

**Propuesta de implementación de un observatorio LIDAR en la Universidad
de Nariño para la realización de estudios atmosféricos.**

Andrea Dayana Botina Tautás

Trabajo de Grado

Director

Prof. Luis Andrés Santacruz Almeida

Departamento de Física

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Universidad del Nariño

San Juan de Pasto

2021

”Tanto el desarrollo del contenido como las ideas y conclusiones aportadas en este trabajo de grado son responsabilidad exclusiva de sus autores”

Artículo 1(primer) del acuerdo N° 324 de Octubre 11 de 1966, emanado del Honorable consejo Directivo de la Universidad de Nariño.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Aprobado por el comité de grado en cumplimiento de los requisitos exigidos por la Universidad de Nariño para optar al título de Físico.

(Firma en el original)
Sandra Sánchez Sierra
Firma jurado

(Firma en el original)
Alberto Quijano Vodniza
Firma jurado

12 de febrero del 2021
Fecha de sustentación

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi asesor de tesis, el profesor Luis Andrés Santacruz del departamento de física de la Universidad de Nariño, por la orientación y ayuda que me brindó en la realización del presente trabajo.

También quiero agradecer inmensamente al doctor Álvaro Efrain Bastidas, de la universidad Nacional, por toda su ayuda y colaboración en este proyecto.

Finalmente agradezco a mi familia y a mi novio Andrés, por todo su apoyo durante este proceso.

A mis hermanas, cada paso que doy es por y para ustedes.

Resumen

En el trabajo de grado presentado en este escrito se investigó acerca de la tecnología LIDAR (Laser Detection and Ranging), los requerimientos necesarios para la construcción de un laboratorio especializado y los costos de su implementación. El trabajo se orientó particularmente en la aplicación a los estudios atmosféricos y el impacto que el control de la calidad del aire puede tener sobre la salud de la población, haciendo de este un estudio de interés a nivel de proyección social. Se analizó cómo el desarrollo de un laboratorio LIDAR en la Universidad de Nariño permitiría ampliar las posibilidades de investigación para el Programa de Física, así como para otros programas y áreas de investigación de la Universidad.

Abstract

In this degree work, we investigated the LIDAR technology (Laser Detection and Range), the necessary requirements for its construction and the cost of its implementation. The investigation was oriented about the application to atmospheric studies and the impact that air quality control has on the population's health, making this study of interest at the level of social projection. We analyzed how the development of a LIDAR laboratory at Universidad de Nariño will allow expanding the research possibilities for the Physics Program, as well as for other programs and research areas of the University.

Índice general

Resumen	VI
1. Introducción	1
2. Fotónica	6
2.1. Breve historia	6
3. La contaminación del aire	10
3.1. Introducción	10
3.2. Historia del control de la contaminación del aire	11
3.3. Efectos de la contaminación del aire sobre la salud humana.	12
3.4. Normas para proteger la salud humana.	15
3.5. Efectos de contaminación del aire sobre la visibilidad.	16
3.6. Normas de la calidad del aire	18
4. Mediciones de la contaminación del aire y modelos de concentración de contaminantes	21
4.1. Introducción	21
4.2. Mediciones de la contaminación del aire y análisis de su emisiones	21
4.3. Emisiones	22
4.4. Modelos de concentración de los contaminantes del aire.	23
4.4.1. Modelo de la caja fija	24
4.4.2. Modelos de difusión.	25
4.4.3. Modelo de celdas múltiples.	27

5. Naturaleza de los particularizas contaminantes	30
5.1. Introducción	30
5.2. Tipo de partículas	30
5.3. Sedimentación de partículas.	31
5.4. Fuerzas de retardo	32
5.5. Funciones de distribución.	32
5.6. Comportamiento de las partículas en el aire	33
6. Teoría de la interacción luz-atmósfera.	35
6.1. Introducción	35
6.2. Atmósfera	35
6.3. Intensidad de la luz	36
6.4. Interacción luz-atmosfera	38
6.4.1. Transmisión de la luz en la atmósfera	38
6.4.2. Fenómenos de absorción y dispersión	39
7. Tecnología LIDAR	40
7.1. Introducción	40
7.2. LIDAR	40
7.2.1. Tipos de LIDAR	40
7.3. Funcionamiento y componentes de un sistema LIDAR	42
7.3.1. Sistema emisor	42
7.3.2. Sistema colector	44
7.3.3. Sistema detector	45
7.4. Ecuación LIDAR	45
7.5. Laboratorios LIDAR en Colombia	46
7.6. Laboratorio Lidar en la Universidad de Nariño	48
7.6.1. Beneficios	49
8. Conclusiones	51
Bibliografía	54

Capítulo 1

Introducción

La Física pertenece a las denominadas ciencias exactas en las cuales la determinación de ciertos parámetros medibles desempeña un papel importante, pues estos definen las propiedades de los sistemas físicos o las características de un evento. Para ello es necesario realizar mediciones que permitan obtener cuantitativamente estas variables. En la actualidad existen diferentes sistemas de medición que permiten adquirir este tipo de información por medio de diferentes procesos, y aunque muchos de estos sistemas suelen ser muy precisos, en ciertas ocasiones suelen presentar limitantes al momento de determinar un rango de medición. Este es el problema que se presenta comúnmente al realizar mediciones a cuerpos muy pequeños, y por ello es necesario desarrollar tecnologías que satisfagan esta necesidad.

En la actualidad se han implementado diversos métodos que permiten la realización de medidas lo suficientemente precisas para estudiar tanto sistemas macroscópicos como microscópicos. Particularmente los sistemas LIDAR se encuentran ubicados en más de 200 laboratorios alrededor del mundo,^{10,14,31,36} permitiendo realizar mediciones a cuerpos muy grandes como superficies terrestres^{4,27} o a cuerpos muy pequeños como insectos o moléculas.^{5,10,14,31} Estos antecedentes demuestran que este sistema trae consigo muchas ventajas, entre las cuales resaltan la sensibilidad y precisión debidas a la posibilidad de medir objetos con tamaños comparables a la longitud de onda de emisión;¹⁰ así como la rapidez en la toma de datos y la poca interacción entre el láser y el sistema físico.⁵

Colombia es un país en desarrollo en procura de alcanzar un estatus sobresaliente en avances científicos e implementación y aplicación de nuevas tecnologías. Los esfuerzos en

el manejo adecuado de los recursos naturales y el cuidado del medio ambiente son un ejemplo de la importancia creciente de estos desarrollos, especialmente dada la riqueza natural del país y su diversidad de recursos.³² En las ciudades en las que los efectos de la contaminación y su afectación del aire se hacen cada vez más evidentes es necesario hacer un seguimiento de la calidad de éste. Particularmente, San Juan de Pasto ha evidenciado un notorio crecimiento que trae como consecuencia un aumento en la población y al mismo tiempo un aumento en el desarrollo industrial y automotriz, lo que entre otros, puede verse reflejado en una disminución de la calidad del aire.¹⁷ Contar con sistemas eficientes para un seguimiento adecuado de esta problemática se hace cada vez mas necesario.

La implementación de sistemas de medición como los laboratorios LIDAR permite su utilización en la realización de los estudios mencionados, así como en otras aplicaciones, tal como el caso del estudio de las emisiones volcánicas y su afectación en las condiciones atmosféricas después de una erupción. Esto es importante en Departamentos como Nariño que cuentan en su topografía con una apreciable cantidad de fuentes volcánicas.

El estudio del funcionamiento y los requerimientos para la construcción de un observatorio LIDAR en la Universidad de Nariño ha permitido determinar que esta metodología es factible para ser implementada en el Departamento de Nariño y la clase de aplicaciones que con ésta se puede realizar. Así mismo se pudo determinar su viabilidad tanto técnica como económica para el Programa de Física y la comunidad universitaria en general. Con este trabajo se adquirieron los conocimientos necesarios para la implementación de un sistema LIDAR en la Universidad de Nariño y así proyectar las ventajas que su uso implicaría para la investigación en el área de Física, la universidad y la comunidad nariñense.

Estado del arte y aplicabilidad

A partir del trabajo pionero de Maiman en 1960⁴² con el cual se logró obtener el primer LÁSER funcional, su desarrollo ha avanzado hasta lograr una gran variedad de aplicaciones.^{1,4,5,11,27,36,41,43} La ventaja de su uso ha sido primordial en avances relacionados con

diferentes áreas del conocimiento, tales como la ingeniería,¹² la medicina,²⁴ el arte,¹⁹ entre otros. Estos avances y aplicaciones generaron la necesidad de implementar métodos que permitiesen, por medio de un sistema compuesto principalmente por un único LÁSER y un sistema de adquisición de datos, la realización de diferentes tareas con aplicabilidad a diversas áreas. Es así como se implementa la tecnología LIDAR (Laser Detection and Ranging) que es una técnica de detección remota que utiliza la luz láser para múltiples aplicaciones.¹⁴

Los laboratorios que implementan la tecnología LIDAR se basan en un sistema de tele-detección, que consiste en enviar pulsos de luz que al incidir sobre algún sistema físico, por ejemplo la atmósfera, son reflejados y reenviados hasta un sensor, el cual se encarga de medir tanto la intensidad con la cual los pulsos reflejados regresan, como el tiempo de retraso entre un pulso y el siguiente. La información obtenida por este método es procesada por medio de un sistema de adquisición de datos y un software adecuado con el fin de hacer el estudio correspondiente.^{10, 14, 31, 36}

Para el tratamiento de datos el sistema LIDAR se basa en la detección de los cambios que sufren los pulsos emitidos, los cuales implican variación en la energía radiada y el tiempo de llegada, además de otros factores que pueden alterar la energía electromagnética que es recibida por el sensor. Por ello es de interés el desarrollo de metodologías para la corrección y procesamiento de datos para la extracción de la información requerida.⁴³

La implementación de un sistema LIDAR tiene muchas ventajas para la adquisición de datos en comparación con otros métodos, pues requiere de un menor control, registra una mayor cantidad de datos en menos tiempo y con mayor precisión, lo que depende de las necesidades del estudio a realizar.³⁶ Además, las longitudes de onda utilizadas en este sistema son mucho más pequeñas, comúnmente el ultravioleta cercano, el visible o el infrarrojo cercano, lo que hace posible la medición de objetos tan pequeños como la longitud de onda de la radiación emitida. El tipo de láser y su longitud de onda dependerán de la aplicación en la que se va a implementar el sistema LIDAR, particularmente para

estudios atmosféricos suele ser utilizado un láser pulsado con longitud de onda de 532 nm. También es importante tener en cuenta que éste es un sistema no invasivo, puesto que permite determinar una magnitud sin necesidad de afectar el medio con el cual interactúa. Por tanto, un sistema LIDAR es usualmente mucho más sensible para la realización de mediciones de gran precisión.³¹

Debido a su capacidad para medir distancias, una de las aplicaciones mas populares del sistema LIDAR es la creación de mapas tridimensionales, para lo que es utilizado un equipo que debe ser aerotransportado, de forma que al moverse sobre la superficie a estudiar, el LIDAR funciona de manera similar a un escáner, permitiendo estimar con precisión los parámetros geométricos y estructurales de la misma. Esta técnica es comúnmente utilizada en la horticultura, la cual proporciona información del terreno, por ejemplo, parámetros estructurales de los árboles como la altura, el volumen del dosel y el área de las hojas, etc. De esta manera es posible construir un modelo digital de elevaciones o vegetación de la superficie.^{4,27} De forma análoga, la sensibilidad de este sistema proporciona numerosas utilidades para medir parámetros de cuerpo pequeños, como es el caso de la entomología que, a pesar de existir gran dificultad en el estudio del comportamiento de los insectos, el uso de un sistema LIDAR hace más fácil y práctico la determinación de la cantidad de insectos, sus movimientos y clasificación.⁵

La propiedad de medir objetos pequeños con este método, escala hasta cuerpos de tamaño mucho menor que un insecto, haciendo de un LIDAR un sistema adecuado para medir variables incluso a nivel molecular. Esto último hace posible medir parámetros atmosféricos por medio de la interacción entre la radiación emitida y las partículas que conforman la atmósfera.^{10,14,31} Esta aplicación es de gran interés para hacer un análisis y seguimiento de las condiciones atmosféricas locales de una región determinada. En Colombia, al ser un país en vía de desarrollo, se hace indispensable hacer un seguimiento de, entre otras cosas, la calidad del aire.¹⁷ En el departamento de Nariño, debido al continuo aumento de las emisiones de CO_2 por la creciente cantidad de automóviles, se están haciendo esfuerzos por contrarrestar las afectaciones de éstas sobre la calidad del

aire y se han comenzado a establecer medidas y estudios al respecto.⁶ Esto evidencia una evidente necesidad de contar con un sistema eficiente para el estudio de las condiciones atmosféricas.

Desde el *Grupo de Investigación en Física de la Materia Condensada* (GIFMAC) de la Universidad de Nariño, surgió la idea de implementar la tecnología LIDAR por medio de la construcción de un laboratorio LIDAR aplicado al estudio atmosférico en el Departamento de Nariño. Con esto se podría obtener información sobre la concentración de partículas, aerosoles u otros contaminantes, densidad de ozono o detección de viento entre otros,^{14,35,41} permitiendo realizar diversos estudios sobre la atmósfera en el Departamento y los factores que la afectan. Así mismo, teniendo presente la variedad de aplicaciones que presenta esta tecnología, podría a futuro utilizarse para otros estudios relacionados con otras áreas y grupos de investigación, siendo útil a grupos de las diferentes ingenierías, Biología, Química, entre otros, además del Programa de Física y sus grupos de investigación. Para dar un ejemplo de esto último, podría realizarse la medición de flujo de CO_2 volcánico¹ en volcanes como el Galeras, generando aplicaciones en geofísica y dinámica de fluidos.

Capítulo 2

Fotónica

2.1 Breve historia

La luz es parte fundamental en la vida del ser humano siendo indispensable para observación de lo que ocurre en su entorno y poder así estudiar los diferentes fenómenos que se presentan en la naturaleza. Además, la luz ha mostrado ser una fuente relevante de energía, despertando interés en el estudio de sus propiedades y posibles aplicaciones. En la antigua Grecia, ya se había comenzado con los primeros estudios de la luz como lo son su forma de propagación y su comportamiento al interaccionar con sigo misma y con la materia: reflexión, refracción, absorción, interferencia y difracción. Sin embargo, al intentar explicar el fenómeno visual, los conceptos de luz y visión se mezclaban, dándose diversas teorías como el que la luz se originaba de los ojos hacia los objetos vistos. Posteriormente, Aristóteles contradijo esta hipótesis al proponer que las características del medio y su estado permitiría que los colores sean transmitidos. Por aquel entonces los conocimientos acerca del comportamiento de la luz eran amplios pero cualitativos y no fue hasta que Euclides se encargara de hacer una descripción cuantitativa de los fenómenos ópticos, que se dió origen a la ciencia de la óptica tal cual hoy la conocemos.^{22,34}

En el siglo XIII se iniciaron los primeros estudios con lentes empleados como anteojos para la corrección de la vista, al mismo tiempo que se empezó a considerar que la luz tenía una velocidad finita y que necesitaría de un medio de propagación al que llamaron éter. Este conjunto de iniciativas y descubrimientos dieron paso al desarrollo de la óptica geométrica, lo cual permitió la construcción e invención de instrumentos ópticos más

avanzados.^{22,34}

En el siglo XVII se comenzaron a fabricar los primeros telescopios y microscopios con ayuda de las lentes. Durante este mismo siglo, Pierre de Fermat desarrollo su principio mínimo, el cual establece que la trayectoria que sigue un rayo de luz es la mas corta con respecto al tiempo. En 1621 Willebrord Snell descubrió la ley de la refracción, pero al morir Descartes tomo la idea como propia, no obstante esta ley ya se había descubierto en Bagdad por Ibn Sahl, en el año 984, y nuevamente por Thomas Harriot en Inglaterra en el año 1602. Sin embargo en la actualidad esta ley se conoce como ley de Snell. También se comenzó con los primeros estudios formales de interferencia y difracción, las cuales fueron determinantes para establecer la naturaleza ondulatoria de la luz. Mientras tanto Isacc Newton había descubierto que la luz blanca se podía descomponer en diferentes colores con ayuda de un prisma, no obstante el consideraba la luz como un conjunto de partículas las cuales se propagaban a través del éter de forma lineal. La mayor parte de la comunidad científica apoyo esta teoría debido a la reputación de Newton, mientras que una reducida cantidad apoyaron la teoría de Christian Huygens en la cual la luz es una onda que se propaga por distintos medios.^{22,28,34}

Durante el siglo XIX diferentes científicos contribuyeron para que la óptica se desarrollará aceleradamente debido a su aportes para la explicación física y matemática de los distintos fenómenos ópticos. Durante este siglo, Joseph von Fraunhofer inventó el análisis espectral lo cual permitió realizar un estudio a la interacción de la luz con la materia, dando origen así a la espectroscopia. Se crearon las leyes de Fresnel, las cuales permitieron dar una explicación cuantitativa a los fenómenos de reflexión y refracción. Jean Léon Foucault diseñó un método para medir la velocidad de la luz, debido a lo cual se dio cuenta del cambio de velocidad de la luz al pasar por un medio transparente. Consecuentemente la teoría corpuscular se derrumbó, aun más cuando James Maxwell, a través de sus ecuaciones, logró determinar que la luz era una onda electromagnética.^{22,34}

Por aquella época Lord Rayleigh estableció la teoría de la dispersión, en la cual se propone que la luz se dispersa en partículas más pequeñas, con lo cual se logra explicar porque el cielo es azul. Thomas Alva Edison fabricó la primera lámpara incandescente en 1879, esto abrió camino a la iluminación, que sería una nueva aplicación para la óptica. A finales del siglo *XIX* varios experimentos, que no pudieron ser explicados mediante la mecánica clásica, dieron paso a la mecánica cuántica.³⁴

A comienzos del siglo XX la física cuántica surgió a partir de los trabajos pioneros de Planck sobre el espectro de radiación del cuerpo negro, lo que proporcionó a Albert Einstein la posibilidad de clarificar el efecto foto-eléctrico al considerar que la luz estaba conformada por cuantos de energía, volviendo a dar origen a la teoría corpuscular de la luz pero sin considerar el éter. De igual manera Niels Bohr explicó los espectros lineales de los gases mediante principio cuánticos y en 1924 Louis Pierre Raymond propuso la hipótesis de la dualidad onda-partícula en su tesis doctoral, la cual fue necesariamente aceptada para dar explicación de los diferentes comportamientos de la luz.^{28,34}

La absorción y emisión espontánea de fotones eran los procesos de interacción entre la luz y la materia conocidos hasta el momento, no obstante, en 1916, Alber Eistein planteó una tercera interacción, la emisión estimulada. Esta interacción permite la amplificación de la luz, lo cual es la base principal para la creación del láser en el año 1960. Más adelante se siguieron desarrollando otros tipos de láseres, generando un nuevo impulso a la óptica y sus aplicaciones, dándose origen a lo que hoy se conoce como la ingeniería de la óptica: *La Fotónica.*^{28,34}

Aunque a principios del siglo XX el término fótónica se asoció con la tecnología de

información, actualmente hace referencia a una rama de la física encargada del estudio de los fotones, tanto sus propiedades como aplicaciones. Utilizando diferentes herramientas y conocimientos se ha logrado comprender y aprovechar la energía electromagnética correspondiente al fotón, permitiendo la adquisición y procesamiento de la información. En la actualidad la fotónica se ha convertido en una disciplina de gran impacto en la física debido al aporte del láser y sus múltiples aplicaciones en distintas áreas; más aún, se espera que el desarrollo de esta rama siga creciendo en la investigación y desarrollo de más aplicaciones.³⁴

Capítulo 3

La contaminación del aire

3.1 Introducción

Al hacer referencia a la contaminación del aire se habla principalmente del exceso de materiales tóxicos en dicho medio; los cuales, pueden llegar a ser perjudiciales para las personas que se encuentran en los alrededores. Esto implica una clara necesidad de realizar estudios para entender y conocer más acerca de los componentes atmosféricos y sus implicaciones respecto a la contaminación. El análisis del contenido de partículas existentes en el aire influye en la meteorología, el clima, y en la calidad del aire de una región. Por tanto, existen diferentes equipos de monitoreo atmosférico, unos pasivos que utilizan medidas directas de la luz solar y otros activos que usan luz láser como sonda atmosférica, lo que permite obtener información de la dinámica atmosférica de una región a estudiar.^{2,18,30}

Gran cantidad de los materiales contaminantes entraron a la atmósfera debido a fuentes que suelen estar fuera del alcance del ser humano. Sin embargo, la mayoría de las fuentes de contaminación industriales se originan en las ciudades que son más pobladas, como resultado de las actividades que realiza el ser humano, que en algunos casos son necesarias, debido a su estilo de vida; por lo tanto, eliminarlas implicaría un impacto negativo sobre la calidad de vida y la economía, más aun teniendo en cuenta que los problemas más graves de contaminación son generados por procesos relacionados con el petróleo e industrias petroquímicas. Aunque actualmente se intenta reemplazar dichos procesos contaminantes, hasta el momento lo más prudente es realizar un control sobre

dichas actividades.^{18,30}

3.2 Historia del control de la contaminación del aire

Los primeros controles de la contaminación tuvieron su origen en el siglo XIII, sin embargo, fue en los años 1945 cuando dichos controles tuvieron mas impacto en la sociedad. Anteriormente el control de la contaminación estaba centrado en las emisiones de las grandes fábricas, principalmente a causa de las grandes contaminaciones que producían, esto originó enfrentamientos entre las fábricas y los habitantes a su alrededor. Debido a la generación de conciencia respecto a la contaminación, en los años 1945 y 1969, se realizaron acciones apreciables en Pittsburgh, los Ángeles y St. Louis. Durante 1963 y 1967 el gobierno federal de los Estados Unidos empezó a supervisar dichas acciones.³⁰

Inicialmente la importancia que se tenía sobre la contaminación del aire era insignificante, mientras que en 1968 se mencionaba muy poco de estos temas, en 1970 todos los periódicos norte americanos hablaban sobre este asunto en particular. Así, es importante recordar que a lo largo de este tiempo nació la National Environmental Policy Act (Ley de Política Nacional sobre el medio ambiente) y la Clean Air Act (Ley del Aire Limpio) de 1970, las cuales concienciaron a las personas sobre los efectos que trae con sí la contaminación del aire.³⁰

En Estados Unidos inicialmente los gobiernos locales o estatales se encargaban de los contaminantes, sin embargo, al considerar la contaminación global se empezaron a tomar otras medidas. Ya para finales del 1980 aparecieron otros problemas relacionados con la lluvia ácida, la destrucción de la capa de ozono y el hacinamiento del dióxido de carbono en la atmósfera.³⁰

Por su parte en América Latina, los mayores esfuerzos para reducir la contaminación ambiental empiezan a mediados de los años 90, enfocándose principalmente en las zonas

rurales, siendo estas las más afectadas. Es importante mencionar que hasta el año 2012 Bogotá se había resaltado por sus labores activas para detener la contaminación del aire, siendo un claro ejemplo la implementación del Transmilenio, lo cual ha permitido tomar medidas para tener un sistema de transporte urbano sostenible. A pesar de los esfuerzos realizados, en los últimos años, el Clear Air Institute junto con la iniciativa del Aire Limpio para América Latina hacen un llamado a informarse más sobre los diferentes contaminantes del aire, de esta manera se pueden realizar acciones más eficientes para reducir la concentración de estos contaminantes y proteger la salud de la población y el medio ambiente. Es por ello que la OMS ha creado Guías de la Calidad del Aire, las cuales han sido elaboradas por expertos en el tema apoyándose en diferentes mediciones de los contaminantes del aire, sus concentraciones y efectos sobre la población y el medio ambiente. Estas guías pueden ser utilizadas a nivel mundial, de esta manera se puede establecer un valor estándar en la calidad del aire, pero es necesario realizar estudios locales, para ajustar estos valores de acuerdo a las necesidades de cada población y además para actualizar constantemente estos valores guía.^{21,30}

3.3 Efectos de la contaminación del aire sobre la salud humana.

Inicialmente es importante resaltar que, en Estados Unidos y diferentes países industrializados, principalmente se considera los efectos que trae consigo la contaminación sobre la salud humana. Por lo tanto, al mencionar la contaminación del aire, se tiene en cuenta la cantidad que se genera y el tiempo de duración, tanto en la atmósfera como a la exposición a la cual se ve sometido el hombre.³⁰

Al elaborar una curva para observar los efectos de un contaminante, se realizan tres tipos de enfoques:

- Experimentos con animales: los cuales permiten observar los efectos de la contaminación del aire sobre el ser humano, teniendo en cuenta que dichos efectos son supuestos, es decir que se expone al sujeto de prueba (animal) a condiciones de aire contaminado, que si bien el producto que derive de dicho experimento puede ser

semejante a la consecuencia de someter al ser humano a las mismas condiciones, cabe recalcar que no siempre los resultados son exactamente similares.³⁰

- Experimentos con seres humanos: Al realizar estos experimentos comúnmente las personas voluntarias son jóvenes, lo cual no permite obtener los datos necesarios para una conclusión, aún más teniendo en cuenta el corto tiempo de duración de estos experimentos. Este tipo de experimentos permiten observar detalladamente los mecanismos fisiológicos derivados de los efectos nocivos por contaminación del aire sobre el ser humano.³⁰
- Estudios epidemiológicos: Este tipo de estudios se suelen realizar sobre una población en particular, teniendo en cuenta la contaminación del aire generada en su localidad. Su principal enfoque comúnmente es sobre las tasas de mortalidad anuales o diarias respecto a la concentración de la contaminación del aire o de partículas finas.³⁰

A pesar de las falencias que presentan los anteriores estudios se ha logrado desarrollar diferentes métodos que permiten establecer con veracidad las repercusiones que trae con siglo la contaminación del aire, algunas de ellas se muestran en la tabla 3.1.

Contaminantes del aire	Efectos	Altas concentraciones
Dióxido de azufre	Irrita las vías respiratorias, también puede agravar las enfermedades respiratorias y cardiovasculares existentes	Puede provocar broncoconstricción, bronquitis y traqueítis
Dióxido de Nitrógeno	Irrita las vías respiratorias.	Provoca bronquitis, pulmonía y puede aumentar el riesgo de infecciones respiratorias
Plomo	Causa retraso en el aprendizaje y alteraciones en la conducta	
Monóxido de Carbono	Durante una larga exposición puede causar malestar e incluso la muerte	Impide el transporte de oxígeno hacia las células
Ozono troposférico	Irrita las vías respiratorias	Disminuye la función pulmonar, agrava algunas enfermedades respiratorias y pulmonares, causando daños permanentes.
Benceno	Produce efectos nocivos en la médula osea	Perjudica el sistema inmunológico.
Partículas finas	Agrava enfermedades respiratorias y cardiovasculares	En casos de mayor gravedad puede provocar cáncer

Tabla 3.1: *Implicaciones de los contaminantes del aire en la salud*^{17, 18, 38}

Por lo tanto, es de vital importancia estudiar los efectos que puede producir la contaminación del aire, teniendo en cuenta que esta contaminación puede estar relacionada con

factores externos como el transporte o industrias, pero también existen contaminantes en el interior de los hogares y que suelen ser mucho más peligrosos debido al actual estilo de vida que lleva el ser humano, siendo que las personas permanecen mucho más tiempo en sus casas por lo tanto se está expuesto a este tipo de contaminantes durante mayor tiempo. Esto hace necesario establecer el grado en el cual la contaminación del aire puede afectar la vida del ser humano, puesto que, como se ven la tabla anterior, la mayoría de estos contaminantes del aire en altos niveles de concentración pueden afectar gravemente la salud del ser humano y en algunos casos llevarlo hasta la muerte. Sin embargo, estos estudios se deben realizar teniendo en cuenta el lugar y tipo de población, puesto que, para cada lugar la contaminación del aire se presenta en diferentes grados y existen diferentes efectos para cada tipo de población.^{18,30,38}

3.4 Normas para proteger la salud humana.

En el año 2017 se realizó un informe del Índice de Calidad del Aire (ICA) en Colombia, el cual indica los posibles efectos en la salud de la población colombiana, debido a las concentraciones de contaminantes del aire. Este índice se evalúa mediante un valor adimensional que permite determinar la cantidad de contaminación, una categoría y un color que indican el nivel de posibles efectos nocivos sobre la salud humana.¹⁷

En la normatividad nacional solo se considera el calculo para 6 de los 7 contaminantes (O_3 , PM_{10} , PM_{25} , CO , SO_2 y NO_2) en exposiciones que suelen durar entre 1 y 24 horas, así pues los máximos niveles de contaminación permitidos a nivel nacional fueron establecidos en la resolución del 610 de 2010 y actualizados por la resolución 2254 del 2017. Estas normas tienen como base fundamental las recomendaciones hechas por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la cual, mediante estudios epidemiológicos, determinó unos valores guías y niveles basándose en el aumento o disminución de morbilidad y mortalidad asociados a enfermedades respiratorias y cardiovasculares que pueden ser agravadas debido a la contaminación del aire. Aunque estos niveles también pueden variar según el lugar y la población. En adición a los valores guía, existen los objetivos intermedios (OI),

cuyos valores permiten conocer los progresos de la reducción de material particulado. Es por ello, que para el material particulado menor a 10 y a 2.5 micras (PM_{10} y $PM_{2,5}$) le corresponde el objetivo intermedio -2 de la OMS para un tiempo prolongado de exposición; cuyo principal beneficio es reducir el riesgo de mortalidad en un 6 %. Mientras que, para un tiempo corto, le corresponde el objetivo intermedio -3, el cual reduce en un 6 % la mortalidad más que el objetivo intermedio -2; es decir entre un 2 % y 11 % en comparación al OI-2. Dichos valores se muestran en la tabla 3.2.^{17,33}

Exposición	Anuales			Diarios		Hoctohorarios		
	Prolongada			Corta duración		Corta duración		
				24 horas		8 horas		
Contaminante	PM_{10}	$PM_{2,5}$	NO_2	PM_{10}	$PM_{2,5}$	SO_2	O_3	CO
Res.610 de 2010	50	25	100	100	50	250	80	10000
Res.2254 de 2017 (A partir del 2018)	50	25	60	75	37	50	100	5000
Res. 2254 a 2030 (A partir de 2030)	30	15	40	75	37	20	-	-
OMS Objetivo Intermedio -2	30	25	-	100	50	-	-	-
OMS Objetivo Intermedio -3	30	15	-	75	37,5	-	-	-
Valor guía OMS	20	10	40	50	25	-	100	-

Tabla 3.2: *Normatividad de calidad del aire en Colombia vrs. Recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud. Fuente: Adaptado de Informe del estado de la calidad del aire en Colombia"Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible. Primera edición (2018)*

3.5 Efectos de contaminación del aire sobre la visibilidad.

La contaminación del aire suele afectar de forma negativa la visibilidad, principalmente debido a los esmogs urbanos que suelen estar compuestos en su mayor parte por NO_2 , que da un color café a estos contaminantes. La principal consecuencia de estos efectos se deben a la interacción de la luz con las partículas que se encuentran suspendidas en el aire. Cuando una fuente de luz emite su fotones estos pueden reducir su energía al pasar a través de la materia, debido a los diferentes fenómenos que pueden suceder durante

este proceso, como puede ser la reflexión, absorción (que puede ser seguida de una nueva radiación) y difracción.^{25,30}

Es importante tener en cuenta que estos fenómenos dependen del tamaño de la partícula con la cual interactúa la luz, siendo que si las partículas tienen un tamaño mayor que la longitud de onda, entonces el fotón puede ser absorbido o reflejado hacia atrás como se muestran en las figuras 6.1a y 6.1b respectivamente. Si el tamaño de la partícula es mucho menor que la longitud de onda de la luz, entonces el fotón pasará a través de esta como en la figura 6.1c. Debido a que las partículas son muy pequeñas pueden dispersar la luz, este fenómeno es conocido como dispersión de Rayleigh, mas su eficacia no se compara a las partículas que son aproximadamente de igual tamaño a la longitud de onda de la luz. La dispersión provoca un cambio de color, siendo el azul el color más fácil de dispersar debido a su corta longitud de onda. Si la partícula tiene casi el mismo tamaño que la longitud de onda de la luz, entonces se dispersará como en la figura 3.1d.³⁰

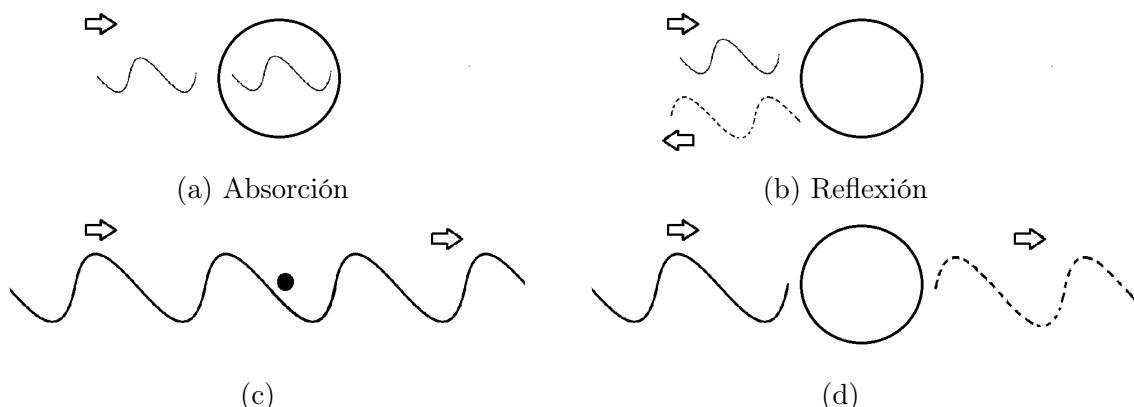


Figura 3.1: a) y b) Interacción entre la luz y una partícula cuyo diámetro es mayor que la longitud de onda de la luz; c) Interacción de la luz cuya longitud de onda es mucho mayor que el diámetro de la partícula con la cual interactúa; d) Interacción entre la luz y una partícula cuyas longitud de onda y tamaño, respectivamente, son aproximadamente iguales.

También se debe considerar que el exceso o escasez de luz puede afectar la visibilidad, sin embargo todos estos factores son útiles para estimar las emisiones de partículas en el aire debido a los gases producidos como columnas de humo. Además estas brumas hacen evidente la contaminación que hay en el aire, pero también advierten al público sobre la

existencia de gases que pueden ser invisibles y podrían ser más peligrosos, por lo cual se hace indispensable realizar un mayor control de la contaminación del aire tanto para gases visibles como invisibles.³⁰

3.6 Normas de la calidad del aire

Puesto que eliminar toda contaminación del aire sin que represente alguna consecuencia resulta imposible, entonces es necesario adoptar una filosofía de control para determinar las acciones necesarias y así tener un medio ambiente apropiadamente limpio. No obstante es indispensable que esta filosofía adoptada cumpla algunas características para que sea eficaz en la reducción de la contaminación del aire, que sea fácil de comprender y posiblemente obligatoria pero también debe ser flexible para permitir a los generadores de contaminación poder salir por encima de las dificultades. Finalmente debe ser evolutiva para que esté actualizándose constantemente con el paso de los años y ante nuevas formas de contaminación del aire.³⁰

Existen cuatro tipos de filosofías de control para la contaminación del aire entre las cuales se encuentra las normas sobre emisiones, las normas sobre la calidad del aire, los impuestos por emisiones y normas de costo-beneficio; las dos primeras comúnmente se aplican en países industriales, mientras que las otras son temas de publicaciones académicas.³⁰

De las anteriores filosofías es importante resaltar las normas de calidad del aire, cuya prioridad es suprimir cualquier daño que genere la contaminación del aire; para ello, se establece un límite o umbral en la producción de contaminación teniendo en cuenta una situación real que se ajuste a la mayoría de contaminantes, de esta manera es necesario realizar varios estudios que permitan determinar los valores del umbral teniendo en cuenta que se debe proteger la salud humana. En Estados Unidos, por ejemplo, se controla la calidad del aire a través del procedimiento que tiene como base los National Ambient Air Quality Standards (NAAQS), cuyo significado real es "niveles permitidos de contaminación". El procedimiento se ilustra en la figura 3.2.³⁰

El procedimiento consiste en medir la cantidad de concentración de un contaminante en específico en un lugar determinado; si las concentraciones del contaminante son mayores a las indicadas por la normatividad entonces se debe reducir las emisiones de contaminación y volver a medir la calidad del aire, este ciclo se repite hasta que se cumpla con las normas establecidas. Si la calidad del aire es aceptable es necesario buscar procedimientos futuros que permitan reducir la contaminación del aire basándose en el desarrollo de la población, esto con el fin de llevar las concentraciones de los contaminantes del aire a un nivel menor a los establecidos en los NAAQS.³⁰

En Colombia el IDEAM realiza un procedimiento similar, en el cual para evaluar la calidad del aire y comprobar la efectividad de las medidas de prevención, control y disminución de la contaminación del aire existen autoridades ambientales, las cuales tienen diferentes Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) que se encargan de realizar la toma de datos o muestreo, analizar y procesar la información obtenida para finalmente entregar un reporte cuyos resultados son presentados a la comunidad. Sin embargo el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire (SISAIRE), basada en la información que le brindan los diferentes SVCA, es la principal fuente de información para el diseño, evaluación y ajuste a la normatividad sobre las estrategias que se realizan para la prevención y control de la contaminación del aire.^{17,29}

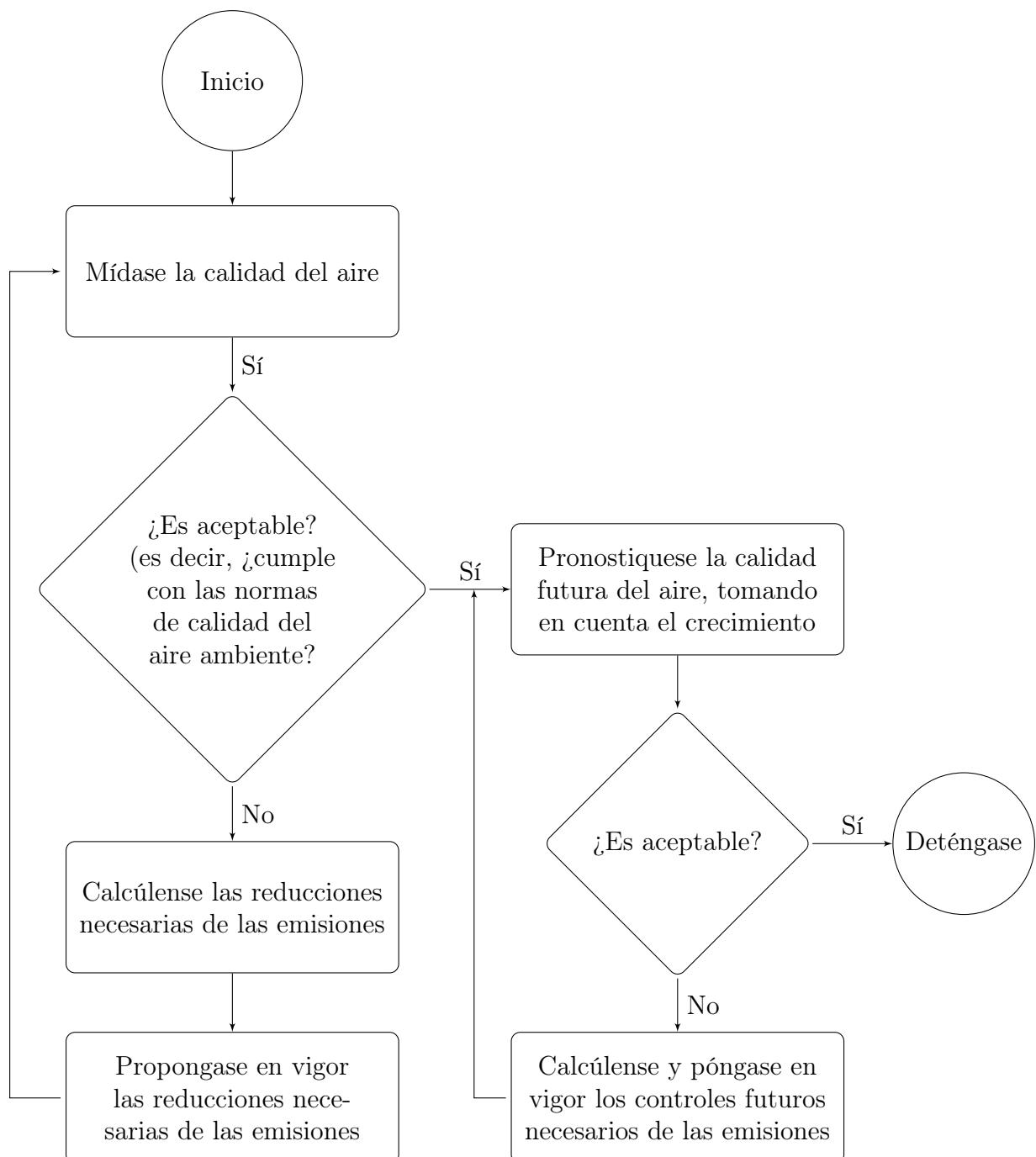


Figura 3.2: Diagrama de flujo que representa el proceso de la National Ambient Air Quality Standards. Tomada de: N. Nevers. *"Ingeniería de control de la contaminación del aire"*, McGraw-Hill interamericana editores (1998)

Capítulo 4

Mediciones de la contaminación del aire y modelos de concentración de contaminantes

4.1 Introducción

Para realizar las mediciones de la contaminación del aire, se deben realizar mediciones del ambiente y de las fuentes, teniendo en cuenta que cada una de ellas tiene una normatividad en específico. Además, se debe considerar el tiempo, lugar y concentración de las emisiones; para ello, se debe tomar una muestra representativa del aire del ambiente, lo cual hace necesario que el muestreador tenga una ubicación adecuada, generalmente localizada en lugares de acceso público, excluyendo las zonas interiores.³⁰

4.2 Mediciones de la contaminación del aire y análisis de su emisiones

Para hacer una muestra representativa, los instrumentos de muestreo generalmente tienen un tipo de filtro que les permite obtener mediciones del aire, excluyendo los materiales no deseados. También es importante que los gases que interactúan con el instrumento de muestreo no se condensen dentro de este y que la muestra tomada no interactúe con el medio ambiente o con el recipiente que la contiene; esto con el fin de evitar que la muestra sea afectada.³⁰

Finalmente, se debe determinar la concentración de contaminantes que hay en la muestra; generalmente esto se hace con instrumentos ópticos, en donde se hace incidir un rayo de luz con una longitud de onda determinada, esta reacciona con la muestra y se mide la onda de luz emitida; sin embargo, para realizar una comparación entre las normas de

calidad admitidas, es necesario realizar un promedio, en un intervalo de tiempo que este dentro de este tipo de normas. Esta concentración se puede determinar mediante:³⁰

$$C_{prom} = \frac{1}{\Delta t} \int c dt \quad (4.2.1)$$

Donde la concentración promedio C_{prom} depende de la concentración instantánea c indicada por el instrumento y el tiempo de concentración t . No obstante, no todos los instrumentos trabajan en tiempo real. Es por ello que estos instrumentos contiene generalmente un filtro, un dispositivo que mide el flujo y un compartimiento que aloja la muestra adecuadamente. Para este tipo de instrumentos, la concentración promedio está dada por:³⁰

$$C_{prom} = \frac{\text{Aumento en el peso del filtro}}{\text{Gasto del aire} \times \Delta \text{tiempo}} \quad (4.2.2)$$

Para los diferentes tipos de contaminantes existen diferentes métodos analíticos que permiten tener muestras que sean representativas para un contaminante de aire en específico.³⁰

El gasto de un contaminante permite determinar el flujo de contaminación existente; este se puede calcular mediante el producto de la concentración en el gas y el gasto molar o másico de este. Aunque es un cálculo sencillo de realizar, es necesario que el flujo del gas sea isocinético hacia la sonda de muestreo y de esta manera se pueda obtener una muestra representativa con el fin de evitar la pérdida o exceso de partículas en la boquilla por donde pasa el flujo de gas, debido a que esto provocaría que la concentración del contaminante pueda ser menor o mayor a la concentración real.³⁰

4.3 Emisiones

Existen conjuntos de datos publicados sobre los factores de emisiones; los cuales, son resultados de mediciones de emisiones tomadas en el pasado que resumen estas emisiones y permiten ser aplicadas fácilmente con el fin de conocer las estimaciones de emisiones y realizar el control respectivo de los contaminantes del aire. Sin embargo, existen 2 tipos

de factores de emisiones, en donde en uno de ellos se realizan estimaciones aproximadas, mientras que en el otro las estimaciones se apoyan completamente en la medición de los contaminantes. Gracias a estos factores de emisiones se puede desarrollar una estimación de emisiones de manera rápida y económica, teniendo en cuenta que se deben usar valores que sean confiables.³⁰

Anteriormente, se menciona que debido a la producción de contaminantes, la visión de las personas se podría ver afectada debido a que las columnas de humo se mezclan con el aire provocando que la concentración de las partículas aumente la opacidad de las columnas.³⁰

En el año de 1890 había personas adiestradas para realizar mediciones visuales de la opacidad de una columna de humo, esto debido a que antes de 1870 no existían normas sobre los contaminantes que estuvieran estimados de manera numérica. Sin embargo, estas mediciones desarrollaron un papel importante ya que gracias a estas se hizo obligatorio el control de la contaminación del aire; siendo este un método barato y sencillo que ayuda a controlar mejor la emisión de contaminantes. Aunque estas regulaciones de emisiones visibles ya no son muy utilizadas, aun son tenidas en cuenta. Relacionar la opacidad con el índice de emisión suele ser difícil debido a que hay mediciones que son muy variables según la fuente de contaminación y su lugar de origen.³⁰

4.4 Modelos de concentración de los contaminantes del aire.

Al realizar las mediciones correspondientes a los contaminantes del aire, es necesario que con estas mediciones se puedan pronosticar las concentraciones de los contaminantes y de esta manera crear un plan de desarrollo para el control de la contaminación en el aire; de tal forma que se cumplan las normas de calidad del aire establecidos por la ley. Para ello es necesario crear un modelo de concentración de los contaminantes del aire que logre hacer predicciones confiables.³⁰

En esta sección se estudiaran 3 modelos de concentración de contaminantes en el aire, teniendo en cuenta su confiabilidad y complejidad. La mayoría de modelos de concentración

ción de contaminación del aire se aplican a un contaminante en particular, debido a esto, ninguno de los modelos presentados en esta sección se emplea en la contaminación del aire en general.³⁰

4.4.1. Modelo de la caja fija

En este modelo se considera a la ciudad como una caja rectangular donde dos de sus lados son paralelos al viento. Para este tipo de modelos, se debe considerar que debido a la turbulencia atmosférica, todos los contaminantes están muy bien mezclados; su concentración y entrada son uniformes en toda la caja y el contaminante tiene una sola entrada que debe estar en dirección del viento, logrando de esta manera viajar con velocidad constante e independiente del tiempo. Además, los contaminantes solo tienen una entrada y salida y no se destruyen en el ambiente, tal como se muestra en la figura 4.1.³⁰

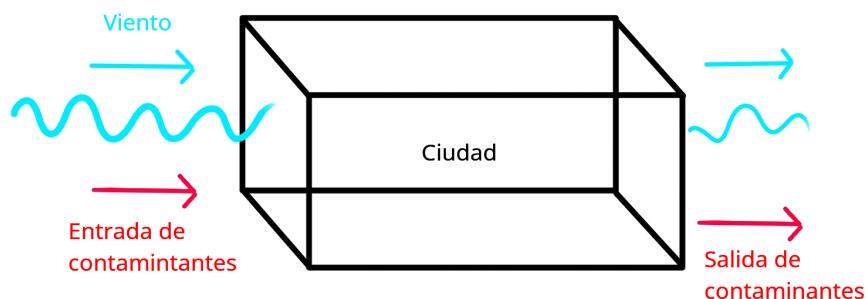


Figura 4.1: Modelo de caja fija. Adaptado de: N. Nevers.(1998). "Ingeniería de control de la contaminación del aire", McGraw-Hill interamericana editores.

Esto con el objetivo de que el flujo de entrada sea igual al flujo de salida de los contaminantes; lo cual, permite que la cantidad de contaminación en el aire sea constante durante las mediciones. Hay que considerar que la concentración de estos dos gastos de entrada es constante a pesar de que uno entre por la cara de la caja rectangular y el otro sea emitido por fuentes internas de la ciudad. Esto permite calcular la concentración del gas de forma sencilla. Sin embargo, si las anteriores condiciones no se cumplen, toda la hipótesis de la concentración será errónea.³⁰

Aunque este método sea sencillo, será necesario dividir la ciudad en zonas más pequeñas para calcular la concentración en cada una de estas. Además, dichos cálculos permitirán predecir concentraciones para una condición atmosférica en particular; por lo cual, es necesario realizar varios cálculos para hallar el promedio anual de concentración. Siendo más realistas, es necesario sumar abundantes condiciones atmosféricas y sus respectivos índices de emisión, teniendo en cuenta que estos índices pueden variar según la hora y el día de medición.³⁰

Como se puede observar, este es un método simple pero no aplicable a casos reales, lo cual hace que sus predicciones no sean exactas en todos los casos, por lo que su aplicación es más viable en ciudades que no tienen problemas graves de contaminación.³⁰

4.4.2. Modelos de difusión.

Estos modelos de difusión son aplicados a fuentes puntuales de emisiones de contaminantes; es decir, a fuentes que tienen un área tan pequeña que se pueden considerar como puntuales, aplicando de esta manera la idea gaussiana de una columna de humo, como podría ser una chimenea.³⁰

Para realizar la toma de datos, se deben realizar cálculos teniendo en cuenta la altura efectiva H (la altura de la chimenea + la altura en la que se empieza a dispersar el humo) como se puede observar en la figura 4.2. Las condiciones para este método se basan en la velocidad constante del viento, el cual es independiente del tiempo, lugar o altura. Además, se considera que estas columnas de humo se mezclan y dispersan en el aire debido a la turbulencia de la atmósfera, lo cual genera que al instalar un medidor de concentración de contaminación en un lugar determinado, la concentración oscilaría regularmente alrededor de un valor promedio.³⁰

Con el fin de calcular una columna de humo gaussiana se considera que la concentración inicial del contaminante es cero y al pasar por la chimenea se pasa hacia una región que tiene un alto grado de concentración; posteriormente, se verá un camino de contami-

nación en el aire que se dispersa por el mezclado turbulento de la atmósfera; esto hace necesario conocer el coeficiente de dispersión turbulento, el cual tiene diferentes valores para cada dirección.³⁰

Comúnmente este modelo se aplica a emisiones continuas; sin embargo, también puede aplicarse a fumaradas que pueden emitirse en accidentes graves como: plantas nucleares o químicas, además este modelo es aplicable a una erupción volcánica mediante un modelo de advección-difusión, el cual permite estimar los espesores de ceniza volcánica.^{23,30}

Para ciertas condiciones atmosféricas, se deben hacer modificaciones con el fin de centrarse en la contaminación más cercana al suelo, siendo estas concentraciones las que más afectan a las personas. Por otra parte, también se pueden idear métodos para aplicar este modelo a fuentes de área.³⁰

Generalmente, este modelo es descrito por la ecuación gaussiana:

$$c = \frac{X}{2(\pi t)^{1/2}} \exp \left[- \left(\frac{1}{4t} \right) \left(\frac{x^2}{k_x} \right) \right] \quad (4.4.1)$$

Esto debido a que sus términos exponenciales se asemejan a la función de distribución normal de gauss, además esta ecuación puede ser aplicada en 2 y 3 dimensiones. No obstante, este tiene muchas variables, lo que genera que los experimentos no concuerden con la teoría desarrollada, debido a su simplificación en las variables, además de que se considera a las fuentes de emisión como puntuales.³⁰

En la actualidad, este modelo no es aplicable a ciudades, solo se aplica en fuentes puntuales. Sin embargo, al igual que el anterior modelo, la estabilidad atmosférica es uno de los temas principales, por lo cual es difícil tener predicciones exactas.³⁰

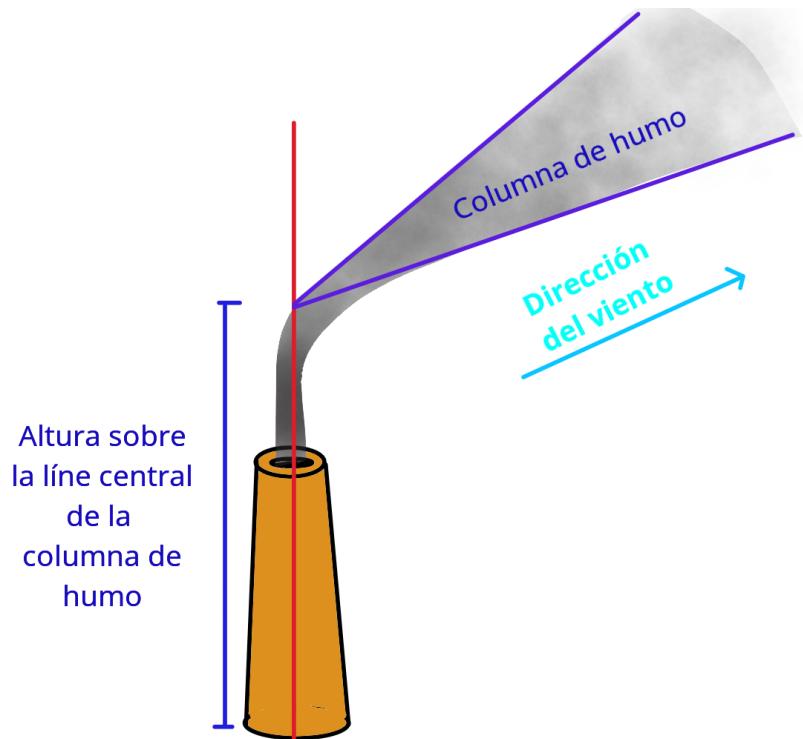


Figura 4.2: Modelo de difusión. Adaptado de: N. Nevers.(1998)."Ingeniería de control de la contaminación del aire", McGraw-Hill interamericana editores.

4.4.3. Modelo de celdas múltiples.

Este tipo de modelo divide la ciudad en varias celdas como se observa en la figura 4.3, cuyo tratamiento se realiza de forma individual; estas celdas tienen iguales proporciones y se ubican teniendo en cuenta el mezclado que genera la atmósfera y la altura determinada según cada ciudad.³⁰

Para determinar la velocidad de acumulación de los contaminantes se debe estimar, al igual que en los anteriores métodos, la velocidad y dirección del viento, emisiones de contaminantes, cambios químicos debido al mezclado y la acumulación de contaminantes.³⁰

Con ayuda de un programa y unos subprogramas se puede realizar una simulación sobre la contaminación del aire de uno o más días en una zona urbana; para ello se debe tener un historial de las estimaciones anteriormente mencionadas; todo esto con el fin de que este modelo pueda realizar predicciones sobre varias situaciones con diferentes condiciones

atmosféricas.³⁰

Este modelo es comúnmente utilizado para el ozono pero también puede emplearse para otros contaminantes; sin embargo, este modelo no es muy aplicable en lugares donde el problema de la contaminación no es muy grave o donde los contaminantes no sufren grandes variaciones en la atmósfera; esto debido a que la ausencia de datos y la complejidad de este sistema generarían predicciones con mucha dificultad.³⁰

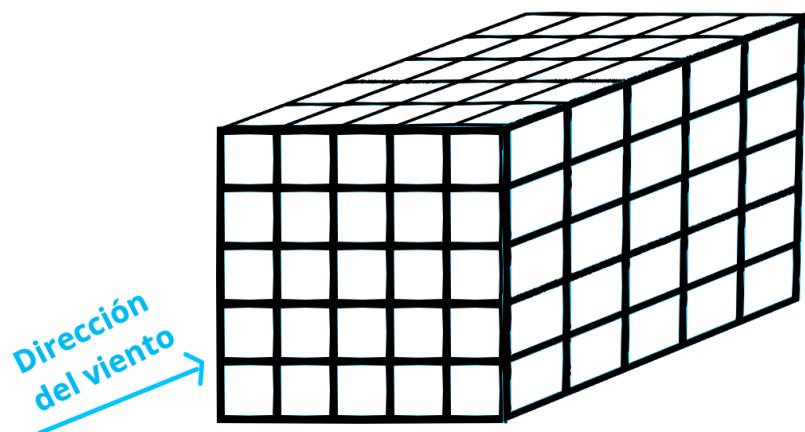


Figura 4.3: Modelo de celdas múltiples. Adaptado de: N. Nevers.(1998). "Ingeniería de control de la contaminación del aire", McGraw-Hill interamericana editores.

Los anteriores modelos se concentran en las emisiones de contaminantes emitidas por diferentes fuentes, teniendo en cuenta las condiciones atmosféricas del lugar; si se consideran los datos exactos sobre estas fuentes, se podrían realizar predicciones totalmente verídicas. No obstante, existen otros modelos que se enfocan en receptores, en donde se monitorea la contaminación emitida y se realiza el respectivo análisis para determinar la fuente de origen de un contaminante en particular, teniendo en cuenta que el contaminante no sea químicamente uniforme puesto que impediría determinar la fuente de emisión, teniendo en cuenta que pueden existir una o más fuentes que generen este tipo de contaminantes pero debido a su uniformidad química no se tendría la información suficiente.³⁰

En el momento de realizar el respectivo análisis de los datos mediante los diferentes

modelos, se tiene preferencia en los modelos que están dirigidos a los receptores, puesto que se tiene mayor confianza en la información de las distribuciones químicas que en los datos de las condiciones atmosféricas.³⁰

Capítulo 5

Naturaleza de los particularizas contaminantes

5.1 Introducción

Las partículas del aire contaminado generalmente pueden provocar que este sea visible; aunque no todas las partículas son químicamente uniformes, todo depende de su forma, característica y sus compuestos químicos. Por tal motivo, es importante resaltar que algunas partículas pueden ser más dañinas para el ser humano, para el ambiente o pueden afectar en menor o mayor grado la visibilidad.³⁰

5.2 Tipo de partículas

Existen 2 tipos de partículas de acuerdo a su fuente de origen; sin embargo, es necesario comprender algunas propiedades o características de las partículas que se relacionan con la contaminación del aire.³⁰

Las partículas esféricas tienen un diámetro que determina su tamaño, pero no todas las partículas son esféricas; no obstante, cuando se menciona su diámetro, se hace referencia al volumen del diámetro que tendría esa partícula si fuera esférica; es decir, que el diámetro de una partícula no esférica está dada por:³⁰

$$D = \left(\frac{6Volumen}{\pi} \right)^{1/3} \quad (5.2.1)$$

Generalmente el diámetro de las partículas está dado en unidades de micros, siendo que las partículas que aumentan en gran medida la contaminación del aire tiene un tamaño entre 0,01 y 10μ . Las partículas más pequeñas se generan debido al calentamiento

de metales y sales, lo que provoca que estas partículas se evaporen y condensen súbitamente en el aire. Es importante aclarar, que el elevado nivel de partículas finas en el aire se debe principalmente a las emisiones de vehículos, industrias y en la producción de energía,^{21,30} esto quiere decir que las partículas más pequeñas no se pueden obtener de procesos mecánicos como el triturado o el molido; por el contrario, estas partículas se obtienen por la condensación de los gases o también por combustión. Esto se debe a que muchos combustibles tienen materiales que son incombustibles, los cuales prevalecen después de la combustión; este tipo de materiales se denomina ceniza que por lo general se compone de óxidos de cilicio, aluminio, entre otros.³⁰

Una característica de las partículas finas es que naturalmente se adhieren por las fuerzas de enlace electrostático y de Van der Waals, estas fuerzas son alícuotas al área superficial de la partícula. Esta característica resulta beneficiosa para el control de contaminante en el aire, ya que cuando se aglomeran son más fáciles de capturar. Es posible forzar estas aglomeraciones, aunque también se pueden dar de forma natural en la atmósfera.³⁰

* **Partículas primarias.** Tienen un origen primario puesto que son producidas directamente desde una fuente que las emite hacia la atmósfera.^{21,30,40}

* **Partículas secundarias** Tienen un origen secundario ya que se originan de reacciones químicas en la atmósfera, debido a la interacción de gases como el SO_2 , NO_x , NH_3 y mezclas orgánicas gaseosas como hidrocarburos.^{21,30,40}

Es importante resaltar que las partículas más eficientes en la dispersión, son aquellas que tienen diámetros que se aproximan a la longitud de onda de la luz visible; es decir que tienen diámetros entre 0,4 M y 0,8 μ , estas partículas suelen ser de origen secundario.³⁰

5.3 Sedimentación de partículas.

Las partículas finas no permanecen por siempre en el aire, de acuerdo a su tamaño, estas pueden permanecer suspendidas en el aire por un corto periodo de tiempo o pueden

sedimentarse de forma muy lenta. Como se mencionó anteriormente, el objetivo es agrupar las partículas o polvo, con el fin de aumentar su tamaño, pero se debe tener en cuenta las fuerzas de retardo y sedimentación con la finalidad de realizar las mediciones necesarias.³⁰

5.4 Fuerzas de retardo

Sobre una partícula actúan diferentes fuerzas, como la fuerza de gravedad, la fuerza de retardo y la fuerza de empuje, estas dos últimas son generadas por el aire. Las fuerzas de retardo crecen cuando la velocidad de sedimentación es mayor. La velocidad de sedimentación generalmente se considera constante, por lo cual la fuerza neta sobre la partícula es igual a cero. Con el fin de hallar esta velocidad Stokes desarrollo una ecuación donde se relaciona la fuerza de retardo, el diámetro de la partícula y su velocidad.³⁰

Sin embargo, las hipótesis de Stokes no son aplicables para partículas muy grandes o para partículas muy pequeñas; dado a que si la partícula es grande, el movimiento del fluido provoca aceleración en esta, es decir que las velocidades externas no son despreciables, por lo cual la ecuación de Stokes ya no sería aplicable. Por otra parte, si las partículas son demasiado pequeñas su movimiento ya no sería continuo y cambiaría la interacción de la partícula con el fluido.³⁰

5.5 Funciones de distribución.

Anteriormente se mencionó que las partículas tienen diferentes tamaños, por lo cual se deben utilizar funciones de distribución, con el objetivo de describir la distribución de tamaños que pueden tener las partículas. Usualmente la distribución más utilizada es la Gaussiana o normal, debido a su representación con diversas cantidades de datos que se observan en una distribución; esta ecuación está dada por:³⁰

$$\frac{d\Phi}{dx} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - x_{media})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (5.5.1)$$

Donde Φ es el rango total de los tamaños de las partículas, x es una dimensión,
₃₂

x_{media} es el valor promedio de x y σ^2 es la varianza que para este caso se considera como constante. Sin embargo, es importante resaltar que estas funciones de distribución son aproximaciones que resultan útiles en la experimentación, pero no son totalmente reales o exactas en la naturaleza.³⁰

En algunos casos se utiliza distribuciones log- normales, ya que muchos fenómenos son muy bien representados por esta distribución y también se suelen usar distribuciones por peso y numero de partículas, aunque se pueden obtener una amplia variedad de respuestas. Debido a que la distribución log- normal es muy grande, las distribuciones por peso y número son más favorables.³⁰

5.6 Comportamiento de las partículas en el aire

Es importante tener en cuenta que, de acuerdo a lo anteriormente mencionado, las partículas entre 0,005 a 0,1 μ de diámetro entran a la atmósfera, debido principalmente a la condensación o combustión de diferentes materiales; estas partículas se aglomeran en montones a causa del movimiento aleatorio de las partículas en el aire. Esto provoca que se generen la mayor parte de partículas entre 0,1 a 1 μ de diámetro, pero este proceso suele ser muy lento; sin embargo, estas partículas también se generan por la interacción de la atmósfera con las diferentes emisiones de gases contaminantes.³⁰

Generalmente las partículas se pueden separar por la gravedad, debido a su tamaño o por separadores húmedos, es decir con ayuda de las nubes o la lluvia, lo cual evita que las partículas vuelvan a la corriente de aire. También es importante resaltar que existen los separadores por fuerza de inercia, en los cuales se usa la fuerza centrífuga para separar las partículas de aire, un claro ejemplo es un ciclón.³⁰

Los primeros picos de la figura 5.1 muestran las partículas secundarias generadas en la atmósfera por su interacción con gases contaminantes y el tercer pico muestra partículas primarias las cuales viajan a la atmósfera. Es por ello que se debe realizar un control de la emisión de gases contaminantes que puedan generar partículas de tipo secundario.³⁰

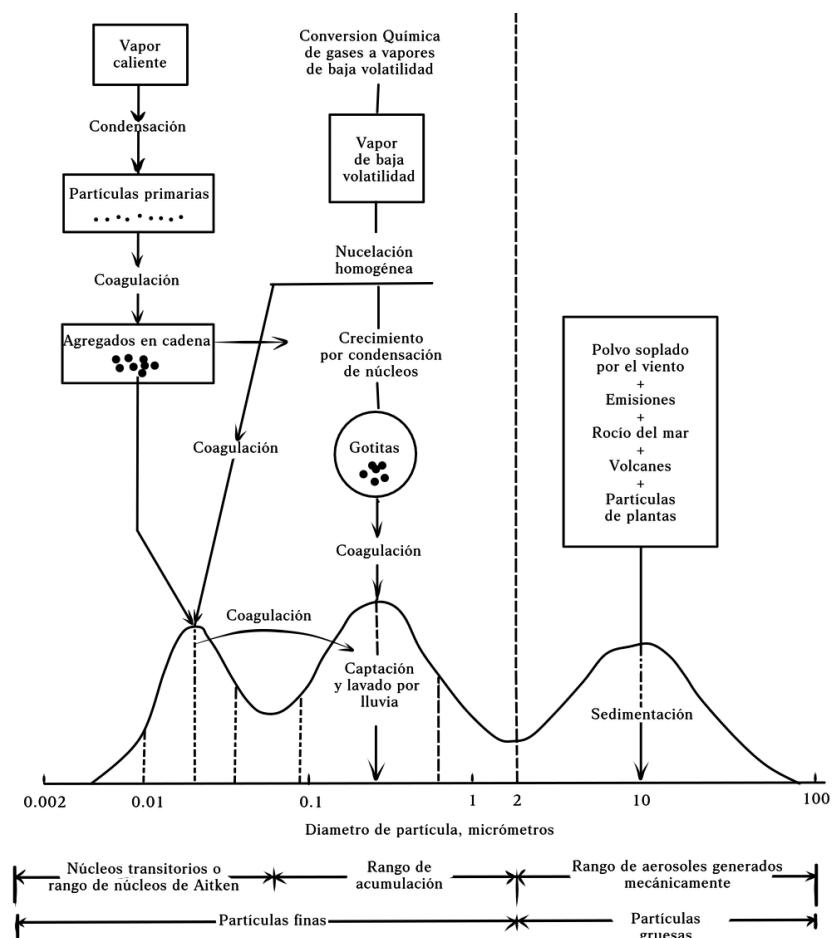


Figura 5.1: Una estimación de la distribución de las partículas, respecto al área superficial, en una atmósfera industrial según Whitby. Tomado de: N. Nevers.(1998)."Ingeniería de control de la contaminación del aire", McGraw-Hill interamericana editores.

Capítulo 6

Teoría de la interacción luz-atmósfera.

6.1 Introducción

La atmósfera proporciona el oxígeno que el ser humano necesita para vivir y se lleva el dióxido de carbono expulsado, por tal motivo, es muy importante su estudio. Además, es la encargada de filtrar los rayos de la luz solar, que pueden ser perjudiciales para la salud; asimismo, retiene parte del calor emitido por el sol. En general, la vida del ser humano depende en gran medida de las condiciones atmosféricas.¹³

Con ayuda de los fenómenos ópticos que se generan en la interacción de la luz con la atmósfera, se pueden adquirir vastos conocimientos sobre la atmósfera y los contaminantes que se encuentran en ella.¹³

6.2 Atmósfera

La atmósfera es una capa compuesta de gases y partículas finas que rodea a la tierra, esta se divide en diferentes capas, las cuales son: la exosfera, la termosfera, la mesosfera, la estratosfera y la troposfera, siendo esta ultima la capa en la cual se desarrollan la mayor parte de los fenómenos meteorológicos y también en donde se realizan la mayor parte de las acciones humanas, más exactamente en su subcapa denominada capa límite atmosférica o CLA. Debido a la turbulencia que se presenta en la CLA, el mezclado de gases y partículas se lleva a cabo en un corto periodo de tiempo, de una hora aproximadamente, lo que la hace importante para un muestreo, como se menciona en el capítulo anterior.⁸

La atmósfera terrestre se compone de un 78 % de nitrógeno, 21 % de oxígeno y un 1 % de otros gases, entre los cuales se encuentran los gases contaminantes, el vapor de agua, el ozono y las partículas finas. Las partículas también conocidas como aerosol atmosférico, que se encuentran suspendidas en la atmósfera en estado sólido o líquido, pueden afectar el clima del planeta; por lo cual, las condiciones de la atmósfera dependen de su composición, de la altura y la latitud en que se encuentren las partículas. La densidad, temperatura y presión varían de acuerdo a la altitud de la atmósfera, mientras que la intensidad de la luz solar depende de la latitud, por lo que se pueden obtener diferentes resultados al realizar mediciones; por consiguiente, las condiciones de la atmósfera no son iguales, sino que varían según el lugar de muestreo.^{8,13}

6.3 Intensidad de la luz

Cuando un haz de luz pasa a través de una sustancia con cierta cantidad de soluto, su intensidad se ve afectada; entre mayor sea la cantidad de sustancia y concentración de soluto menor será la intensidad de la luz. Esto se puede comprender de mejor manera con la siguiente figura, en donde se pueden observar tres diferentes situaciones.

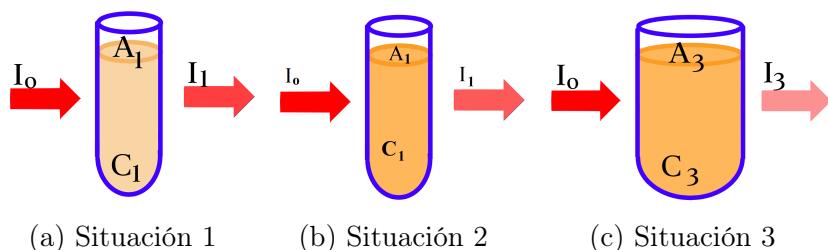


Figura 6.1: Luz emitida en sustancias con diferente concentración y diferentes recipientes
a) Menor concentración; b) Mayor concentración ; c) Mayor concentración y mayor área del recipiente

En la primera situación se tiene un recipiente de área A_1 con una baja concentración de soluto C_1 y al pasar el haz de luz su intensidad disminuye. Por otra parte, en la situación dos se tiene el mismo recipiente, donde $A_2 = A_1$ y la concentración de soluto es mayor ($C_2 > C_1$), por lo que al pasar un haz de luz a través de esta sustancia su intensidad se disminuye mucho más; por último, en la tercera situación se tiene un recipiente de mayor área A_3 que los anteriores casos pero con igual concentración de soluto que la sustancia

2 ($(C_3 = C_2)$, por ello la intensidad de la luz es mucho menor que en los anteriores casos; es decir:

$$I_3 < I_2 < I_1 \quad (6.3.1)$$

Este fenómeno también se puede explicar debido a la atenuación de la luz, es decir a la transmitancia, la cual se puede expresar por la ley de Beer-Lamberth:

$$T \equiv \frac{I}{I_o} \quad (6.3.2)$$

Donde I corresponde a la intensidad de luz transmitida y I_o es la intensidad de luz emitida hacia la sustancia. Sin embargo, esta atenuación también se debe a la absorción de radiación, siendo que ningún medio puede transmitir una radiación sin que haya perdida de energía, por lo cual, dicha perdida se debe a la absorbancia:²⁵

$$A = \xi C x \quad (6.3.3)$$

Donde ξ es el coeficiente de absorbancia, C es la concentración y x es la distancia que recorre el haz de luz. Aunque la absorbancia también depende de la transmitancia, es decir:

$$A = -\mathbf{Log}(T) \equiv -\mathbf{Log} \left(\frac{I}{I_o} \right) \quad (6.3.4)$$

Por lo tanto al relacionar las ecuaciones (6.3.3) y (6.3.4) se tiene la ecuación:

$$\xi C x = -\mathbf{Log} \left(\frac{I}{I_o} \right) \quad (6.3.5)$$

Teniendo en cuenta que $\mathbf{Log}B = \mathbf{Ln}B/\mathbf{Ln}10$, la ecuación (6.3.5) se puede escribir de la forma:

$$\frac{1}{\mathbf{Ln}(10)} \mathbf{Ln} \left(\frac{I}{I_o} \right) = -\xi C x \quad (6.3.6)$$

Teniendo en cuenta lo anterior se obtiene la siguiente ecuación:

$$I = I_o \mathbf{exp}(-\xi C' x) \quad (6.3.7)$$

Donde $C' = C \text{Ln}(10)$. No obstante, es importante recordar que la absorbancia depende de la longitud de onda, es decir $\xi = \xi(\lambda)$ y además la concentración depende de la distancia que recorra la luz y el tiempo, es decir $C = C(x, t)$ Por lo tanto, la ecuación (6.3.7) se puede expresar de forma general como:

$$I(\lambda, t', x) = I(\lambda, t, 0) \exp \left[- \int_0^x \xi(\lambda) C(x', t) dx' \right] \quad (6.3.8)$$

Esta corresponde a la ecuación de Beer-Lambert y describe cómo la intensidad de un haz de luz se reduce al pasar por diferentes medios,¹⁴ ya que esta depende de la intensidad inicial emitida por lo cual se tiene en cuenta el tiempo inicial t y el tiempo cuando el haz sale de la sustancia t' . De igual manera, se considera a $x = 0$ como el punto donde el haz de luz entró.^{8,14}

6.4 Interacción luz-atmosfera

Cuando la luz del sol llega a la tierra, inicialmente se propaga por la atmósfera, interactuando con las partículas y moléculas, pero mientras se propaga, su intensidad va disminuyendo debido a los fenómenos de dispersión y absorción que surgen a causa de la interacción de la luz con la atmósfera.⁸

6.4.1. Transmisión de la luz en la atmósfera

La trasmisión lineal de un haz de luz que se propaga en la atmósfera se puede expresar por la ley de Beer- Lambert, mencionada anteriormente:^{8,14}

$$I(\lambda, t', x) = I(\lambda, t, 0) \exp \left[- \int_0^x \xi(\lambda) C(x', t) dx' \right] \quad (6.4.1)$$

Sin embargo, es importante tener en cuenta que existen diferentes contribuciones de absorción y dispersión.

6.4.2. Fenómenos de absorción y dispersión

Existen diferentes coeficientes de absorción y dispersión que atenúan la intensidad del haz de luz; en general, el coeficiente que representa estas atenuaciones de luz está dado por:

$$\xi = \xi_a(\lambda) + \xi_R(\lambda) + \xi_M(\lambda) \quad (6.4.2)$$

Donde $\xi_a(\lambda)$ corresponde al coeficiente de absorción natural, $\xi_R(\lambda)$ es la dispersión de Rayleigh y $\xi_M(\lambda)$ es la dispersión de Mie.^{8,14}

- * Absorción natural: Se produce debido a la interacción de la luz con la atmósfera; en este caso, la absorción se genera a través de las moléculas y de las partículas o aerosoles. En algunas técnicas de medición, algunas longitudes de onda de la radiación emitida no se ven afectadas de modo drástico debido a la absorción; es decir que la absorción de la intensidad de la luz en ciertas longitudes de onda puede ser despreciable.⁸
- * Dispersión de Rayleigh: Este tipo de dispersión se presenta cuando un haz de luz emitido incide sobre una partícula, siendo que el tamaño de la partícula es menor a la longitud de onda de la luz. En esta dispersión hay absorción y emisión de ondas, ya que corresponde a una dispersión elástica de la radiación, puesto que el electrón es desplazado de su posición de equilibrio, pero este experimenta una fuerza restauradora. En general este fenómeno se debe al desplazamiento de los electrones por la perturbación del campo electromagnético de la radiación incidente; no obstante, también suele depender del ángulo de inclinación con el cual incide el haz de luz.^{7,8}
- * Dispersión de Mie: Aunque esta dispersión es similar a la de Rayleigh, esta se produce cuando la longitud de onda de un haz de luz es menor al de la partícula con la cual incide. Esta dispersión depende del tamaño, forma, índice de refracción y absorbtividad de las partículas con las cuales interactúa la luz. Este tipo de dispersión suele reflejar solo las ondas de longitud largas que inciden con un ángulo menor.^{7,8}

Capítulo 7

Tecnología LIDAR

7.1 Introducción

Existen diferentes técnicas de censado remoto atmosférico; para ello, se debe realizar una detección remota de la atmósfera sin entrar en contacto con esta. Generalmente, una detección remota hace referencia a las aplicaciones, técnicas de medida, procesamiento y análisis de la información obtenida, las cuales muestran las propiedades físico-químicas de los componentes de la atmósfera.^{8,20}

Este capítulo se limitara a describir un sistema de medición y detección mediante un sistema conocido como LIDAR, teniendo en cuenta que su principal aplicación será la realización de estudios atmosféricos.^{8,20}

7.2 LIDAR

La palabra LIDAR viene del acrónimo Ligh Detection and Ranging, el cual es un instrumento de medición activo, debido a que cuenta con su propia fuente de luz, la cual es emitida hacia el sistema que se va a estudiar para que luego parte de esta luz que ha interactuado regrese y sea detectada por un dispositivo detector. El principio físico en el cual está basado este sistema es la dispersión de la luz debido a las partículas o moléculas con las cuales interactúa.^{7,8,14,20}

7.2.1. Tipos de LIDAR

Los instrumentos que componen a un LIDAR se diferencian por el principio de medida que se basa de acuerdo a su interacción de la luz con la atmósfera; es así como se tienen

diferentes tipos de LIDAR:⁷

- * LIDAR Elástico: Su principio fundamental es la dispersión de Rayleigh y Mie, las cuales son dispersiones elásticas; en este tipo de lidar, no hay corrimiento entre las frecuencias que son emitidas y las detectadas. Esta técnica se usa comúnmente para la detección de nubes, capas de aerosol y para determinar la temperatura de la atmósfera. Además, este tipo de lidar suele ser el más pequeño, lo cual permite detectar movimientos estructurales o mapear la estructura de un lugar. Asimismo, este se suele usar también para el estudio de la contaminación del aire dado a su sensibilidad.
- * LIDAR Raman: Su principio fundamental es la dispersión inelástica Raman, es decir aquella en la cual surgen vibraciones y rotaciones. Algo que caracteriza a este LIDAR es que no necesita sintonizar la absorción, puesto que la información se obtiene a partir de los corrimientos de la frecuencia de emisión que se generan por la interacción de la luz con la atmósfera. Comúnmente este LIDAR es utilizado para medir la temperatura de la troposfera y en la parte baja de la estratosfera. También se suele utilizar para determinar la concentración de N_2 , O_2 y H_2O .⁷
- * LIDAR de Fluorescencia: Su principio físico se basa en sintonizar la línea de absorción del espectro que se quiere estudiar, es decir de la reacción de la luz con alguna molécula o partícula en específico. La fluorescencia irradiada es filtrada; sin embargo, existen varios factores que limitan estas mediciones cuando son realizadas en la noche y cuando el movimiento de la troposfera impide la emisión de esta fluorescencia. Por lo regular, este LIDAR se utiliza para estudiar procesos químicos que se relacionan con el deterioro del Ozono en la atmósfera.⁷
- * LIDAR de Absorción Diferencial (DIAL): Este LIDAR utiliza dos o más longitudes de onda, por lo cual, al entrar en contacto una de las ondas con una partícula o con otra que no ha sido absorbida se obtiene la diferencia de absorción debido al cambio de frecuencia entre las longitudes de onda. Comúnmente, este LIDAR se utiliza para determinar la concentración de gases en la atmósfera, tales como: NO , H_2O , O_3 , SO_2 y CH_4 .⁷

* LIDAR Doppler: Su principio físico se basa en el corrimiento Doppler, el cual se da en la señal recibida y se origina por el movimiento de las partículas. Por lo común, este LIDAR es utilizado para medir la velocidad que tiene el viento y permite diferenciar la señal originada por las moléculas y la señal originada por los aerosoles de la atmósfera.⁷

7.3 Funcionamiento y componentes de un sistema LIDAR

Un sistema LIDAR tiene diferentes componentes, tal como se puede observar en la imagen 7.1, pero se compone de tres subsistemas principales: el emisor, el receptor y el detector.^{7,7,8}

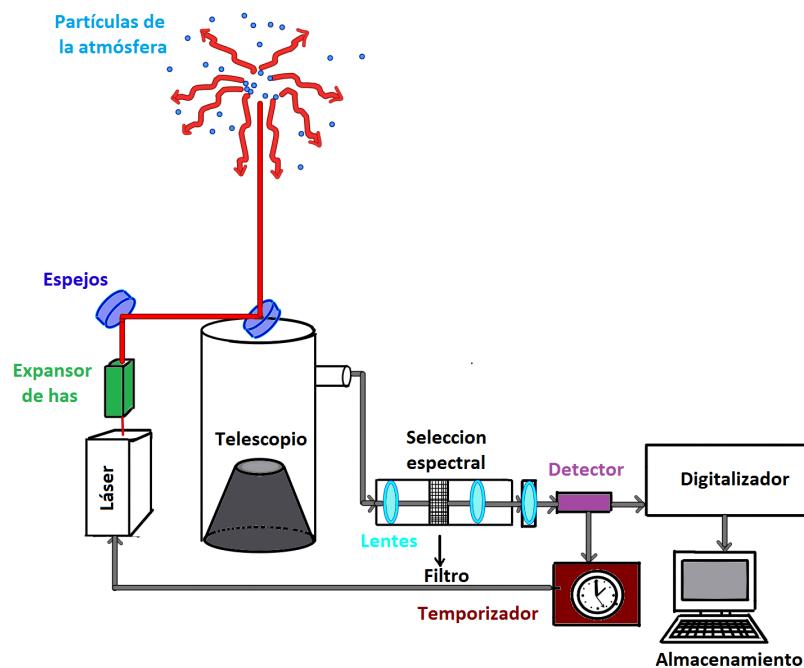


Figura 7.1: Esquemas básico de un sistema LIDAR^{7,14}

7.3.1. Sistema emisor

El propósito de este sistema es generar pulsos de luz y enviarlos hacia la atmósfera. Regularmente, este sistema utiliza un láser, un telescopio expansor y un espejo plano.

Láser

Este sistema utiliza un láser debido a las características que se presentan a continuación:^{7,8}

- * El haz de luz emitido es coherente ya que sus ondas están en fase.²⁵
- * Es monocromático, esto quiere decir que sus ondas tienen la misma longitud de onda.²⁵
- * Es paralelo, es decir, que su haz tiene una baja divergencia.^{8,25}
- * Es intenso, debido a que porta una gran cantidad de energía y emite pulsos de corta duración.^{8,25}
- * Tiene un ancho espectral muy angosto.⁸

El ancho espectral del láser, al ser tan angosto, filtra la radiación de fondo mediante filtros de interferencia. Además, al ser este un láser pulsado permite realizar un rastreo, cronometrando la señal dispersada usando un temporizador. Sin embargo, la longitud temporal de los pulsos debe ser menor a los 30ns y su frecuencia de repetición debe ser cercana a los 20KHz . Las longitudes de onda suelen depender de la aplicación del LIDAR; estas longitudes usualmente oscilan entre 250nm a $11\mu\text{m}$.^{7,8,14,20}

Telescopio expensor

Este sistema también cuenta con un telescopio expensor, el cual se encarga de garantizar la baja divergencia del haz de luz emitido por el láser y por consiguiente lograr aumentar el diámetro del haz. Este telescopio está compuesto por dos lentes, uno divergente y el otro convergente; la distancia que los separa uno del otro corresponde a la suma de sus distancias focales. Una característica de este telescopio es que se puede configurar el expensor de acuerdo al modelo de Kepler; no obstante, para trabajar con láseres es recomendable usar la configuración de Galileo, debido a que el haz de luz en el camino óptico del expensor no se enfoca en ninguna parte.
₄₃

Espejo plano

El espejo plano se encarga de redirigir el haz de luz del láser hacia la atmósfera. Generalmente, este debe estar orientado a un ángulo de 45° respecto a la horizontal ,con el fin de dirigir verticalmente el haz del láser hacia la atmósfera.^{7,8,14,20}

7.3.2. Sistema colector

Este sistema se encarga de recolectar y procesar la luz láser dispersada para luego dirigirla al foto-detector y convertirla en una señal eléctrica; este está compuesto de un telescopio y óptica especializada.

Telescopio

Usualmente, en este sistema se usan telescopios Newtonianos ya que son fáciles de alinear y además obtienen un enfoque más preciso porque cuentan con espejos primarios parabólicos. Por otro lado, el espejo secundario es plano y permite la salida del filtrado de radiación.^{7,8,14,20}

Óptica especializada

Está compuesta de un espejo elíptico que se encarga de recolectar la luz que ha sido dispersada, luego la enfoca en un espejo plano o en el espejo secundario del telescopio. Es importante resaltar que entre mayor sea el tamaño de la óptica primaria mayor será la efectividad del LIDAR; generalmente, esta óptica puede tener lentes y/o espejos.^{7,8,14,20}

En algunos casos se desea recolectar información de varias longitudes de onda, con el fin de obtener datos de las características espectrales que tiene la atmósfera; para ello, se suele utilizar divisores de haces dicroicos o monocromadores; además, es necesario el uso de filtros ópticos debido a que la luz de fondo puede contaminar los datos.^{7,8,14,20}

7.3.3. Sistema detector

Este sistema convierte la luz recolectada en una señal eléctrica y esta información es registrada en un computador.

Detectores

Comúnmente, en un LIDAR se emplean por una parte los tubos fotomultiplicadores (PMT), los cuales son sensibles a la luz visible y a la luz UV y por otra parte se emplean los fotodiodos de avalancha (APD), los cuales, son sensibles al infrarrojo; estos dos se encargan de realizar la conversión de la luz a señal eléctrica, en donde se mide su amplitud en función del tiempo para luego ser analizada. Sin embargo, la corriente que sale del detector es muy débil, por lo cual se usa el conteo de fotones, en donde se cuentan los intervalos de tiempo sucesivos para poder observar los pulsos. Hay que tener en cuenta que puede haber ruido en la toma de datos, por lo cual, los pulsos se cuentan realizando un análisis de su altura y de esta manera se puede diferenciar los pulsos que generan los fotones de aquellos pulsos que no son generados por estos. Usualmente, para disminuir el ruido, se promedia la señal de varios pulsos. Por lo general, se utiliza también dentro de este sistema un amplificador para amplificar la señal y un osciloscopio para poder observar las señales que se reciben en el telescopio, de esta manera, la corriente que proviene del PMT es registrada y digitalizada.^{7,8,14,20}

La sensibilidad del photocátodo es parte fundamental para la elección de un detector; sin embargo, esto también depende de otros factores como: la ganancia, el ancho de banda, el ruido, el volumen, el voltaje suministrado y la dinámica del ambiente.⁷

7.4 Ecuación LIDAR

La señal que llega al detector permite obtener información de la atmósfera, es decir, de las partículas que generaron la dispersión del haz de luz emitido. La ecuación LIDAR es aplicada a la potencia de la luz que recibe el detector, también conocida como potencia

retornada, la cual se puede describir por la ecuación:^{7,14}

$$P_r = \frac{P_t \cdot F(r) \cdot A \cdot K \cdot \rho \cdot e^{-2 \int_0^r \alpha_T(r') dr'}}{\pi r^2} \quad (7.4.1)$$

Por lo tanto, la potencia retornada depende de: la potencia transmitida (P_t), el factor de cruce óptico del haz, el cual es transmitido hacia el telescopio ($F(r)$) dependiendo del espacio que abarca la visión del telescopio en un rango (r), la eficiencia del sistema (K), lo cual permite determinar si el sistema está bien diseñado, la reflectividad del objeto (ρ) y del coeficiente de absorción total ($\alpha_T(r)$) en el rango r .^{7,14}

Como se puede observar, la potencia retomada es proporcional a la potencia transmitida y también al área que tiene el telescopio para recolectar la luz, pero es inversa al cuadrado del rango del objeto y a la ley de Lambert, la cual corresponde a la ecuación (6.3.8).^{7,14}

La eficiencia óptica del sistema también puede afectar la señal recibida, por lo que se debe desarrollar un buen diseño del sistema y esto es muy importante ya que el factor de cruce óptico depende del conjunto laser transmisor/telescopio, siendo que el haz de luz transmitido hacia el telescopio se cruza paulatinamente con el campo de visión del telescopio para luego ser enfocado por el detector. Este factor está dado por:¹⁴

$$F(r) = \frac{A(r)}{A_o} \quad (7.4.2)$$

Por lo cual, el factor de cruce óptico es proporcional al área efectiva del telescopio ($A(r)$) e inverso al área real (A_o).¹⁴

7.5 Laboratorios LIDAR en Colombia

En el territorio colombiano hay un LIDAR que opera desde diciembre del 2012 en la Universidad Nacional de Colombia con sede en Medellín, para el cual, el grupo de Láseres y Espectroscopia Óptica (GLEO), desarrolló un sistema LIDAR elástico el cuál se puede observar en la figura 7.2. Usualmente este LIDAR es utilizado para estudios de

la estructura atmosférica en la Zona urbana de Aburra.⁸

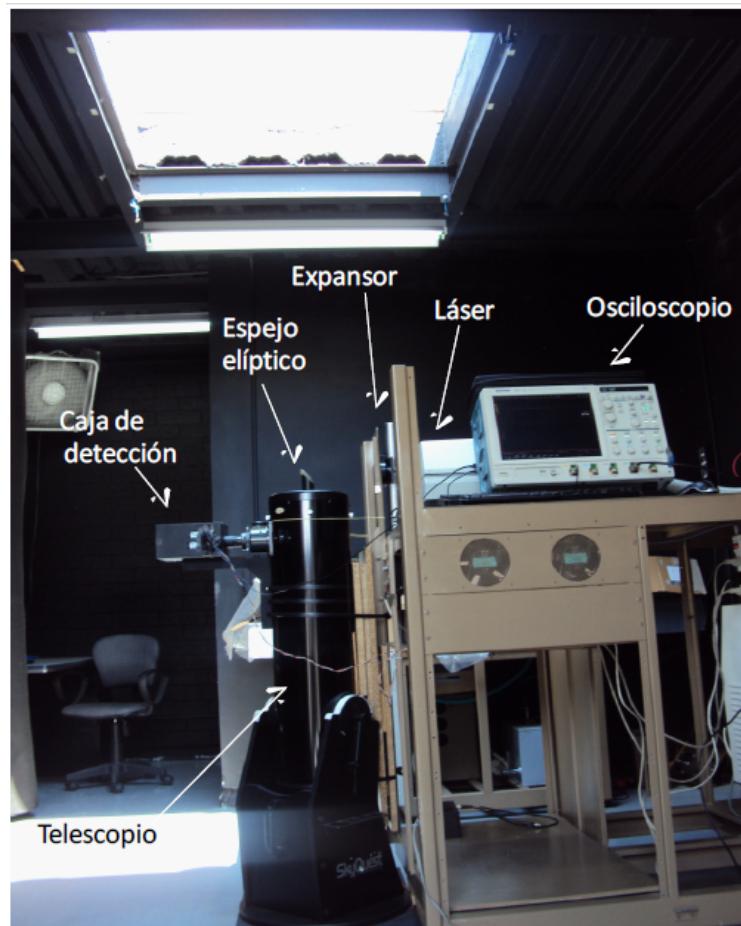


Figura 7.2: Fotografía de la estación LIDAR UNAL. Tomado de: D. Nisperuza. (2010). "Diseño y construcción de un sistema óptico de monitoreo atmosférico aplicado a la determinación de la capa límite atmosférica en la ciudad de Medellín".

Las características iniciales del sistema LIDAR UNAL se muestran en la tabla 7.1; sin embargo, se realizaron algunas mejoras en la infraestructura y en los métodos de procesamiento e inversión de la señal que proporciona el LIDAR. Por lo cual, es importante acondicionar este sistema de acuerdo al lugar y a las mediciones que se necesiten realizar. Cabe resaltar que gracias a este LIDAR se obtuvieron los primeros datos en Colombia para calcular la altura de la capa límite atmosférica en Medellín. Igualmente, se han realizado diferentes mediciones de la estructura atmosférica, las cuales han permitido desarrollar nuevas técnicas de medición y han sido útiles para la comprensión y el análisis de un sistema tan complejo como lo es la atmósfera de la zona urbana de Aburrá.⁸

Láser Nd: YAG	532nm
Max. Energía por pulso	200mJ
Longitud de pulsos	6ns
Frecuencia de repetición de pulsos	10Hz
Divergencia de haz	0,3mrad
Apertura del telescopio	8"
Detector	PMT
Registro	Osciloscopio Tektronix DPO 7104
Resolución espacial	30m

Tabla 7.1: *Características generales del sistema LIDAR UNAL en su configuración original. Tomado de: D. Nisperuza. (2015). Propiedades Ópticas de los Aerosoles Atmosféricos en la Región Andina Colombiana Mediante Análisis de Mediciones Remotas: LIDAR, Fotométricas y Satelitales".*

7.6 Laboratorio Lidar en la Universidad de Nariño

En la Universidad de Nariño es indispensable la implementación de un observatorio LIDAR para la realización de estudios atmosféricos, ya que este sistema es sencillo y eficaz para la realización de este tipo de estudios;^{7,8} asimismo, la sensibilidad de este sistema permite obtener datos mucho más precisos.

Inicialmente, es necesario considerar el costo que tendría la implementación de este sistema, para ello se puede observar los componentes del LIDAR con sus respectivos precios en la tabla 7.2.

El costo de LIDAR sería aproximadamente de \$321'000,000 de pesos, sin embargo hay que considerar también los costos que tendrían las instalaciones eléctricas, hidráulicas, redes y comunicaciones. Además, es necesario adecuar un lugar donde instalar el sistema, siendo que el haz del láser debe salir hacia el cielo, por lo cual, es necesario que sea un espacio que tenga una salida abierta hacia el cielo, pero en comparación a su costo, serían muchos los beneficios que adquiriría la Universidad de Nariño⁷

Componente	Especificaciones	Costo
Láser pulsado	LASER UV -VIS 355 / 532 NM	\$141.000.000
Monitor láser	Medidor de potencia láser	\$6'500.000
Expansor de haz	De Nd: YAG, verde y láser UV (1X-8X), tipo galileano	\$300.000
Mesa óptica	antivibracional y con soporte	\$30'000.000
Telescopio	Newtoniano reflector	\$10'000.000
Módulos de registro de transitorios	Grabador de transitorios, adquisición de conteo de fotones	\$28'000.000
Registro	Osciloscopio de alta resolución	\$12'000.000
Detectores	PMT (uno por cada línea espectral)	\$21'000.000
Partes ópticas	Espejo secundario, espejos láser, filtros, lentes UV-Nir y demás componentes	\$12'000.000
Aditamento Raman	Para un sistema LIDAR	\$20'000.000
Partes de optomecánica	Para la realización del montaje	\$9'000.000
3 Gafas de protección	Para láser pulsado Nd:YAG, UV-NIR	\$4'500.000
Equipo de Computo	Última generación para el almacenamiento y procesamiento de datos	\$17'200.000

Tabla 7.2: Componentes generales del sistema LIDAR, con sus respectivos precios. *Referencia de precios: Licel.com, Alibaba.com, AstroShoup.eu, Final Test.com.mx*

7.6.1. Beneficios

Son múltiples los beneficios que tendría la implementación de un sistema LIDAR, no solo para la universidad de Nariño, sino también para la ciudad de Pasto y para Nariño; algunos de los beneficios serían:

- * Adquirir mayor conocimiento sobre la atmósfera, mas específicamente desde la tropósfera hasta la ionósfera. Además de comprender, analizar y relacionar los efectos del comportamiento de la capa límite atmosférica sobre la ciudad de Pasto.
- * Realizar investigaciones sobre la producción de contaminación del aire, lo cual, permitiría tener una mayor control sobre las emisiones de contaminación e igualmente se podría desarrollar una normatividad que sea aplicable a las condiciones específicas de la ciudad de Pasto.
- * Investigar sobre las diferentes fuentes de contaminación que se dan en la atmósfera

en la ciudad de Pasto, lo cual, permitiría identificar dichas fuentes para tener mayor control sobre estas y reducir la contaminación que generan.

- * Desarrollar metodologías que permitan mejorar la comprensión de los datos adquiridos por el observatorio LIDAR; también se podría profundizar y desarrollar diferentes programas de computación para obtener un mejor análisis de los datos que sean más accesibles para las demás personas.
- * Llevar a cabo convenios con diferentes instituciones a nivel nacional, con el fin de compartir la información adquirida a través del observatorio LIDAR, como por ejemplo con la UNAL ya que esto permitiría una mejor comprensión del comportamiento de la atmósfera en Colombia; igualmente, esto permitiría realizar estudios más extensos y tener información más completa sobre la atmósfera, de esta manera se podría crear una red LIDAR en Colombia.
- * Permitir que los estudiantes de la universidad de Nariño tengan mayor experiencia a nivel de su formación, es decir, que al igual que la Universidad Nacional, se pretende que las diferentes investigaciones realizadas con el observatorio LIDAR den cavidad a investigaciones a nivel de pregrado y posgrado.⁸
- * Brindar mayor experiencia sobre la aplicación de técnicas de censado remoto atmosférico, no solo en el programa de física, sino también en aquellas facultades que estén interesadas en el tema y quieran adquirir el conocimiento necesario para realizar diferentes investigaciones en el campo de censado remoto.
- * Este observatorio también permitiría realizar sondeos sobre la cima del volcán galeras desde la Universidad de Nariño, con lo cual, se podría desarrollar diferentes estudios sobre el volcán y también sobre sus emisiones.

Capítulo 8

Conclusiones

Teniendo en cuenta todo lo visto en el presente trabajo de grado, se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- * Con el objetivo de mejorar la calidad del aire en una ciudad o región, se deben adoptar medidas preventivas y correctivas; para ello, es necesario realizar diferentes estudios que permitan identificar los contaminantes del aire y el daño que provocan en la comunidad.
- * Aunque en la actualidad no es posible eliminar toda fuente de contaminación del aire, es necesario hacer un seguimiento continuo sobre estas fuentes, principalmente en ciudades centralizadas como la ciudad de Pasto; de esta manera es posible disminuir los daños que ocasionan a las personas con el fin de preservar su salud. Además, es importante realizar estos seguimientos para tener un control más estricto sobre estas fuentes y desarrollar nuevas estrategias y tecnologías que permitan disminuir los niveles de contaminación en el aire.
- * Es necesario que todas las regiones de Colombia adopten un programa para mejorar la calidad del aire, reducir la concentración de contaminantes en la atmósfera y cumplir con la normatividad de calidad del aire. Para esto es necesario implementar nuevas tecnologías y técnicas de monitoreo que sean más factibles y precisas con la finalidad de obtener información más relevante de acuerdo a las características que tiene cada región del país. De esta manera, es posible identificar los problemas que se presentan en un lugar en particular y además buscar nuevas soluciones, principalmente para desarrollar nuevas estrategias relacionadas con la prevención de enfermedades causadas por la contaminación del aire.

- * Un observatorio Lidar es una opción muy factible para la realización de estudios atmosféricos, debido a su sencillez y eficacia; además, su sensibilidad permite obtener mayor información sobre la concentración de partículas, aerosoles u otros. Esto permite continuar con los procesos de generar, recopilar, analizar y modelar información para obtener el conocimiento necesario sobre el estado de la atmósfera y principalmente sobre la contaminación del aire que se genera a causa de las diferentes actividades que se realizan en la ciudad de Pasto.
- * Como se puede observar en el capítulo 6, las partículas secundarias pueden originarse debido a la emisión de contaminantes gaseosos como el SO_2 , NO_x , NH_3 y mezclas orgánicas gaseosas como hidrocarburos; por lo cual, es necesario que se estudie la emisión de estos gases y poder realizar el respectivo control con el propósito de disminuir la cantidad de contaminación generada.³⁰
- * Para la implementación de un sistema LIDAR es necesario conocer inicialmente las aplicaciones o usos que se le van a asignar a este; por lo cual, para la realización de estudios atmosféricos se debe implementar un sistema LIDAR elástico, el cual tiene como principio físico la dispersión de un haz de luz. Además, este tipo de LIDAR ya ha sido probado en Medellín con excelentes resultados. A pesar de ello, es necesario realizar más estudios que permitan diseñar un sistema eficiente para la ciudad de Pasto, con el cual se tenga datos más precisos y exactos.
- * El Sistema LIDAR será un beneficio para los profesores y estudiantes de la Universidad de Nariño, ya que permitirá realizar estudios e investigaciones sobre la atmósfera, lo cual conllevará a tener mayor conocimiento sobre esta y además proporcionará más datos e información para lograr entender el impacto ambiental que ha sufrido Colombia y más específicamente la ciudad de Pasto; por lo tanto, es primordial considerar los diferentes estudios relacionados con la calidad del aire y la contaminación que se genera en la actualidad.
- * La implementación de un sistema LIDAR, no solo será beneficioso para la Universidad de Nariño, sino que también lo será para la ciudad de Pasto y la comunidad

científica, puesto que se podrán realizar los respectivos estudios atmosféricos, centrándose en la contaminación del aire; lo cual, permitirá conocer el estado del aire y tener mayor control sobre las fuentes de contaminación del Aire.

Bibliografía

- [1] A. Aiuppa, L. Fiorani, S. Santoro, S. Parracino, M. Nuvoli, G. Chiodini, C. Mino-poli and G. Tamburello. (2015) *New ground-based lidar enables volcanic CO₂ flux measurements*. *Nature*, **5**, 13614
- [2] A. Bastidas, E. Rodriguez, F. Racedo, J. Morales, M. Jaramillo, (2003) "*Design of a Lidar System Applicable to the Study of Aerosols of Volcanic and Vehicular Origin in the Region of the Cauca - Colombia*". Memorias del Segundo Workshop Lidar Measurement in Latin-America .
- [3] A. Bastidas, E. Solarte, M. Jaramillo.(2001). "*Metodo Para Elaborar un Programa de Cómputo útil el Cálculo rápido de la Dipersión Mie Aplicable a la Técnica Lidar*". *Única Cauca Ciencia* **6** 113.
- [4] A. Colaco, J. Molin, J. Rosell-Polo and A. Escolá. "*Application of light detection and ranging and ultrasonic sensors to high-throughput phenotyping and precision horticulture: current status and challenges Horticulture*". *Nature*, **5**, 35 (2018).
- [5] C. Kirkeby, M. Wellenreuther and M. Brydegaard. "*Observations of movement dynamics of flying insects using high resolution lidar*". *Nature*, **6**, 29083 (2016).
- [6] CORPONARIÑO. "*informe día sin carro*"Mediciones de calidad de aire, Corporacion Autonoma Regional de Nariño. (2018)
- [7] D. Nisperuza. (2010). "*Diseño y construcción de un sistema óptico de monitoreo atmosférico aplicado a la determinación de la capa límite atmosférica en la ciudad de Medellín*". Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín.

[8] D. Nisperuza. (2015). *"Propiedades Ópticas de los Aerosoles Atmosféricos en la Región Andina Colombiana Mediante Análisis de Mediciones Remotas: LIDAR, Fotométricas y Satelitales"*. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Medellín.

[9] E. Solarte, C. Galindez, E. Montilla.(2006). "Pruebas de dispersión de luz láser por partículas atmosféricas sobre la ciudad de Cali". Revista de la Sociedad Colombiana de Física, 38-2, 798 .

[10] E. Montilla, A. Silva. and R. Hernández.(2016). *"Optical characterization of lower tropospheric aerosols by the Southern East Pacific Lidar station (Concepcion, Chile)"*. Applied Physics Letters, **92**.

[11] G. Bilmes. *"Láser"*, Colihue, Buenos aires(2008).

[12] G. Rodriguez. *"Ingeniería de haces láser: Propiedades, manipulación y aplicaciones"*. Researchgate publication 28314841 (2009).

[13] GLOBE. (2005). *"Investigación de la atmósfera"*.https://www.globe.gov/documents/10157/381040/atmo_chap_es.pdf

[14] H. González and J. Angulo. (2005). *"Teoría, diseño básico y señales recibidas por un sistema LIDAR para mediciones atmosféricas"*. *Ingeniería*, **10**, 2 .

[15] IDEAM. (2017). "Calidad del aire". <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>.

[16] IDEAM. (2018). *"Informe del estado de la calidad del aire en Colombia"*. <http://www.andi.com.co/Uploads/Informe%20estado%20calidad%20del%20aire%202018.pdf>

[17] IDEAM.(2018). *"Informe del estado de la calidad del aire en Colombia"*Ministerio de Ambiente y desarrollo sostenible. Primera edición http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023844/Informe_ECalidadl_Aire_2017

[18] J. Granados, O. Calzadilla, L. Medina, F. Tavera, G. López, J. Velázquez.(2006). *"La física y la problemática del medio ambiente"*.

[19] J. Romero. "El láser para la restauración de obras de arte". *La Ciencia y El Arte*, 1, 96 (2008).

[20] J. Salamanca, J. Nelson (2008)." *LIDAR, una tecnología de última generación, para planeación y desarrollo urbano*. Ingeniería, 13(1),67-76.

[21] J. Green,S. Sánchez.(2012)." *La Calidad del Aire en América Latina*". Clean Air Institute. https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialesyUrbana/pdf/contaminacion_atmosferica/La_Calidad_del_Aire_en_América_Latina.pdf

[22] J.Mirapeix, " *La importancia de la Luz en nuestras vidas*". Apuntes de la Asignatura. Universidad de Cantabria.

[23] J. Parra. (1991). Aplicación de un modelo de advección-difusión para dispersión de ceniza volcánica: erupción volcán Hudson. *Revista Mexicana de física* (45),466-471.

[24] L. Ponce. " *El laser en la medicina*". Researchgate publication 303841240 (2010).

[25] Llave de la ciencia, (1997). Diccionario de física (1.a Ed.). Bogotá, Colombia: Norma.

[26] M. Calvo." *Fotónica en un mundo global: una revisión de algunas modernas tecnologías de impacto actual*", 100CiasUNED, 8 (2016).

[27] M. Coromines , E. Blanco and A. Ruiz. Aplicación de la tecnología Lídar al estudio de la cubierta vegetal. Cuad. Soc. Esp. Cienc. For, 19,71-77(2005)

[28] M. Figueras. "Óptica y Fotónica: la ciencia de la luz". Editorial Universitat oberta de Catalunya (2011).

[29] MAVDT, (2008). " *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire*". <http://www.ideal.gov.co/documents/51310/527391/Protocolo+para+el+Monitoreo+y+seguimiento+de+la+calidad+del+aire/6a8d-4f3d-b210-011a45f3ee88>

[30] N. Nevers.(1998). " *Ingeniería de control de la contaminación del aire*", McGraw-Hill interamericana editores .

[31] O. González. (2017). "Simulador de un LIDAR elástico atmosférico para medir los niveles de concentración de aerosoles en la troposfera". *Acta Nova*, **8** (1), 76-93.

[32] O. Rangel, (2005) "La biodiversidad de Colombia. Palimpsestvs: Revista de la Facultad de Ciencias Humanas; No. 5 1657-5083

[33] OMS. (2005). "Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dÓxido de nitrÓgeno y el dÓxido de azufre".https://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02.pdf?sequence=1

[34] R. Baets, G. Roelkens. (2009). "Fotonica Photonics", Introduction. Editorial Universiteit Gent .

[35] Ruta n Medellín (2016). "Observatorio CT+i". Complejo Ruta N, Medellín-Colombia. <https://www.rutanmedellin.org/es/recursos/observatorio>.

[36] S. Galván. (2014). "El sistema LiDAR aplicado a la geomatica, generando modelos digitales de elevación"(tesis de pregrado). Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria.

[37] SyP. (2018). "¿Cómo afecta la calidad del aire interior a la salud?".<https://www.solerpalau.com/es-es/blog/calidad-aire-interior-salud/>

[38] SyP. (2018). "Consecuencias en la salud de los contaminantes ambientales"<https://www.solerpalau.com/es-es/blog/consecuencias-salud-contaminantes-ambientales/>

[39] SyP. (2018). "Filtros de aire industriales: tipos de filtros para la depuración del aire".<https://www.solerpalau.com/es-es/blog/filtros-aire-industriales/>

[40] SyP. (2018). "¿Qué son las partículas PM 2.5?".<https://www.solerpalau.com/es-es/blog/particulas-pm25/>

[41] T. Guélis, H. Chepfer, R. Guzman, M. Bonazzola, D. Winker and V. Noel. (2018). "Space lidar observations constrain longwave cloud feedback". *Nature*, **8**, 16570.

[42] T. Maiman. "Stimulated Optical Radiation in Ruby". *Nature*. 187 4736, 1960, p. 493-494.

[43] V. Rodriguez. "Análisis de cambios de usos del suelo en la Vega de Granada: correcciones radio métricas y evaluación del cambio". *Revista de Teledetección*, **34**, 5-15 (2015)