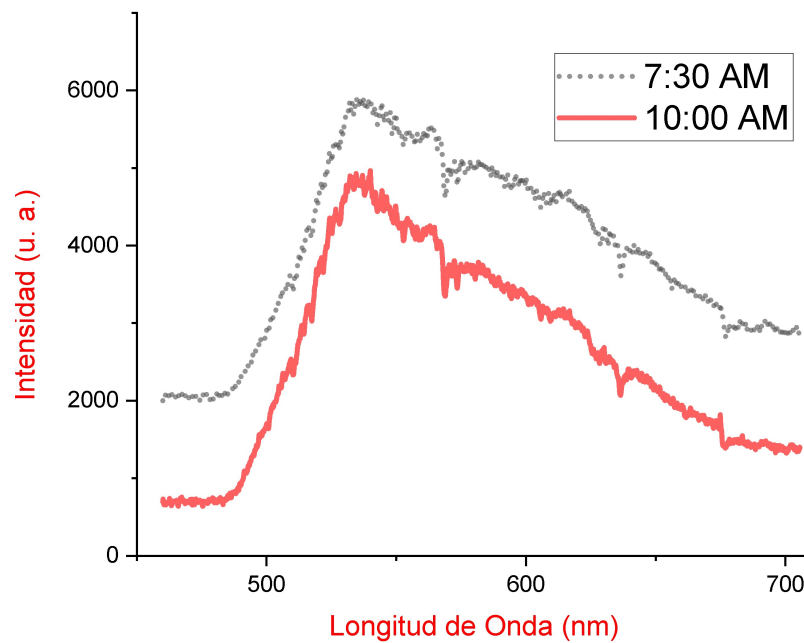


Figura 4.4: Espectros de las 7:30 AM y 10:00 AM, tomados el 4 de diciembre del 2022. Zona: Sur.
Fuente: Este trabajo.

Los datos dados por el espectrómetro van desde los 460 nm hasta los 705,64 nm, es decir, se estudió gran parte del visible del espectro electromagnético, además, los valores de intensidad dados por el espectrómetro tienen unidades arbitrarias (u. a.), que son un término utilizado en ciencia y tecnología para describir valores que no están expresados en unidades de medida estándar o convencionales, se utilizan comúnmente en situaciones en las que el objetivo principal es comparar datos dentro de un mismo conjunto de mediciones, y donde no es esencial la comparación con otros conjuntos de datos (Skoog et al., 2017).

Las gráficas de las figuras 4.1, 4.2, 4.3 y 4.4, nos muestran una clara distribución espectral de la atmósfera de la Ciudad de Pasto en diciembre del 2022, siendo esta la primera tomada por el departamento de Física de la Universidad de Nariño. Por otro lado, se observa que hay 3 picos de absorción sobresalientes, que se ubican aproximadamente en las siguientes longitudes de onda (λ): 569 nm, 636 nm y 676 nm. Se conoce que el ozono tiene absorción notoria en los 569 nm, la clorofila *b* tiene absorción en los 636 nm y la clorofila *a* tiene absorción en los 676 nm (Evert y Eichhorn, 2013; Sokolik, 2009; D. Pérez, 2007; Ortenberg, 2013). Cabe aclarar que el Nitrato (NO_3), que es un contaminante que tiene un máximo de absorción en la parte del rojo del espectro (600-700 nm), no es considerado, ya que las mediciones fueron tomadas durante la mañana, y el nitrato al llegar la luz del día, se rompe por fotólisis produciendo principalmente NO_2 y O (Uherek, 2004).

De los contaminantes de la atmósfera más comunes que absorben dentro del rango 460 a 700 nm como: Dióxido de nitrógeno (NO_2), (NO_3), ozono O_3 , Material particulado (PM), Dióxido de Azufre (SO_2) y los compuestos orgánicos volátiles (COV) (Gonzalez et al., 2013; Grossi, 2002; Patterson y McMahon, 1967; IDEAM, s.f.), sólo se tiene un pico de absorción relacionada con el Ozono, por la proporcionalidad directa de la absorbancia y la concentración (ecuación 2), se tiene que el contaminante dentro del visible con mayor concentración en la ciudad de Pasto, el cual no es solamente un contaminante antropogénico sino natural, por la ubicación geográfica de la ciudad de Pasto es el Ozono.

4.2. Ajuste de los espectros

Al graficar en Origin los espectros obtenidos durante las mediciones de este trabajo, se identificó que estos se ajustan a la distribución de valores extremos (Anexo C), además, se notó que es necesario fijar los valores de y_0 y A , para realizar un ajuste adecuado.

La ecuación de la distribución de valores extremos es:

$$y = y_0 + A \exp \left(-e^{-\frac{x-x_c}{W}} - \frac{x-x_c}{W} + 1 \right) \quad (4.1)$$

En este caso se tendría que: y es la Intensidad, x la longitud de Onda, y_0 es el valor mínimo de intensidad ($y_0 = I_{min}$), I_{max} valor máximo de intensidad (I_{max}), A la amplitud, W la escala de la distribución y x_c el centro.

A continuación se presentan los casos identificados a partir de los datos de este trabajo para determinar el valor del parámetro A :

I CASO: si $1000 < I_{max} < 10000$

- Si el segundo número (de izquierda a derecha) es menor a 5, se aproxima el número al siguiente múltiplo de mil. Por ejemplo: de 5400 a 6000 de 2300 a 3000. Al número aproximado se le suma 1000 y se le resta y_0 . Entonces:

$$A = \text{valor de Intensidad aproximado} + 1000 - y_0 \quad (4.2)$$

- Si el segundo número (de izquierda a derecha) es mayor o igual a 5, se aproxima el número al siguiente múltiplo de mil y se le resta y_0 . Entonces:

$$A = \text{valor de Intensidad aproximado} - y_0 \quad (4.3)$$

II CASO: si $10000 < I_{max} \leq 30000$

- Si el segundo número (de izquierda a derecha) es menor a 5, se aproxima el número al siguiente múltiplo de mil y se utiliza la siguiente relación:

$$A = \text{valor de Intensidad aproximado} + (n \times 1000) - y_0 \quad (4.4)$$

- Si el segundo número (de izquierda a derecha) es mayor o igual a 5, se aproxima el número al siguiente múltiplo de mil y se utiliza la siguiente relación:

$$A = \text{valor de Intensidad aproximado} + 1000 + (n \times 1000) - y_0 \quad (4.5)$$

Siendo $n=2$ o 3 , dependerá de cuál es su siguiente múltiplo de 10000, en este caso si es 20000 $n=2$ o si es 30000 $n=3$.

III CASO: si $30000 < I_{max} \leq 50000$

Se aproxima el número al siguiente múltiplo de mil. Se utiliza la siguiente relación:

$$A = \text{valor de Intensidad aproximado} + 10000 - y_0 \quad (4.6)$$

IV CASO: si $50000 < I_{max} < 70000$

- a. Si el segundo número (de izquierda a derecha) es menor a 5 se aproxima el número al siguiente múltiplo de 10000, se le suma 10000 y se le resta y_0 . Entonces:

$$A = \text{valor de Intensidad aproximado} + 10000 - y_0 \quad (4.7)$$

- b. Si el segundo número (de izquierda a derecha) es mayor o igual a 5, se aproxima el número al siguiente múltiplo de 10000. Por ejemplo: de 56000 a 60000. Al número aproximado se le suma 20000 y se le resta y_0 . Entonces:

$$A = \text{valor de Intensidad aproximado} + 20000 - y_0 \quad (4.8)$$

Por ejemplo en la figura 4.5, en el espectro su valor mínimo de intensidad es: 756, su valor máximo de intensidad es 65535, se usa entonces el caso IV b, como el segundo dígito de izquierda a derecha es 5, se lo aproxima el número al siguiente múltiplo de 10 mil, se le suma 20000 y se le resta y_0 .

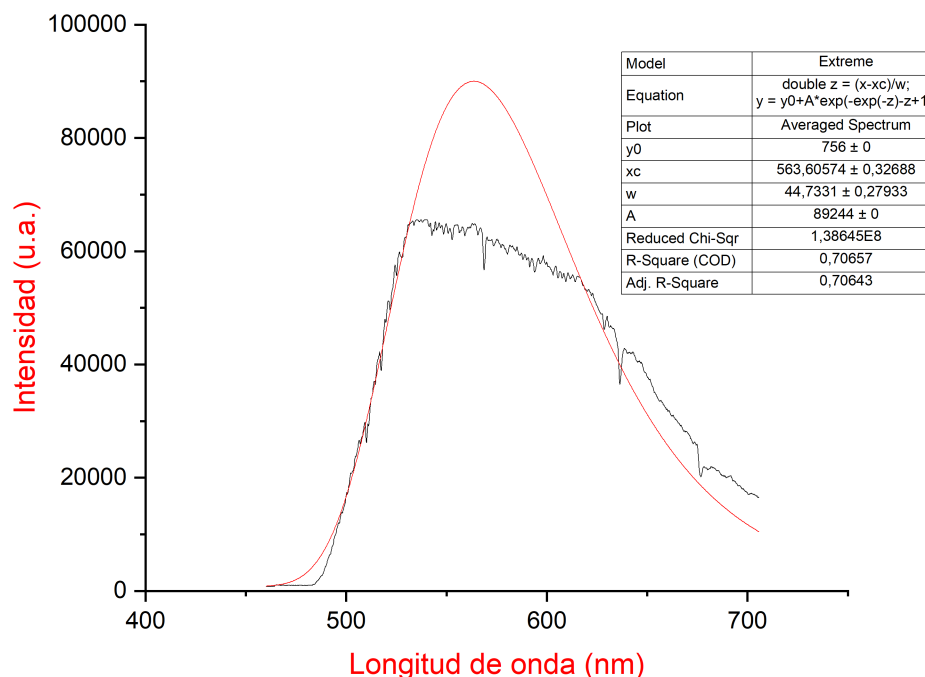


Figura 4.5: Espectro de la zona sol, tomado a las 9:30 AM el 28 de diciembre del 2022, ajustado con la distribución de valores extremos.

Fuente: Este trabajo.

En la figura 4.6 observamos un espectro ajustado con la distribución de valores extremos cuando consideramos el caso II a.

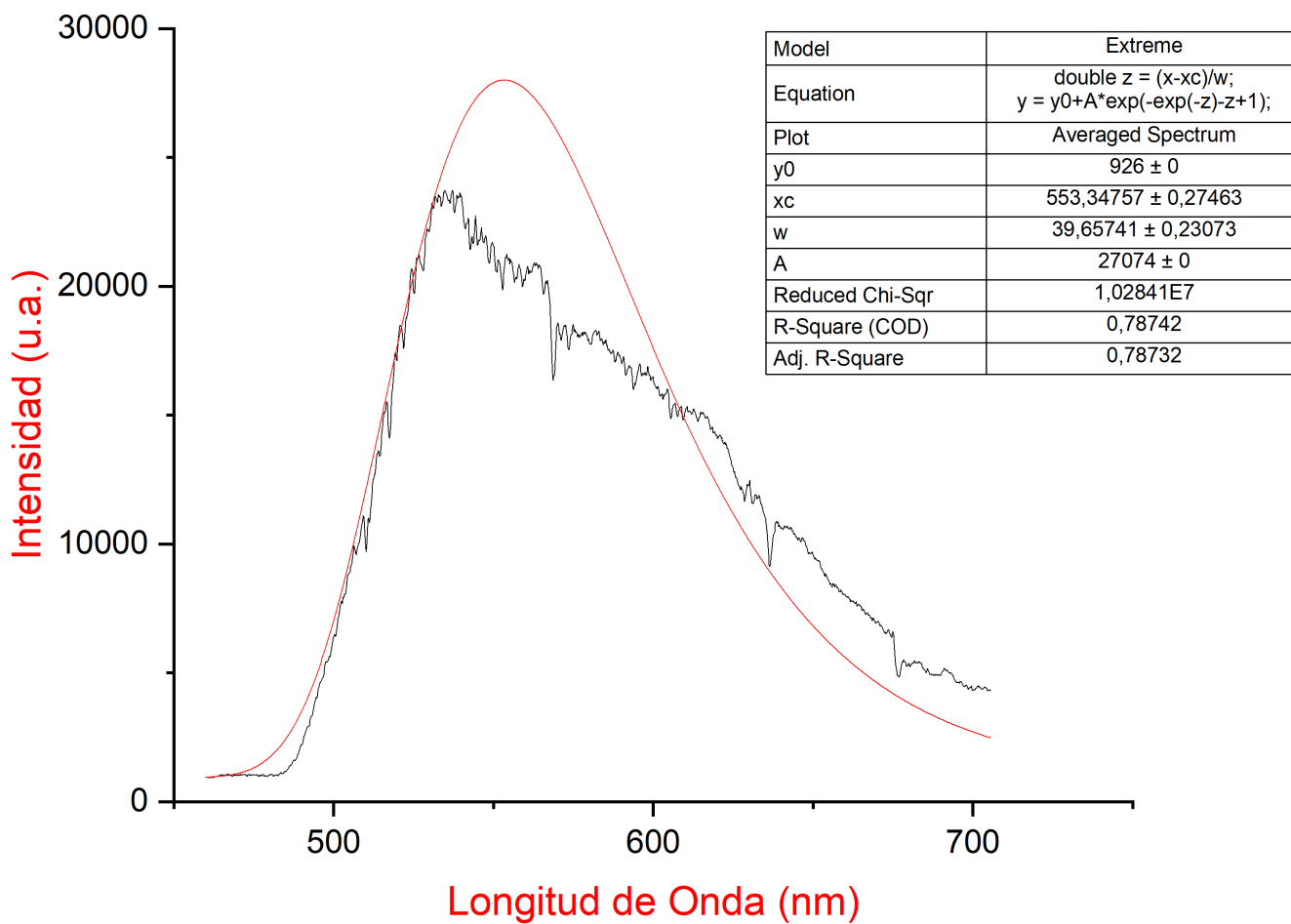


Figura 4.6: Espectro de la zona Sur, tomado a las 8:30 AM el 28 de diciembre del 2022, ajustado con la distribución de valores extremos.

Fuente: Este trabajo.

4.3. Cálculo de FWHM

Como se observa en los espectros obtenidos durante la experiencia (fig: 4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6), se presentan diferentes valores de amplitud en la Intensidad. Estos valores no nos sirven para hacer una comparación entre espectros, por ejemplo, si se quiere calcular y comparar el valor de FWHM (Anexo A) para dos picos de absorción del Ozono; sin embargo, si se normalizan los espectros, se podrían realizar comparaciones.

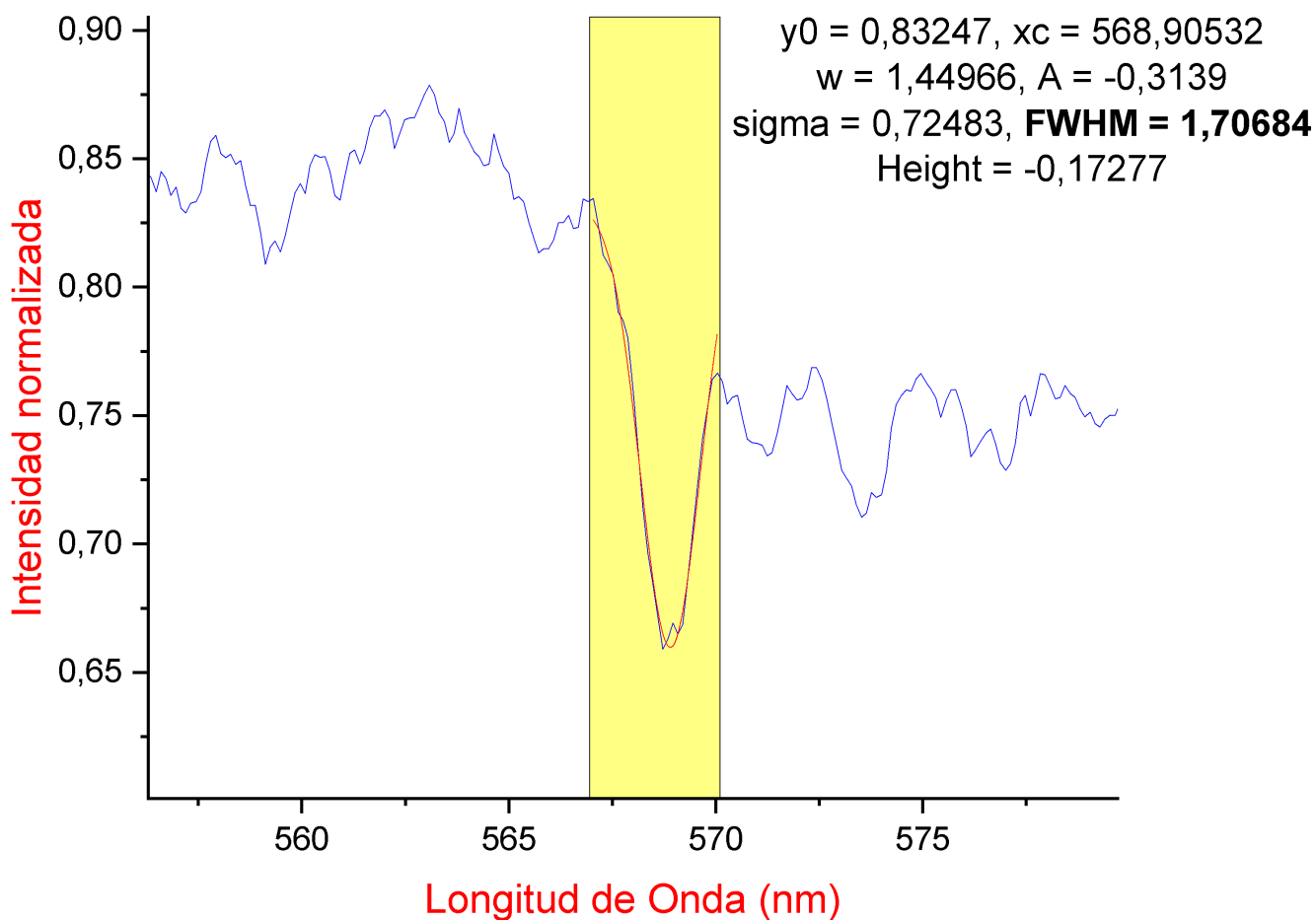


Figura 4.7: Acercamiento del pico de absorción del ozono en el espectro de la zona Oriente, tomado a las 8:00 AM el 30 de diciembre del 2022 y medida del FWHM con el programa Origin.

Fuente: Este trabajo.

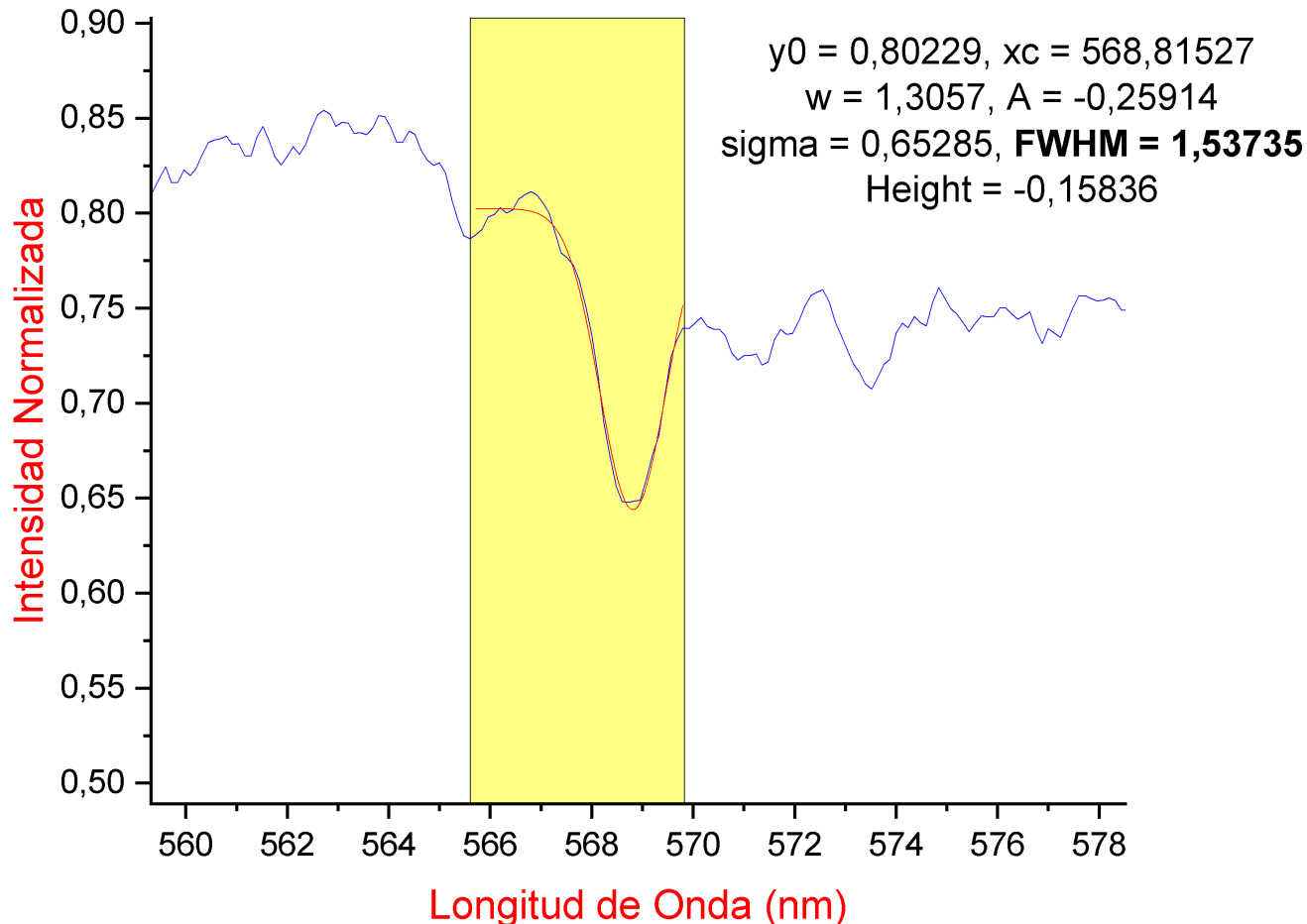


Figura 4.8: Acercamiento del pico de absorción del ozono en el espectro de la zona Oriente, tomado a las 10:30 AM el 30 de diciembre del 2022 y medida del FWHM con el programa Origin.

Fuente: Este trabajo.

Como se nota en las gráficas 4.7 y 4.8, se obtuvieron distintos valores de FWHM para distintas horas.

Que los valores de FWHM sean significativamente parecidos en diferentes momentos, significaría que el espectrómetro ha mantenido una resolución espectral consistente durante el periodo de tiempo tomado, sin embargo, esta resolución espectral puede verse afectada por factores ambientales.

Se realizó el proceso ya mencionado y se obtuvieron los siguientes valores de FWHM del pico de absorción del Ozono en distintas horas el 30 de diciembre del 2022, zona: Oriente.

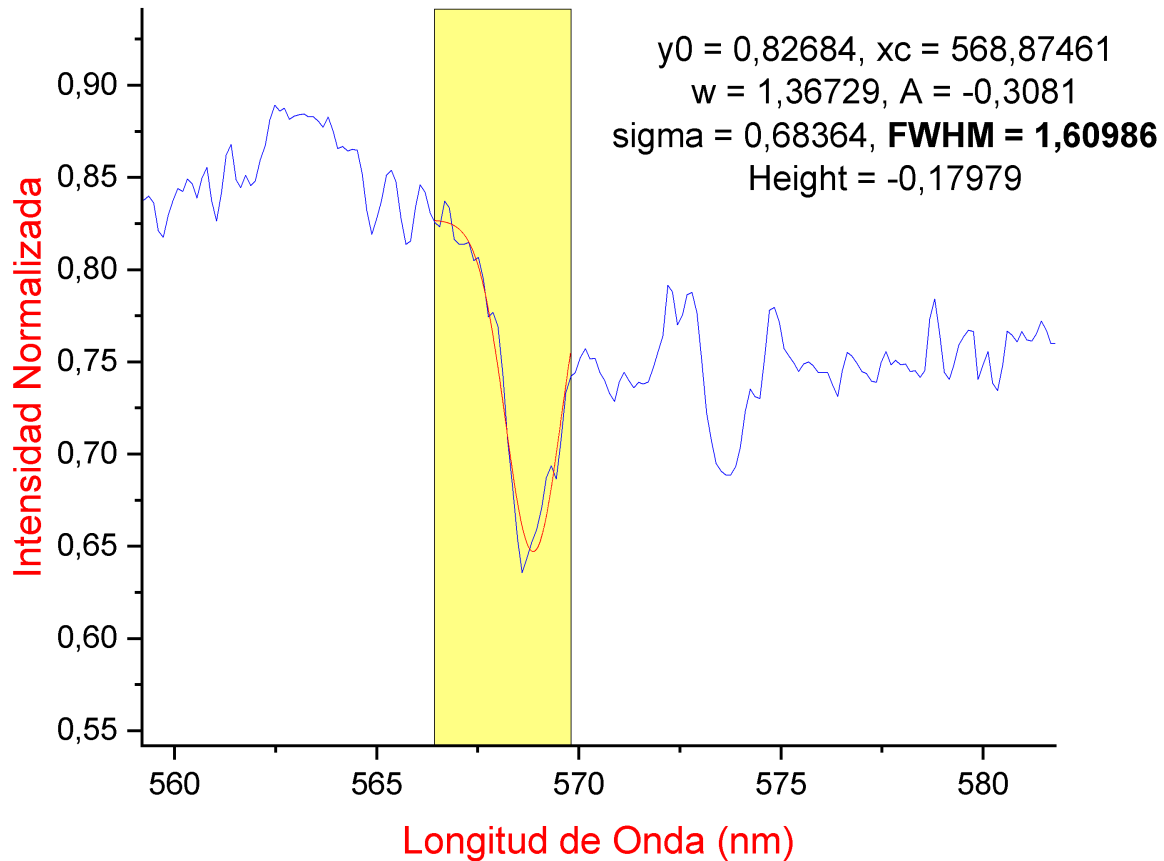


Figura 4.9: Acercamiento del pico de absorción del ozono en el espectro de la zona Oriente, tomado a las 9:00 am el 30 de diciembre del 2022 y medida del FWHM con el programa Origin.

Fuente: Este trabajo.



Figura 4.10: fotografía de la zona oriente al tomar la medida el 30 de diciembre del 2022 a las 9:00 am.

Fuente: Este trabajo.

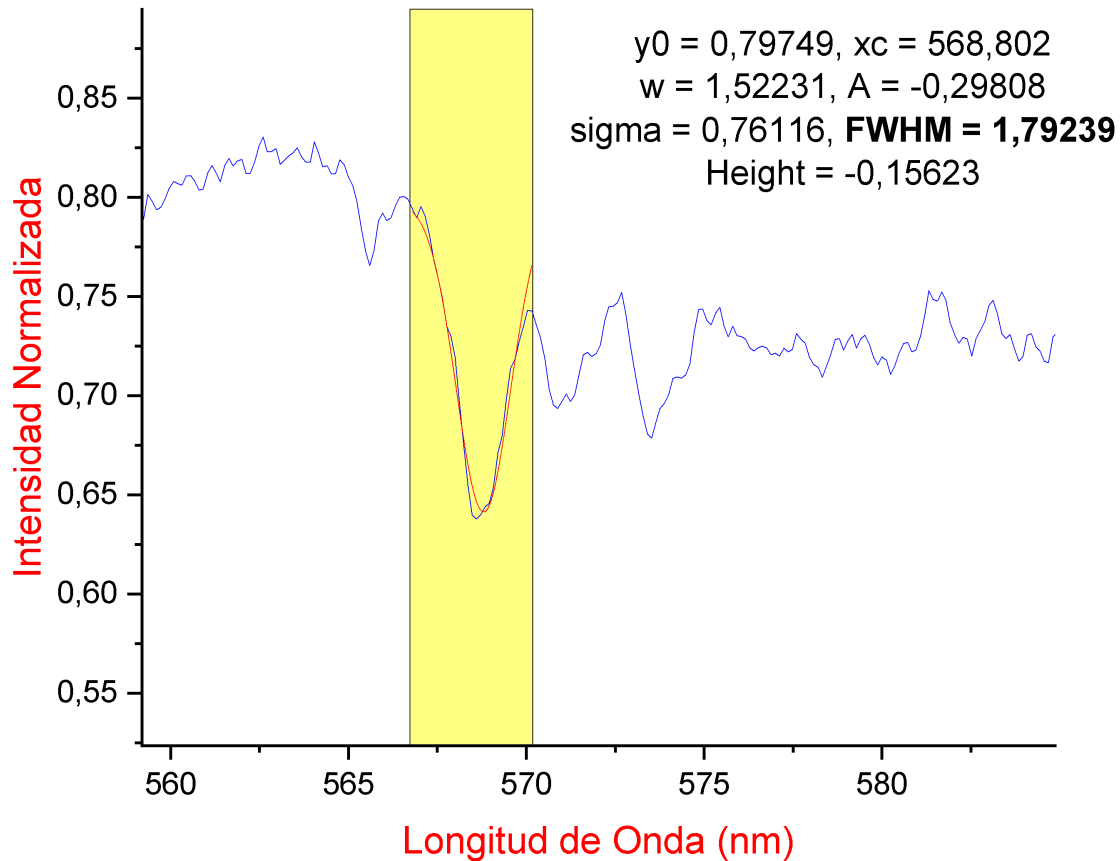


Figura 4.11: Acercamiento del pico de absorción del ozono en el espectro de la zona Oriente, tomado a las 10:00 am el 30 de diciembre del 2022 y medida del FWHM con el programa Origin.
Fuente: Este trabajo.



Figura 4.12: fotografía de la zona oriente al tomar la medida el 30 de diciembre del 2022 a las 10:00 am.

Fuente: Este trabajo.

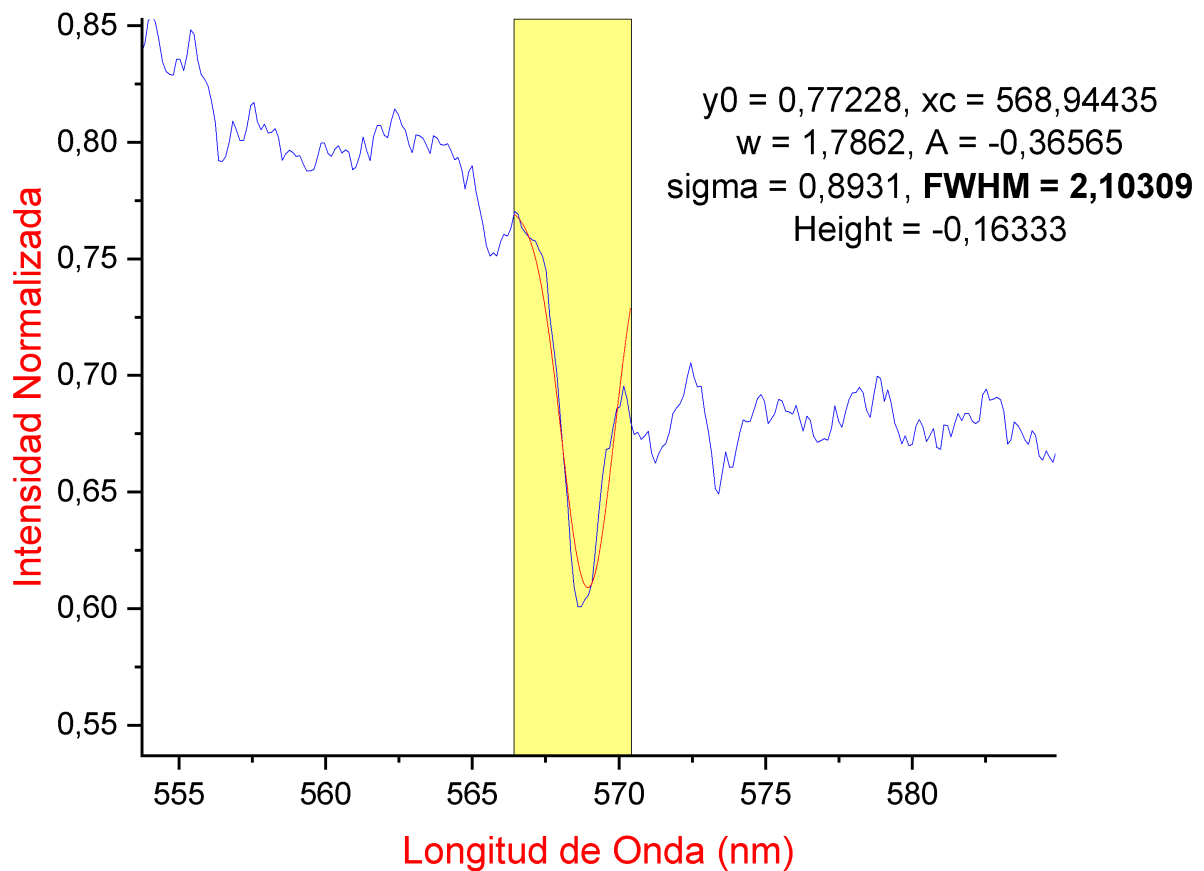


Figura 4.13: Acercamiento del pico de absorción del ozono en el espectro de la zona Oriente, tomado a las 11:00 am el 30 de diciembre del 2022 y medida del FWHM con el programa Origin.

Fuente: Este trabajo.



Figura 4.14: fotografía de la zona oriente al tomar la medida el 30 de diciembre del 2022 a las 11:00 am.

Fuente: Este trabajo.

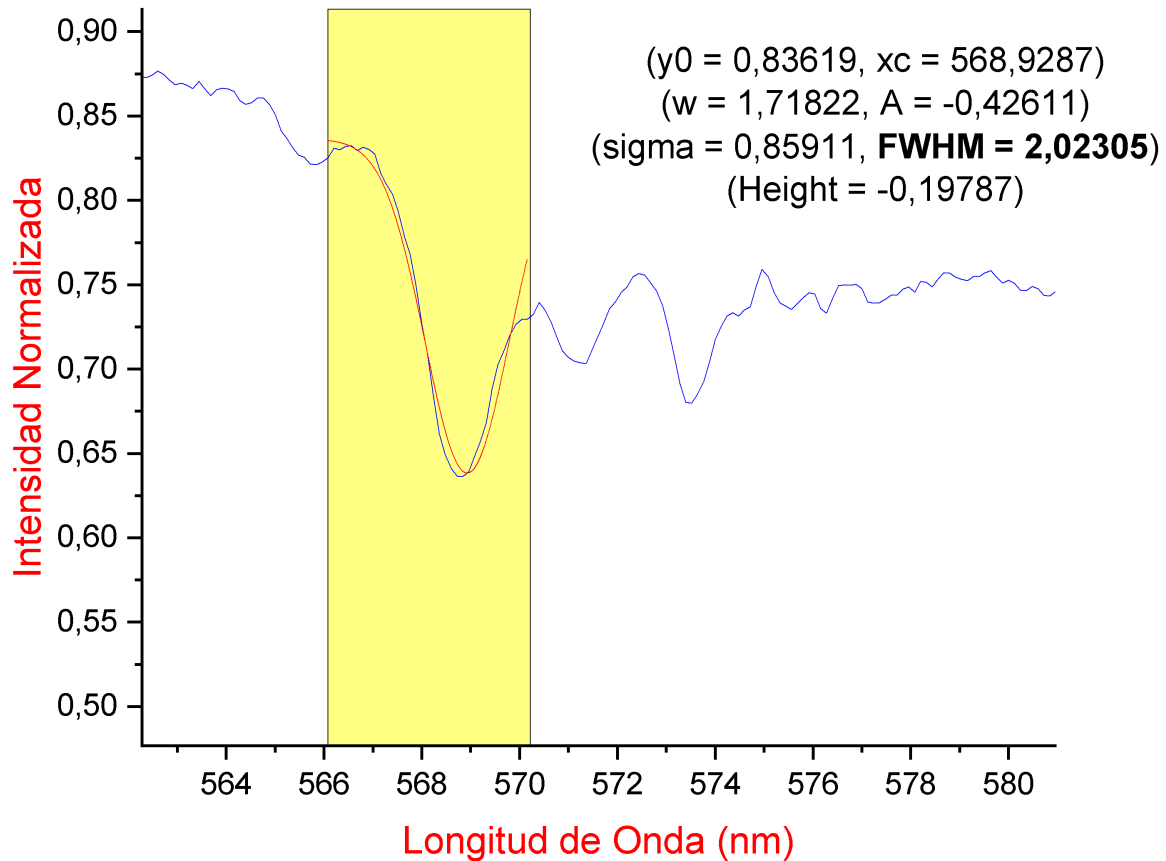


Figura 4.15: Acercamiento del pico de absorción del ozono en el espectro de la zona Oriente, tomado a las 12 m el 30 de diciembre del 2022 y medida del FWHM con el programa Origin.

Fuente: Este trabajo.



Figura 4.16: fotografía de la zona oriente al tomar la medida el 30 de diciembre del 2022 a las 12:00 m.

Fuente: Este trabajo.

Los valores de FWHM, se sintetizan en la siguiente tabla:

Hora	FWHM
8:00 am	1,70684
9:00 am	1,60986
10:00 am	1,79239
11:00 am	2,10309
12:00 m	2,02305

Tabla 4.1: Valores de FWHM del pico del Ozono el 30 de diciembre del 2022, zona Oriente y en diferentes horas.

Con los datos de la tabla 4.1 se calcula el valor de desviación estándar igual 0,1873.

El día 30 de diciembre, en la zona Oriente, se obtuvo que estos valores tuvieron una desviación estándar de 0,1873, es decir, es notorio el cambio de resolución espectral, lo cual tiene sentido, al observar las figuras 4.10, 4.12, 4.14 y 4.16, notamos que donde se obtuvieron los valores de FWHM superiores a 1,78 hay un cambio en el ambiente (gran presencia de nubes), lo que genera el cambio de resolución espectral.

4.4. Cálculo de Espesor τ_R

Se puede calcular fácilmente el espesor τ_R (sección 2.2.4), ya que según las ecuaciones 2.8, 2.9, 2.10 y 2.11, sólo es necesario tener los valores de presión del lugar donde fueron tomadas las mediciones, en este caso, se calcula para el día 28 de diciembre, dónde la presión fue de 1015,3 hPa, en el rango de 450 nm - 710 nm, que es aproximadamente el rango en el que mide el espectrómetro utilizado en la experiencia.

Se realizaron los cálculos de este espesor con las formulaciones empíricas de Moller (ecuación 2.8), Hansen y Travis (ecuación 2.9), Leckner (ecuación 2.10) y Lowtran-5 (ecuación 2.11), y con ello sus respectivas gráficas (figura 4.17).

La figura 4.17, muestra el cálculo del espesor óptico de Rayleigh mediante diversas aproximaciones experimentales. Se puede observar que las aproximaciones experimentales de Hansen y Travis producen resultados muy similares a la aproximación empírica de LOWTRAN 5, mientras que las aproximaciones de Moller y Leckner se desvían más de los valores teóricos. LOWTRAN 5 es un modelo computacional utilizado para calcular la transferencia de radiación a través de la atmósfera terrestre y su aproximación es una de los más actualizadas, por lo tanto, se recomienda utilizar esta aproximación para calcular el espesor óptico de Rayleigh en situaciones donde se requiere una alta precisión.

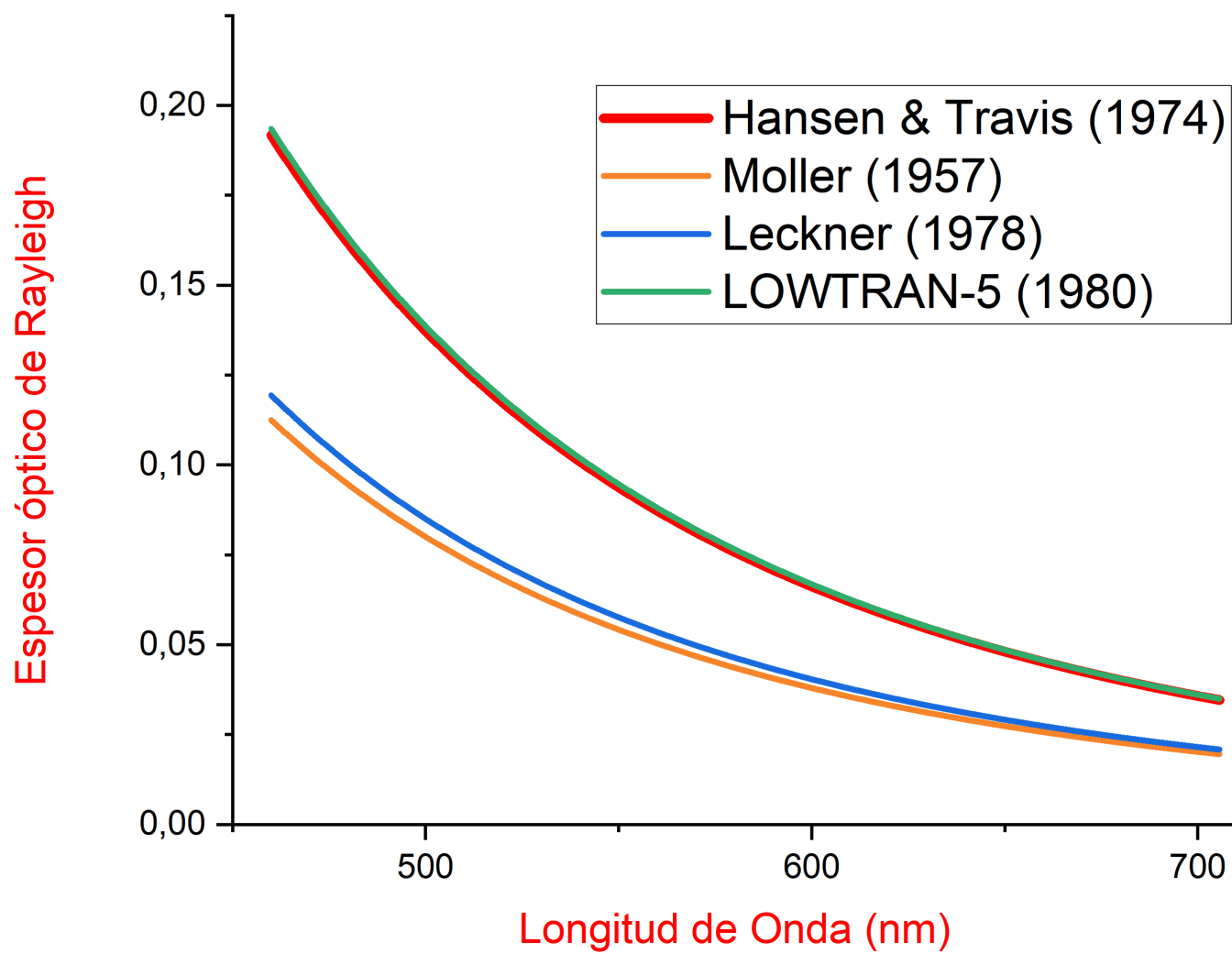


Figura 4.17: Gráficas del espesor τ_R en función de λ , para el día 28 de diciembre del 2022.
Fuente: Este trabajo.

4.5. Cálculo de Espesor τ_{tot} experimental

Se calculó el espesor óptico total experimental, con los datos obtenidos el día 23 de diciembre del 2022 en la Zona Volcán, ya que fue uno de los días y zona donde se mantuvo un cielo casi despejado, en comparación a los otros días, como se puede observar en las siguientes fotos:



Figura 4.18: Fotografía tomada a las 7:00 am.
Fuente: Este trabajo.



Figura 4.19: Fotografía tomada a las 8:00 am.
Fuente: Este trabajo.



Figura 4.20: Fotografía tomada a las 9:00 am.
Fuente: Este trabajo.



Figura 4.21: Fotografía tomada a las 10:00 am.
Fuente: Este trabajo.



Figura 4.22: Fotografía tomada a las 11:00 am.
Fuente: Este trabajo.



Figura 4.23: Fotografía tomada a las 12:00 m.
Fuente: Este trabajo.

Se calculó el espesor óptico total experimental τ_{tot} para $\lambda = 569 \text{ nm}$, 636 nm y 676 nm con los siguientes pasos:

a. **Masa óptica (m)**

Primeramente se consideró que para la ciudad de Pasto la latitud es igual a $1,2136100$ (*ANTIPODAS*, s.f.) y la declinación de $-23,7$ (Bonan, 2002) en diciembre del 2022. Cabe aclarar, que los valores de latitud y declinación, no tienen incertidumbre, por lo que no se realiza propagación de errores, sino que se tiene en cuenta la propagación de cifras significativas de acuerdo a la operación matemática que se realice (Anexo D). Con lo anterior y usando la ecuación 2.4, se encontraron los valores de $\cos(\theta_z)$ y θ_z , para las 7:00 am, 8:00 am, 9:00 am, 10:00 am, 11:00 am y 12:00 m. Los valores encontrados son mostrados en la tabla 4.2 y 4.4.

Tabla 4.2: Tabla de valores de $\cos(\theta_z)$ para la ciudad de Pasto en diciembre del 2022.

$\cos(\theta_z)$ (grados)					
7:00 am	8:00 am	9:00 am	10:00 am	11:00 am	12:00 m
0,92266	0,90090	0,97440	0,88448	0,94760	0,94162

Tabla 4.3: Tabla de valores del ángulo zenital θ_z para la ciudad de Pasto en diciembre del 2022.

Ángulo zenital θ_z (grados)					
7:00 am	8:00 am	9:00 am	10:00 am	11:00 am	12:00 m
0,39589	0,44895	0,22677	0,48541	0,32515	0,34340

Adicionalmente, fue necesario cálculo del ángulo de hora solar con la siguiente ecuación (Martínez, 2009):

$$ha = [15^\circ \times (\text{hora local} - 12)] - 5 \quad (4.9)$$

Los valores de **ha** son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 4.4: Tabla de valores de la hora solar **ha**.

Ángulo de hora solar ha (grados)					
7:00 am	8:00 am	9:00 am	10:00 am	11:00 am	12:00 m
-80	-65	-50	-35	-20	-2

Finalmente, se calcularon los valores de la masa óptica de acuerdo a la ecuación 2.3 y teniendo en cuenta la propagación de cifras significativas. Los valores calculados de m están consignados en la tabla 4.5.

Tabla 4.5: Tabla de valores de la masa óptica para la ciudad de Pasto en diciembre del 2022.

masa óptica (m)					
7:00 am	8:00 am	9:00 am	10:00 am	11:00 am	12:00 m
1,0833	1,1095	1,0258	1,1300	1,0548	1,0615

b. Cálculo de $\ln(I)$

Teniendo en cuenta la propagación de cifras significativas se calcula el logaritmo natural de las intensidades medidas en los 569 nm, 636 nm y 676 nm para las masas ópticas encontradas en el ítem anterior. Estos valores se observan en la siguiente tabla:

Tabla 4.6: Tabla de valores de $\ln(I)$ para diferentes longitud de onda.

Masa óptica	$\ln(I)$ a los:		
	569 nm	636 nm	676 nm
1,0833	3,622	3,555	3,456
1,1095	3,568	3,449	3,291
1,0258	3,595	3,406	3,186
1,1300	3,422	3,219	2,956
1,0548	3,571	3,359	3,113
1,0615	3,664	3,440	3,108

c. Gráficas de $\ln(I)$ en función de la masa óptica (m)

Con los datos de la tabla 4.6, se obtuvieron las gráficas 4.24, 4.25 y 4.26 de $\ln[I](m)$ en Origin, a las cuales se les realizó un ajuste lineal. En estas gráficas se observan las barras de error que representan la desviación estándar entre los valores de $\ln[I]$ y la línea de ajuste.

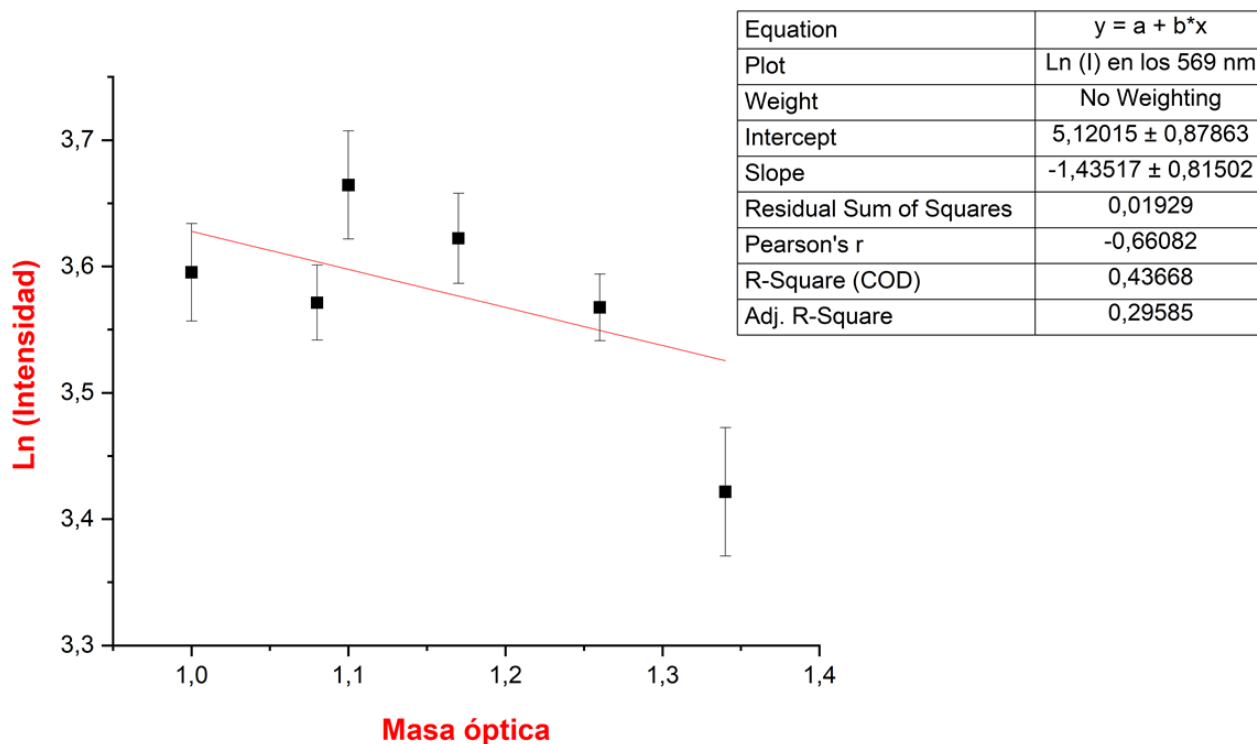


Figura 4.24: Gráfica de $\ln[I](m)$ en los 569 nm.
Fuente: Este trabajo.

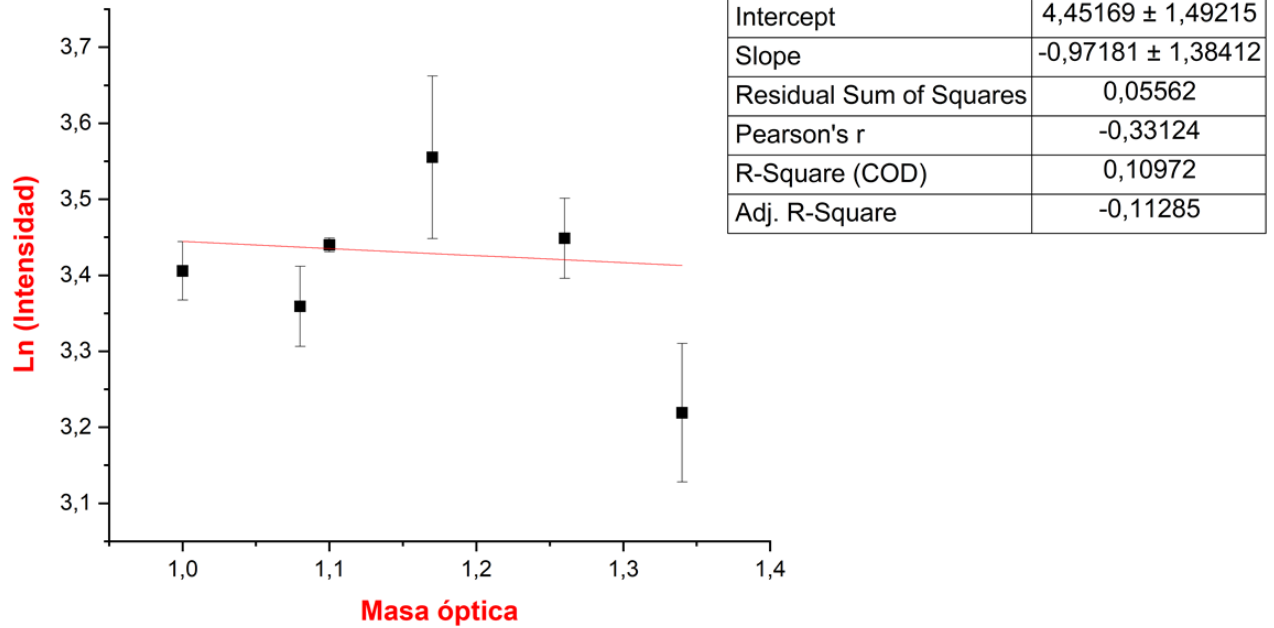


Figura 4.25: Gráfica de $\text{Ln}[I](m)$ en los 636 nm.
Fuente: Este trabajo.

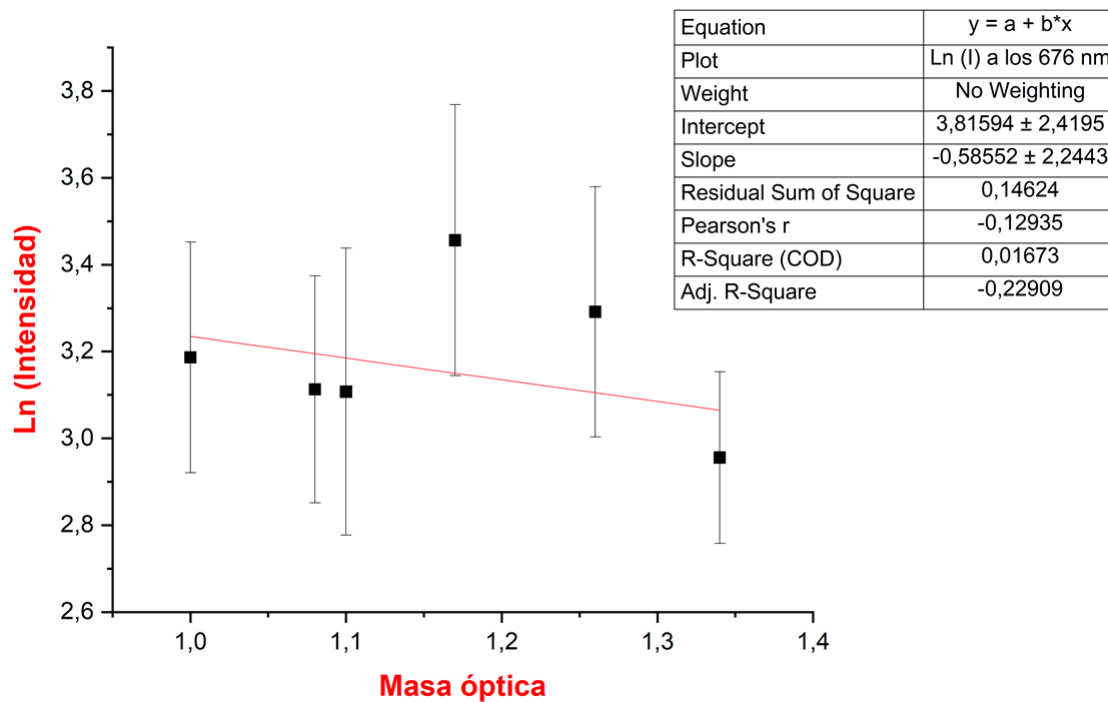


Figura 4.26: Gráfica de $\text{Ln}[I](m)$ en los 676 nm.
Fuente: Este trabajo.

Para el cálculo del espesor óptico experimental, recordamos la ecuación 2.6

$$\ln(I) = \ln\left(\frac{I_0}{R^2}\right) - m \cdot \tau_{tot},$$

en la que se nota que $\ln(I)$ es una función lineal que depende de m , donde $-\tau_{tot}$ es su pendiente y $\ln\left(\frac{I_0}{R^2}\right)$ su intercepto con el eje y .

Se obtiene el valor de τ_{tot} para las longitudes de onda 569 nm, 636 nm y 676 nm, tomando el valor de la pendiente de las gráficas 4.24, 4.25 y 4.26, respectivamente. Entonces:

$$\lambda = 569 \text{ nm} \rightarrow \tau_{tot} = -1,44 \pm 0,82 \quad (4.10)$$

$$\lambda = 636 \text{ nm} \rightarrow \tau_{tot} = -1,0 \pm 1,4 \quad (4.11)$$

$$\lambda = 676 \text{ nm} \rightarrow \tau_{tot} = -0,6 \pm 2,2 \quad (4.12)$$

Los valores de τ_{tot} obtenidos en esta experiencia no tienen validez, ya que en las gráficas de las figuras 4.24, 4.25 y 4.26 se nota que los valores se desvían significativamente de la línea de ajuste, además dos de los valores de τ_{tot} obtenidos (ecuaciones 4.11 y 4.12) presentan incertidumbres mayores que el valor central.

A pesar de que se llevaron a cabo los cálculos en un día soleado, como se recomienda, las nubes estuvieron presentes en la zona, aunque en menor cantidad que en otros días. Estas condiciones ambientales son posiblemente una causa de que se obtuvieran resultados de τ_{tot} sin validez.

El cálculo de τ_{tot} por el método visto en este trabajo puede ser largo y dispendioso debido a que se debe calcular a partir del ajuste lineal de una gráfica para cada longitud de onda. Se puede optimizar este cálculo ideando métodos computacionales para obtener este espesor.

Capítulo 5

Conclusiones

Con el desarrollo de este trabajo se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Es posible obtener datos espectrales através de un sistema de sensado remoto pasivo compuesto principalmente por 3 elementos: un telescopio, un espectrómetro y un computador sencillo. Este sistema recopila de manera exitosa datos en el espectro electromagnético (dependiendo del rango de longitud de onda del espectrometro) y con su aplicación se obtuvo la distribución espectral de la ciudad de Pasto para el mes de diciembre de 2022.
- Las distribuciones espectrales de la ciudad de Pasto obtenidas durante la experiencia se ajustan a la distribución de valores extremos con dos parámetros fijos.
- En las distribuciones espectrales de la ciudad de Pasto se observan picos de absorción sobresalientes relacionados con el ozono (≈ 569 nm), clorofila *b* (≈ 636 nm) y clorofila *a* (≈ 676 nm).
- El ozono es el contaminante con mayor concentración en la ciudad (que absorbe en el visible), el cual es muy perjudicial para la vida humana y vegetal, al ser un contaminante natural los organismos de control ambiental en la ciudad deben trabajar en este problema.
- Con los datos tomados en la experiencia es posible obtener valores de τ_{tot} para distintos valores de longitudes de onda, medidas de FWHM del pico de absorción del ozono después de normalizar los espectros y gráficas de τ_R .

Capítulo 6

Perspectivas

Al estar este trabajo de grado sujeto a fechas de entrega, no fue posible:

- Aprender nuevos conocimientos de métodos y herramientas computacionales para ser aplicados en el cálculo τ_A y τ_{Oz} .
- Analizar más mediciones de FWHM del pico de absorción, en diferentes horas, días y climas, este análisis podría llevar a algunas relaciones interesantes como por ejemplo: con el pasar de las horas como crece o decrece el valor de FWHM y qué significaría esto.
- Ajustar la mayor parte de los espectros obtenidos durante este trabajo de grado con la distribución de valores extremos, esto permitirá identificar tendencias y patrones característicos en la atmósfera de la ciudad Pasto.
- Determinar cómo y bajo qué criterios los espectros obtenidos se ajustan con la curva de la Radiación del Cuerpo Negro, la cual es punto de referencia para comparar cómo se comporta la radiación emitida por la atmósfera, respecto a un cuerpo negro ideal.
- Establecer de qué manera y según qué parámetros los ajustes efectuados mediante la distribución de valores extremos se correlacionan con la curva de la Radiación del Cuerpo Negro.
- Realizar las gráficas de absorbancia (ec. 1) ya que es necesario disponer de los valores de I_0 que equivaldría a la Irradiancia Extraterrestre que comparta las dimensiones de los valores de Irradiancia tomadas en este trabajo.

Por lo anterior, se presentan las siguientes perspectivas para futuras investigaciones y acciones prácticas basadas en los resultados y conclusiones obtenidos en esta investigación:

1. Hacer uso de un espectrómetro que tenga un rango de longitud de onda más amplia, hacia el infrarrojo y el ultravioleta, con el fin de observar la absorción de todo tipo de contaminantes en el espectro.
2. Realizar mediciones en la tarde y noche, ya que es posible que algunos contaminantes muestren su absorción en estos horarios.

3. Continuar aprendiendo las técnicas de sensado remoto para fortalecer el programa de Física de la Universidad de Nariño, y así formar futuros profesionales interesados en este campo de estudio.
4. Desarrollar algoritmos y aprender sobre herramientas computacionales que involucren y faciliten mediciones remotas y que permitan inferir a partir de los datos realizados en este trabajo (o con datos tomados a futuro con el montaje experimental mostrado en este trabajo) propiedades físicas de la atmósfera local.
5. Lograr que el producto de este trabajo de grado y derivados se integren a las principales redes mundiales de monitoreo atmosférico.
6. Fortalecer las relaciones entre el Departamento de Física de la Universidad y la Escuela de Física de la Universidad Nacional, para que los estudiantes de pregrado y posgrado interesados en esta línea de investigación, tengan la oportunidad de realizar intercambios educativos.

Referencias

- Acuerdo 2254. (2017). Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible. Recuperado de <https://acortar.link/mEUuln>
- Alcántara, A. (2013). *Carectización de las propiedades radiativas y microfísicas del aerosol atmosférico en la campaña veleta 2002* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad de Granada.
- Antipodas. (s.f.). <https://www.antipodas.net/coordenadaspais/colombia/pasto.php>. (Accedido el 5 de junio de 2023)
- Benavides, H., Sepúlveda, U., y Ayala, L. (2019). *El Ozono*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM.
- Bonan, G. (2002). *Ecological climatology: Concepts and applications*. Cambridge University Press. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=QZYCLMFckgC>
- Evert, R., y Eichhorn, S. (2013). *Raven Biology of Plants 8th edn*.
- General Solar Position Calculations. (s.f.). NOAA Global Monitoring Division. Recuperado de <https://gml.noaa.gov/grad/solcalc/solareqns.PDF>
- Gonzalez, A., Hossein, A., Bak, J., Chance, K., Flynn, L., Krotkov, N., ... Wang, H. (2013). Five decades observing earth's atmospheric trace gases using ultraviolet and visible backscatter solar radiation from space. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 238, 8-15. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2019.04.030>
- Grossi, H. (2002). *Notes on solar radiation (en español)*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/311375862_Notes_on_Solar_Radiation_en_espanol
- Guapacha, A. (2016). *Calibracion del espectrógrafo LHIRES III del Observatorio Astronomico de la Universidad Tecnológica de Pereira*.
- Gueymard, C. (1995). *A simple model of the atmospheric radiative transfer of sunshine: algorithms and performance assessment*.
- Hansen, J., y Travis, L. (1974). Light scattering in planetary atmospheres. *Space Science Reviews*, 16, 527-610. doi: <https://doi.org/10.1007/BF00168069>
- IDEAM. (s.f.). *Atlas de radiación solar, ultravioleta y ozono de Colombia*.
- IDEAM. (2007). *Informe anual sobre el estado del medio ambiente y los recursos naturales renovables en Colombia: Calidad del aire*. Publicaciones del IDEAM.
- IDEAM. (2017). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2016*. Publicaciones del IDEAM.

- IDEAM. (2021). *Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2020*. Publicaciones del IDEAM.
- Kasten, F. (1989). Revised optical air mass tables and approximation formula. *APPLIED OPTICS*, 28, 4735-4738. doi: <http://dx.doi.org/10.1364/AO.28.004735>
- Martinez, J. (2004). *Atmósfera y Radiación. Tema XII: Absorción y Dispersión de la Radiación en la Atmósfera*. Universidad de Valencia. Recuperado de <https://www.uv.es/~jmartine/docencia/Atmosfera%20y%20Radiaci%20n/2002-03/Tema%20XII.pdf>
- Martínez, P. (2009). *Energía solar térmica: Técnicas para su aprovechamiento*. Marcombo. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=f1lc3xuVIUYC>
- Martinez-Viviente, F. (2002). *Estudio de la estabilidad térmica del a-sinx:h producido mediante la técnica de plasma ecr-cvd* (Tesis Doctoral no publicada).
- MAVDT. (2010a). *Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.
- MAVDT. (2010b). *Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*. Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial.
- Molineaux, B., Ineichen, P., y Delaunay, J. (1995). Direct luminous efficacy and atmospheric turbidity—improving model performance. *Solar Energy*, 55(2), 125-137. Recuperado de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9500035P> doi: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00035-P](https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00035-P)
- Múnera, M. (2015). *Estudio de espesores ópticos de aerosoles atmosféricos usando radiometría solar resuelta espectralmente* (Tesis de Master no publicada). Universidad Nacional.
- Nisperuza, D. (2015). *Propiedades Ópticas de los aerosoles atmosféricos en la región andina colombiana mediante análisis de mediciones remotas: Lidar, fotométricas y satelitales* (Tesis Doctoral no publicada). Universidad Nacional.
- Ortenberg, F. (2013). *Ozone: Space Vision*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/256077196_Ozone_Space_Vision
- Patterson, E., y McMahon, C. (1967). Absorption characteristics of forest fire particulate matter. *Atmospheric Environment*, 18, 2541-2551. doi: [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(84\)90027-1](https://doi.org/10.1016/0004-6981(84)90027-1)
- Pérez, D. (2007). *Introducción a los sensores remotos, aplicaciones en geología*. Universidad de Buenos Aires.
- Pérez, R., y Rodríguez, M. (2005). *Guía de preparativos de salud frente a erupciones volcánicas módulo 4: Salud ambiental y el riesgo volcánico*. Organización Panamericana de la Salud.
- Significant-Digits. (s.f.). <https://www.physics.uoguelph.ca/significant-digits-tutorial>.

(Accedido el 5 de junio de 2023)

- Skoog, Douglas, A., Holler, James, F., Crouch, y Stanley, R. (2017). *Principios de análisis instrumental* (7.^a ed.). Cengage Learning.
- Skoog, D., West, D., Holer, J., y Crouch, S. (2014). *Fundamentals of Analytical Chemistry*.
- Sokolik, I. (2009). *Atmospheric Radiative Transfer. Lecture 6: Absorption by atmospheric gases in the IR, visible and UV spectral regions*. School of Earth and Atmospheric Sciences. Recuperado de http://irina.eas.gatech.edu/EAS8803_Fall12009/Lec6.pdf
- Tema 3: Sensores Remotos. (s.f.). Biblioteca Digital de Agrimensura. Recuperado de <http://www.bibliotecacpa.org.ar/greenstone/collect/facagr/index/assoc/HASHb3fc.dir/doc.pdf>
- Uherek, E. (2004). *Enciclopedia del Clima ESPERE: Baja atmósfera*. Jagiellonian University. Recuperado de <https://open.uj.edu.pl/mod/page/view.php?id=2278>
- Villegas, H. (2008). *Introducción a la percepción remota y sus aplicaciones geológicas (guías para los asistentes)*. Instituto Colombiano de Geología y Minería.
- Ångström, A. (1929). On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air. *Geografiska Annaler*, 11(2), 156-166. doi: 10.1080/20014422.1929.11880498
- Ångström, A. (1930). On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation II. *Geografiska Annaler*, 12(2-3), 130-159. doi: 10.1080/20014422.1930.11880522

Anexos

A. Full Width at Half Maximum (FWHM)

FWHM significa Full Width at Half Maximum (ancho completo a la mitad del máximo), y se utiliza comúnmente para medir el ancho de la banda de absorción de un espectro. Específicamente, el FWHM se refiere a la anchura de la banda de absorción en el punto donde la absorción es la mitad de su valor máximo. Al analizar el ancho de absorción FWHM en una muestra, es posible obtener información sobre la composición molecular y la distribución de frecuencias de vibración en la muestra. Estos datos pueden ser útiles en la identificación de compuestos desconocidos o en la determinación de la concentración de un compuesto en una mezcla.

Para medir el FWHM, se traza una línea horizontal en el gráfico del espectro en la mitad del valor máximo de la absorción, y luego se mide la anchura de la banda de absorción en el punto donde la línea horizontal intersecta el espectro. Este valor se toma como el FWHM.

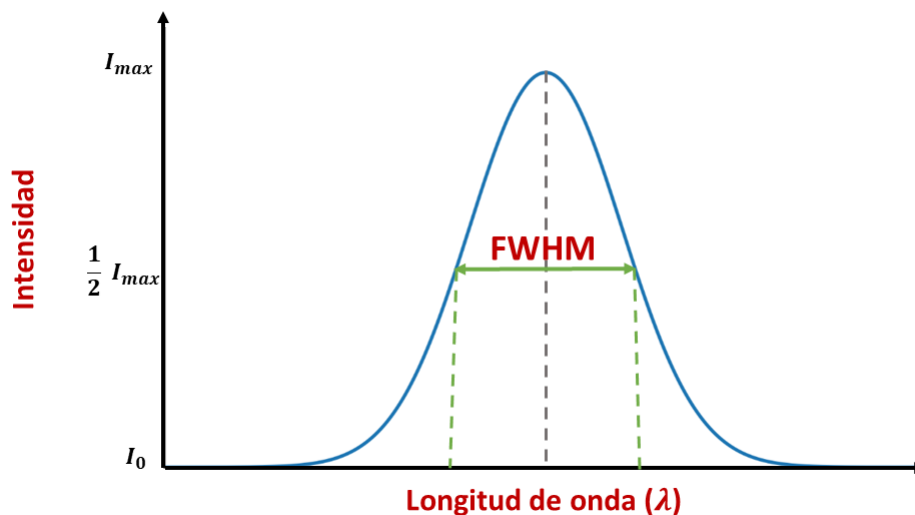


Figura 1: Medida del FWHM en una curva.
Fuente: Tomada de (Guapacha, 2016)

El FWHM se utiliza como una medida de la resolución del espectrómetro y como una medida de la forma de la banda de absorción. Una banda de absorción con un FWHM estrecho indica una resolución alta y una forma de banda estrecha, mientras que una banda de absorción con un FWHM ancho indica una resolución baja y una forma de banda ancha.

La anchura de banda es un indicador del grado de desorden de la red cristalina del material. En los materiales cristalinos, los átomos están organizados en una red regular y predecible, los ángulos de enlace son todos iguales y están bien definidos; lo que da lugar a bandas de absorción estrechas. En los materiales amorfos, por otro lado, la organización de los átomos es más aleatoria, los ángulos de enlace pueden variar significativamente de un átomo a otro, lo que resulta en una dispersión de las frecuencias de resonancia y esto da lugar a bandas de absorción más anchas y difusas. (Martínez-Viviente, 2002)

B. Ley de Lambert-Beer

La Absorbancia la podemos determinar a través de la siguiente ecuación:

$$A = \log \left(\frac{I_0}{I} \right). \quad (1)$$

Donde A = Absorbancia, I_0 = Intensidad emitida por la fuente y I = Intensidad transmitida por la solución.

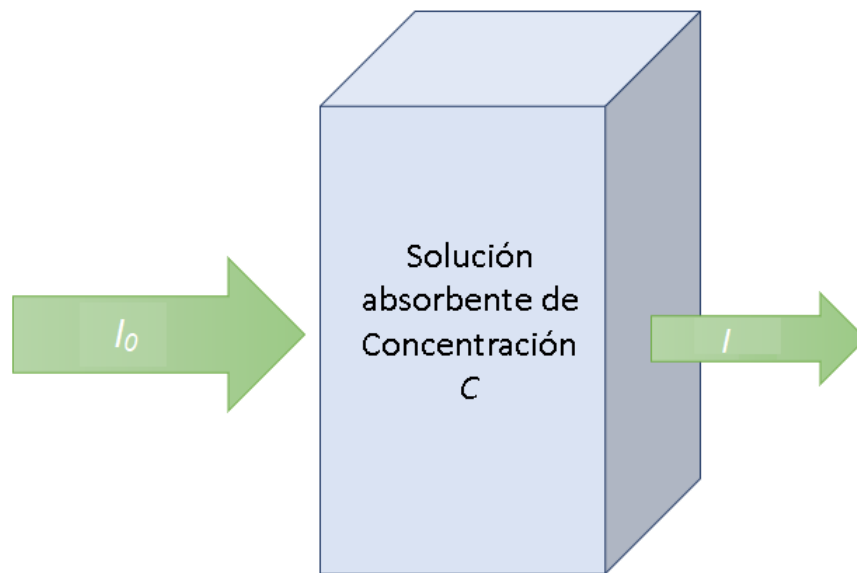


Figura 2: Diagrama de Potencia radiante emitida por la fuente I_0 y Potencia transmitida por una solución absorbente I de concentración C

Fuente: Adaptada de (D. Skoog et al., 2014)

De la ecuación de Lambert-Beer se conoce que:

$$A = \epsilon LC. \quad (2)$$

Donde C = concentración, ϵ = Coeficiente molar de absorción que depende de la longitud de onda y L = Distancia entre la fuente de radiación y el detector.

De la ecuación 2, notamos que existe una relación directamente proporcional entre la *absorbancia* y la *concentración*.

C. Distribución de Valores Extremos

La distribución de valores extremos (también conocida como “Extreme Value Fitting” en inglés) es una técnica estadística que se utiliza para modelar y analizar datos que se distribuyen de manera no normal y tienen valores extremadamente altos o bajos.

La ecuación que describe dicha distribución es:

$$y = y_0 + A \exp \left(-e^{-\frac{x-x_c}{W}} - \frac{x-x_c}{W} + 1 \right) \quad (3)$$

Dónde: y es la variable dependiente, x la variable independiente, y_0 es el desplazamiento vertical de la curva con respecto al eje horizontal, A la amplitud, W la escala de la distribución y x_c el centro.

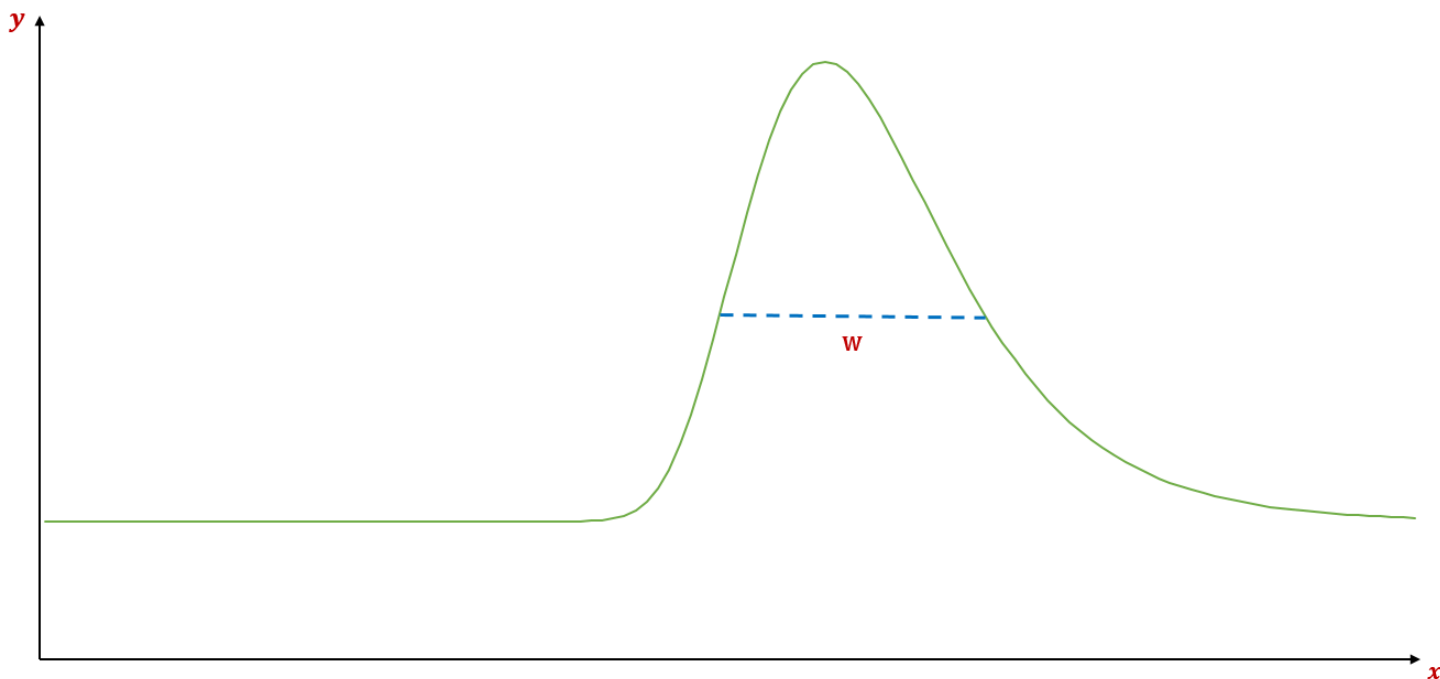


Figura 3: Gráfica de una distribución de valores extremos donde se observa el parámetro W .

Fuente: Este trabajo.

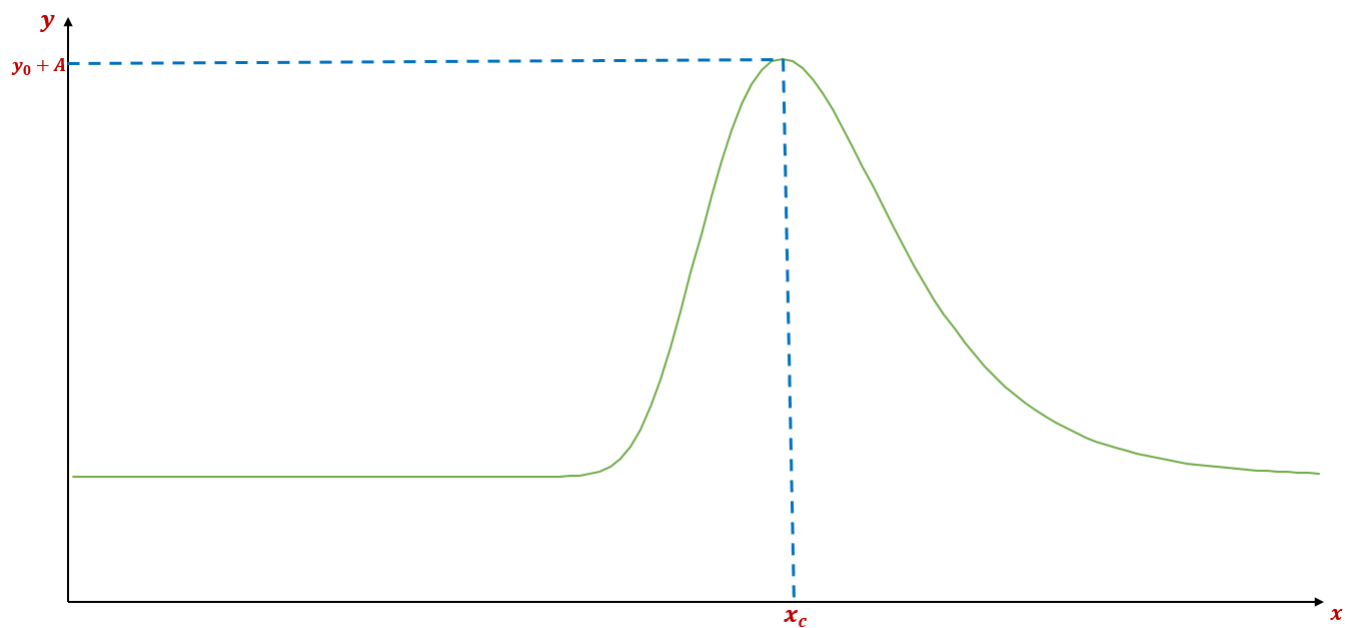


Figura 4: Gráfica de una distribución de valores extremos donde se observa el parámetro x_c y $y_0 + A$.
Fuente: Este trabajo.

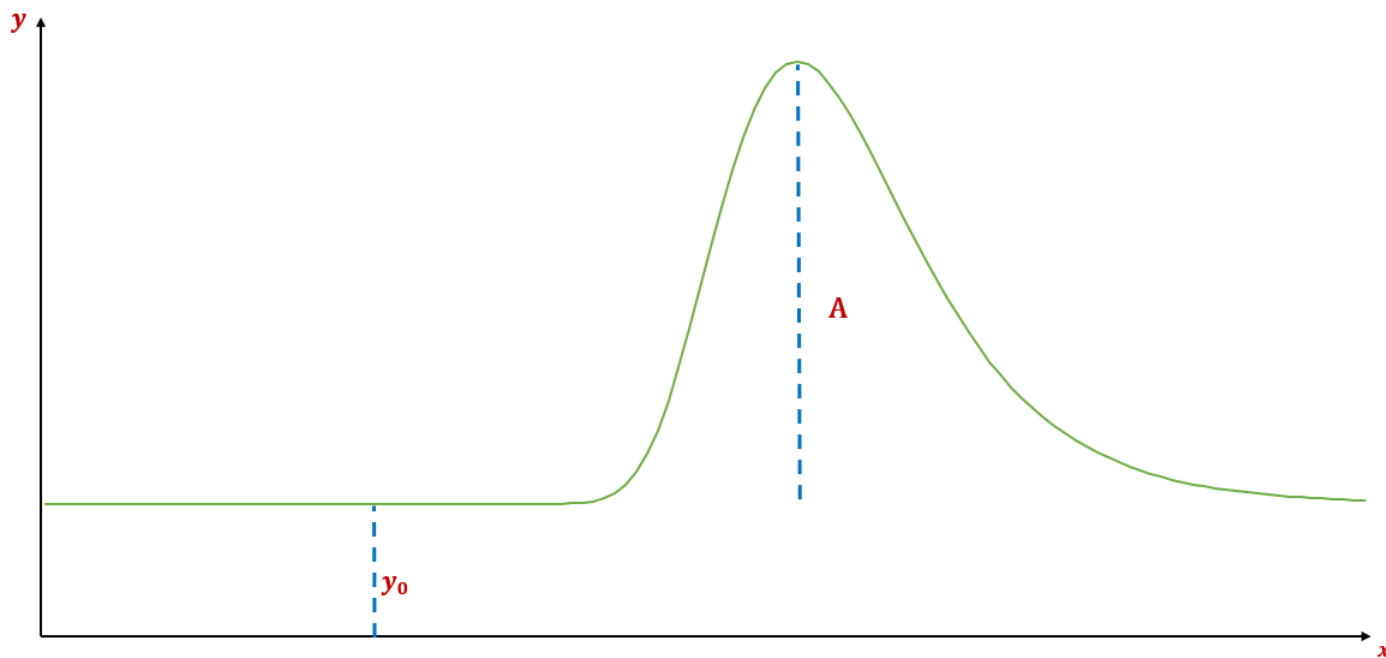


Figura 5: Gráfica de una distribución de valores extremos donde se observa el parámetro A y y_0 .
Fuente: Este trabajo.

D. Propagación de Cifras Significativas

Las cifras significativas desempeñan un papel crucial en los cálculos numéricos. La cantidad de cifras significativas en un cálculo depende directamente de las cifras significativas presentes en los datos utilizados, tal como se explica en las siguientes reglas (Significant-Digits, s.f.):

- **Cifras significativas en adición y sustracción:** cuando se realizan operaciones de suma o resta, es importante considerar el número de decimales en la respuesta. La regla establece que el número de decimales en la respuesta debe ser igual al menor número de decimales presentes en cualquiera de los números involucrados en la operación.

Por ejemplo: si tenemos los números 2,345 y 1,2 y queremos sumarlos, observamos que el número con el menor número de decimales es 1,2 (un decimal). Por lo tanto, la respuesta final debe tener un decimal para cumplir con esta regla. En otro escenario, si restamos 4,56 y 0,123, notamos que el número con el menor número de decimales es 4,56 (dos decimales). Por lo tanto, la respuesta también debe tener dos decimales.

- **Cifras significativas en multiplicación, división y demás operaciones:** en cálculos que involucran multiplicación, división, funciones trigonométricas y otras funciones, se determina que el número de dígitos significativos en la respuesta debe ser igual al menor número de dígitos significativos presentes en cualquiera de los números utilizados en la operación.

Por ejemplo, en la evaluación de la expresión $\text{seno}(kx)$, donde $k = 0,097\text{m}^{-1}$ con dos dígitos significativos y $x = 4,73\text{m}$ con tres cifras sigficativas, se debe considerar el número con menor cantidad de cifras sigficativas, que en este caso es dos. Por lo tanto, la respuesta final debe tener dos cifras sigficativas para cumplir con esta regla.