

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
MAESTRÍA EN QUÍMICA AMBIENTAL



**ESTIMACIÓN DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLAS A
PARTIR DEL APOORTE DE QUEMAS DE BIOMASA MEDIDOS
CON FOTÓMETROS DE LA RED MUNDIAL AERONET SOBRE
LA CIUDAD DE ASUNCIÓN (PARAGUAY)**

Edgar Aparicio López Rojas

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del grado de Magister en Química Ambiental. Departamento de Físicoquímica.

SAN LORENZO – PARAGUAY

Julio – 2021

**ESTIMACIÓN DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLAS A
PARTIR DEL APORTE DE QUEMAS DE BIOMASA MEDIDOS
CON FOTÓMETROS DE LA RED MUNDIAL AERONET SOBRE
LA CIUDAD DE ASUNCIÓN (PARAGUAY)**



EDGAR APARICIO LÓPEZ ROJAS

Orientador: Prof. Dr. Ángel Rincón

Co-orientador: Prof. Dr. Mariano Teruel

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Nacional de Asunción, como requisito para la obtención del grado de Magister en Química Ambiental. Departamento de Físicoquímica.

SAN LORENZO – PARAGUAY

Julio – 2021

López Rojas, Edgar Aparicio.

Estimación del espesor óptico de aerosoles a partir del aporte de quemas de biomasa medidos con fotómetros de la red mundial aeronet sobre la ciudad de Asunción (Paraguay). / Edgar Aparicio López Rojas. - - San Lorenzo, El Autor, 2021.

XI, 76 p.: fig.; 30 cm.

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Químicas – UNA para optar al título de grado de Magister en Química Ambiental.

1.AEROSOLES. 2. CALIDAD DEL AIRE.I. Título.

CDD: 557.14

L864e

**ESTIMACIÓN DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLAS A
PARTIR DEL APORTE DE QUEMAS DE BIOMASA MEDIDOS
CON FOTÓMETROS DE LA RED MUNDIAL AERONET SOBRE
LA CIUDAD DE ASUNCIÓN (PARAGUAY)**

EDGAR APARICIO LÓPEZ ROJAS

Aprobado en fecha **21** de julio de 2021

Tribunal Examinador:

Prof. Dr. Michel Osvaldo Galeano

FCQ/UNA



Prof. MSc. Diana Diez Pérez

FCQ/UNA



Prof. MSc. Sergio Méndez

FP/UNA



Prof. Dr. Fernando L. Fertoni

IBILCE/UNESP

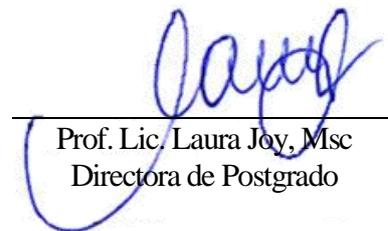
Docente Extranjero Invitado



Prof. Dr. Ángel Rincón
Orientador



Prof. Dr. Mariano Teruel
Co-Orientador



Prof. Lic. Laura Joy, Msc
Directora de Postgrado

Dedicatoria

A mis padres; Benigna y Aparicio

A mi hermano; David

A Rincón, Fertónani, Teruel

Mirla, Fati y Marecos

A Nimia y Ana

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca (Contrato N° 001/2018) para la Maestría en Química Ambiental (CONACYT – POSG-17-105).

Agradecemos a los Investigadores Principales y Co-Investigadores y a su personal por establecer y mantener las cuatro (4) estaciones de la red AERONET utilizados en esta investigación.

Al Laboratorio de Recursos del Aire (ARL) de la NOAA por la provisión del modelo de transporte y dispersión HYSPLIT y / o el sitio web READY (<https://www.ready.noaa.gov>) utilizado en esta publicación.

A los profesores Ángel Rincón, Fernando L. Fertonani y Fatima Yubero, por el acompañamiento constante, cuyos conocimientos prácticos me ayudaron a realizar la comprensión y análisis de los datos.

A mi tutor y a mi co-tutor, por la paciencia, el apoyo y la confianza.

ESTIMACIÓN DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLES A PARTIR DEL APORTE DE QUEMAS DE BIOMASA MEDIDOS CON FOTÓMETROS DE LA RED MUNDIAL AERONET SOBRE LA CIUDAD DE ASUNCIÓN (PARAGUAY)

Autor: EDGAR APARICIO LÓPEZ ROJAS

Orientador: ANGEL RINCON

Co-orientador: MARIANO TERUEL

RESUMEN

En la región Amazónica, que abarca en mayor extensión al Brasil y en menor a Bolivia, y la región del Gran Chaco, en el que se incluye a Bolivia, Paraguay y Argentina, utilizan el método tala y quema para uso de la tierra generando aerosoles que contaminan del aire (nubes) principalmente entre los meses de agosto-octubre. Los aerosoles son partículas sólidas o líquidas en suspensión, que residen en la atmósfera durante varios días, la propiedad óptica de los aerosoles como el Espesor Óptico de Aerosoles (AOD) es una medida de la dispersión y absorción de luz visible por las partículas presentes en una columna vertical de la atmósfera, siendo útil a los efectos de analizar la calidad del aire, porque es un valor proporcional a la concentración de partículas atmosféricas y que junto con el Exponente de Ångström (α), permite deducir el tipo de aerosoles presentes en la atmósfera. En este trabajo se analiza el espesor óptico de aerosoles generados del aporte de quemadas de biomasa en la ciudad de Asunción (Paraguay) y zonas aledañas, mediante datos de la red AERONET para las estaciones Ji Parana_SE, Cuiaba-Miranda, Santa_Cruz_Utepsa y CEILAP-BA, para el periodo noviembre 2018 y noviembre 2019. El aumento en la velocidad e intensidad de vientos describe la evolución mensual de los focos de incendios producidos en la región y su correlación con los valores del AOD. Un número máximo de focos de incendios detectados son generados en los meses de agosto y setiembre, que se corresponden con valores máximos de AOD y coeficiente de Ångström. Para los meses de agosto - setiembre, el máximo valor de AOD y coeficiente de Ångström estimado sobre Asunción (25,3 S; 57,6 W) fue 0,4143 y 1,5084. Estos valores son característicos del aerosol tipo; Quema de Biomasa. Se identificó que las direcciones del viento Norte (N), Noreste (NE), Noroeste (NO) y Sur (S) son las que provocan el transporte de la masa de aire contaminada sobre Asunción. Las trayectorias de las masas de aire, evaluadas para agosto, mes de máxima contaminación con aerosoles del tipo Quema de Biomasa, muestran un modelo de transporte de aerosoles sobre Asunción a metros sobre el nivel del suelo entre 100 y 500. Esto indica, que la ciudad de Asunción y zonas aledañas, están sometidas a importantes eventos de contaminación, generados en gran medida por fuentes externas.

Palabras-clave: *aerosol, espesor óptico de aerosoles, coeficiente de Ångström contaminación, incendios forestales, calidad del aire, trayectorias y masas en el aire.*

ESTIMATION OF THE OPTICAL DEPTH OF AEROSOLS FROM CONTRIBUTION OF BIOMASS BURNS MEASURED WITH PHOTOMETERS OF THE AERONET NETWORK OVER THE CITY OF ASUNCIÓN (PARAGUAY)

Author: EDGAR APARICIO LÓPEZ ROJAS

Advisor: ANGEL RINCON

Co-advisor: MARIANO TERUEL

SUMMARY

In the Amazon region, which covers Brazil to a greater extent and Bolivia to a lesser extent, and the Gran Chaco region, which includes Bolivia, Paraguay and Argentina, they use the slash and burn method for land use generating aerosols that pollute the air (clouds) mainly between the months of August-October. Aerosols are solid or liquid particles in suspension, which reside in the atmosphere for several days, the optical property of aerosols such as the Aerosol Optical Depth (AOD) is a measure of the dispersion and absorption of visible light by the particles present in a vertical column of the atmosphere, being useful for the purposes of analyzing air quality, because it is a value proportional to the concentration of atmospheric particles and that together with the Ångström Exponent (α), allows to deduce the type of aerosols present in the atmosphere. In this work, the optical depth of aerosols generated from the contribution of biomass burns in the city of Asunción (Paraguay) and surrounding areas is analyzed, using data from the AERONET network for the Ji Parana_SE, Cuiaba-Miranda, Santa_Cruz_Utepsa and CEILAP-BA stations, for the period November 2018 and November 2019. The increase in the speed and intensity of winds describes the monthly evolution of the sources of fires produced in the region and their correlation with the AOD values. A maximum number of sources of detected fires are generated in the months of August and September, which correspond to maximum values of AOD and the Ångström coefficient. For the months of August - September, the maximum value of AOD and Ångström coefficient estimated over Asunción (25,3 S; 57,6 W) were 0,4143 and 1,5084. These values are characteristic of the typical aerosol; Biomass burning. It was identified that the North (N), Northeast (NE), Northwest (NW) and South (S) wind directions are those that cause the transport of the contaminated air mass over Asunción. The trajectories of the air masses, evaluated for August, the month of maximum contamination with aerosols of the Biomass Burning type, show a model of aerosol transport over Asunción at meters above ground level between 100 and 500. This indicates that the city of Asunción and surrounding areas are subject to major pollution events, largely generated by external sources.

Keywords: aerosol, aerosol optical depth, Ångström coefficient, pollution, forest fires, air quality, trajectories and air masses.

INDICE

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABLAS.....	xi
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. Revisión de literatura	12
1.1.1. Aerosoles.....	12
1.1.1.1. Mecanismos de formación de especies de aerosoles	13
1.1.2. Impactos en el medio ambiente.....	16
1.1.2.1. Impactos en la salud.....	17
1.1.2.2. Impactos en la visibilidad	18
1.1.2.3. Impactos en los materiales y la vegetación.....	19
1.1.2.4. Impacto en el clima del planeta	19
1.1.3. Propiedades ópticas y su interacción entre aerosoles y radiación solar	21
1.1.4. Aerosoles y su actividad en quema de biomasa	23
1.1.5. Espesor óptico del aerosol (AOD)	25
1.1.5.1. Caracterización de aerosoles.....	27
1.1.6. Aerosoles y su actividad meteorológica.....	29
2. JUSTIFICACIÓN	31
3. OBJETIVOS	33
3.1. Objetivo General	33
3.2. Objetivos Específicos.....	33
4. MATERIALES Y MÉTODOS	34
4.1. Instrumentos de medición	35

4.1.1. Fotómetro Solar CIMEL CE318	35
4.2. Instrumentos para el modelado estadístico	37
4.3. Ubicación geográfica de las estaciones de recolecciones de datos.	38
4.4. Procesamiento de los datos recolectados de las estaciones.....	39
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	42
6. CONCLUSIONES	69
7. FUTURAS INVESTIGACIONES.....	71
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismos de interacción entre la radiación incidente y el aerosol.....	22
Figura 2. Espectro de la radiación solar.....	24
Figura 3. Operación del escenario Almucantar.....	36
Figura 4. Operación del escenario Plano Principal.....	36
Figura 5. Mapa de Estaciones.....	40
Figura 6. Gráfica Media mensual del AOD _{500nm}	45
Figura 7. Gráfica de Máximo de AOD _{500nm}	46
Figura 8. Gráfica Media mensual del coeficiente de Ångström($\alpha_{440-870nm}$).....	47
Figura 9. Gráfica de Clasificación de Aerosoles por estación.....	47
Figura 10. Gráfica de contorno Global de Clasificación de Aerosoles.....	48
Figura 11. Gráfica lineal de Media (Temperatura °C).....	49
Figura 12. Gráfica lineal de Media (Humedad %).....	50
Figura 13. Distribución Global de Humedad Relativa (%) y Temperatura (°C).....	51
Figura 14. Rosa de vientos SANTA_CRUZ_UTEPSA (SLVR).....	53
Figura 15. Rosa de vientos CUIABA-MIRANDA (SBCY).....	53
Figura 16. Rosa de vientos JI_PARANA (SBPV).....	54
Figura 17. Rosa de vientos CEILAP_BA (SAEZ).....	54
Figura 18. Rosa de vientos ASUNCIÓN (SGAS).....	55
Figura 19. Rosa de vientos GLOBAL.....	55
Figura 20. Gráfica de la distribución Focos de incendios mensuales.....	56
Figura 21. Distribución de la media Focos Incendios y Velocidad Vientos.....	57
Figura 22. Distribución de la media Focos Incendios e Intensidad de Vientos.....	57
Figura 23. Gráfica de la distribución de la media Focos de incendios y AOD.....	58
Figura 24. Trayectoria de evento contaminante SANTA_CRUZ_UTEPSA (SLVR).	59
Figura 25. Trayectoria de evento contaminante CUIABA-MIRANDA (SBCY).....	59

Figura 26. Trayectoria de evento contaminante JI_PARANA (SBPV).....	60
Figura 27. Trayectoria de evento contaminante CEILAP_BA (SAEZ).....	60
Figura 28. Trayectoria de evento contaminante Global.....	61
Figura 29. Distribución de AOD _{500nm} ; Focos Incendios vs meses periodo 2019.....	65
Figura 30. Gráfica de contorno Ångström ($\text{Å}_{(440-870\text{nm})}$) ₁₉ y AOD _{500nm} ₁₉	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Intervalo de valores de σS , σA y SSA vs del tipo de ambiente muestreado.	23
Tabla 2. Clasificación de aerosoles.	29
Tabla 3. Ubicación de las estaciones de recolecciones de datos.	39
Tabla 4. Tiempo de operación y datos procesados.	39
Tabla 5. Datos meteorológicos procesados.	41
Tabla 6. Datos focos de incendios procesados.	41
Tabla 7. Estadísticos descriptivos mensuales. Periodo de nov/2018 a nov/2019	42
Tabla 8. Intervalos angulares para clasificar la dirección del viento	52
Tabla 9. Escala de interpretación de correlación.	62
Tabla 10. Coeficiente de correlación entre las variables; AOD _{500nm} : espesor óptico de aerosoles, Coeficiente de Ångström ($\alpha_{440-870nm}$), °C: temperatura, %: humedad relativa, VV: velocidad del viento, DV: dirección del viento, FI: Focos de Incendios.	62
Tabla 11. Porcentaje (%) de variación explicado por el modelo.	64
Tabla 12. Modelo de regresión lineal múltiple.	64
Tabla 13. Estadísticos descriptivos mensuales para la estación SGAS (Asunción)..	65
Tabla 14. Ecuación de regresión R^2 (predictivo) = 64,75 %	67
Tabla 15. Datos de variables regresoras para la predicción de AOD _{500nm}	67
Tabla 16. Predicción de AOD _{500nm} y valores actuales del Fotómetro Cimel 318.	68

1. INTRODUCCIÓN

El estudio y monitoreo de los aerosoles atmosféricos en Paraguay se torna en una compleja actividad debido a los costosos instrumentos de medición para la adquisición continua de la información. Para poder contar con bases de datos para estudios de análisis de los contaminantes en un periodo de tiempo, se pueden ajustar modelos que estimen los datos faltantes en función de otras variables, como son las variables meteorológicas de superficie, entre ellas la temperatura (T), humedad relativa (HR), radiación solar (RS), presión atmosférica (P), velocidad y dirección del viento (VV, DV).

En definitiva, este trabajo estudió estadísticamente las mediciones del espesor óptico de aerosoles (AOD), al nivel 1.5 (datos corregidos automáticamente), efectuadas por los fotómetros solares CIMEL CE 318, provenientes de las estaciones (Ji_Parana_SE y Cuiaba-Miranda, en Brasil; Santa Cruz en Bolivia, CEILAP-BA en Argentina), para el periodo noviembre del 2018 – noviembre del 2019. Luego se correlacionó estos datos con focos de incendios y la meteorológica de superficie: velocidad del viento (VV), dirección del viento (DV), temperatura (T) y humedad relativa (HR), obteniéndose un modelo estadístico que describe el comportamiento mensual del espesor óptico de aerosoles (AOD) en la ciudad de Asunción (Paraguay), y zonas aledañas.

1.1. Revisión de literatura

1.1.1. Aerosoles

Según el IPCC, 2007 (Intergovernmental Panel on Climate Change) los aerosoles atmosféricos son catalogados como un conjunto de partículas sólidas y líquidas suspendidas en la atmósfera, unos de origen natural provenientes de las plantas, volcanes, mares y desiertos, y otros de origen antropogénico derivados de la actividad

humana como las industrias, emisiones vehiculares, y quemas de biomasa. Según su origen, evolución, y los procesos atmosféricos involucrados, el intervalo de tamaños de los aerosoles es muy variable, con radios que van de los $0,001 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$, es decir, desde agregados moleculares hasta partículas que por su tamaño pueden permanecer suspendidas en la atmósfera durante unas pocas horas o días, dependiendo de su tamaño, composición química, localización, y condiciones meteorológicas locales (Cholan, 2016). Su razón de mezcla, es decir, la cantidad de masa de aerosoles presente en una unidad de volumen de aire, también es variable, oscilando desde $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que se observa en los casquetes polares o en la troposfera oceánica libre, hasta los $1000 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que se observan en las tormentas de arena o en los humos cargados de ceniza de los incendios forestales (A. R. Martínez, 2011).

El aerosol es un contaminante atmosférico de origen primario o secundario. Los aerosoles primarios son formados por la emisión directa de las partículas desde su fuente y los secundarios son producto de la oxidación atmosférica de precursores presentes en ella por una de las tres especies químicas reactivas presentes en trazas en la atmósfera: el radical hidroxilo ($\bullet OH^-$), el ozono (O_3), y el radical nitrato ($\bullet NO_3^-$). Los precursores son emitidos durante la combustión de madera y combustibles fósiles, uso de solventes, emisiones de los vegetales y por los océanos, estos incluyen a compuestos como dióxidos de azufre, dióxido de carbono, hollín, alquenos, hidrocarburos aromáticos y fenoles (Jacobson & Hansson, 2000).

1.1.1.1. Mecanismos de formación de especies de aerosoles

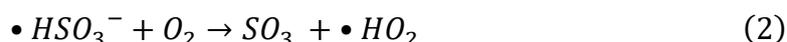
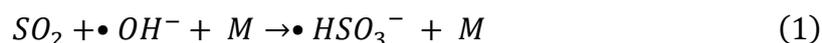
La precipitación del agua es, sin lugar a dudas, el mayor mecanismo de remoción de partículas y aerosoles de la atmósfera. Al mismo tiempo, las gotas de agua proveen un inmejorable medio para las reacciones en fase acuosa. Algunas especies gaseosas se disuelven en el agua de las nubes y reaccionan dando productos que permanecen como aerosoles aún después de que las nubes se hayan disipado; como, por ejemplo, la disolución del SO_2 , su ionización y su subsiguiente oxidación a sulfato. Estas especies pueden atraer especies gaseosas adicionales como amoníaco y agua a los aerosoles y por tanto incrementar la masa de estos. Es por lo anterior que el procesamiento de los aerosoles mediante nubes que no hayan precipitado representa el mecanismo por el

cual las partículas atmosféricas pueden crecer durante su residencia en el aire (NAPAP, 2005).

El aerosol de sulfato presente en el ambiente puede ser primario (emitido a la atmósfera como partícula de sulfato o SO_3 en fase gas, o H_2SO_4 , especies que en realidad se condensan para formar partículas) o secundario (material que se transforma a partir de una fase gaseosa a un aerosol seguido de una reacción química de SO_2 u otros gases azufrados como el Dimetil sulfuro para formar SO_3 , H_2SO_4 o SO_4^{-2} en solución). Las partículas de aerosol de Dimetil Sulfuro biogénico juegan un papel en el balance global de radiación, directamente a través de la dispersión de la radiación solar, e indirectamente como NCN en la atmósfera marina (Osorio et al., 2013). El DMS es un gas muy volátil, fuente principal de sulfuro reducido en la troposfera, presente en suficiente cantidad como para contribuir de manera importante al sulfuro atmosférico (Osorio et al., 2013). La mayoría del aerosol de sulfato presente en la troposfera es secundario, formado a partir del SO_2 .

La oxidación atmosférica de SO_2 toma lugar tanto en fase gaseosa como en fase acuosa. El principal mecanismo de formación en fase gaseosa es el dado por una reacción inicial de hidroxilos, y en cambio, la principal reacción de formación en fase acuosa se da mediante especies oxidantes (principalmente H_2O_2 , O_2 y O_3) seguidas por una combinación con las nubes, resultando en la formación del aerosol. Por ello se dice que la evaporación puede ser la mayor ruta de producción de aerosoles sulfatados en la atmósfera (Saxena & Seigneur, 1987). Las proporciones de las aportaciones de aerosoles sulfatados entre ambas fases no han sido bien establecidas todavía.

La oxidación del SO_2 se da mediante una secuencia de reacciones iniciada por la reacción del $\bullet OH^-$ con el SO_2 :



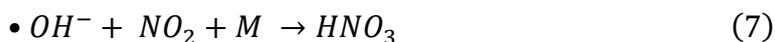
El H_2SO_4 subsiguiente se adiciona a las demás partículas o puede nuclearse para formar nuevos aerosoles.

La conversión en fase acuosa del SO_2 disuelto a sulfato es quizás la transformación química más importante en el agua de las nubes. La disolución de SO_2 en agua da como resultado la formación de tres especies químicas: SO_2 hidratado (SO_2H_2O), el ión bisulfito ($\bullet HSO_3^-$) y el ión sulfito ($\bullet SO_3^{-2}$).



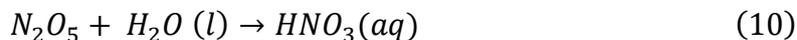
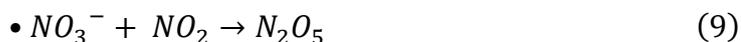
Por una analogía con el sistema sulfato, las fuentes de nitratos en aerosoles pueden ser distinguidas como primarias y secundarias, tanto en fase gaseosa como acuosa. Sin embargo, debido a que las emisiones primarias de ácido nítrico (HNO_3) se consideran muy pequeñas, la discusión presente se enfoca en los mecanismos de producción *in situ* en la atmósfera (Warneck, 1988).

El principal mecanismo de producción de nitratos en fase gaseosa es la reacción del radical hidroxilo ($\bullet OH^-$) con el dióxido de nitrógeno (NO_2) para formar HNO_3 (Rivela, 2013):



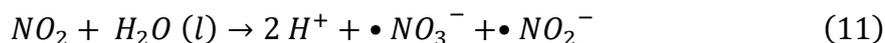
La reacción del $\bullet OH^-$ con el NO_2 es aproximadamente 10 veces más rápida que la reacción del $\bullet OH^-$ con el SO_2 . Sin embargo, el NO_2 es principalmente convertido a HNO_3 y la conversión de SO_2 a H_2SO_4 es retardada por la reacción del NO_2 .

La segunda vía en importancia para la formación de HNO_3 tiene lugar en fase acuosa y que involucra N_2O_5 y el radical $\bullet NO_3^-$ que se forma en consecuencia de la reacción del NO_2 con O_3 (Gibilisco, 2016):



La reacción del N_2O_5 con vapor de agua tiene lugar lentamente, pero la reacción con agua condensada en gotas en las nubes, en la neblina o en la superficie de partículas húmedas tiende a ser rápida (Tuazon, Atkinson, Plum, Winer, & Pitts, 1983). La reacción entre el N_2O_5 y el $H_2O (l)$ tiende a ser rápida e irreversible.

Algunas mediciones de campo que han comparado la composición química de las gotas de agua en nubes y lluvia en el aire circundante a una zona determinada han sugerido que los óxidos de nitrógeno se transforman a HNO_3 en la fase acuosa mediante la siguiente reacción (Fegueruelo & Marino, 2004):



Los aerosoles carbonados están compuestos por productos carbonosos de la combustión como el carbono elemental (CE). El carbono elemental (CE), también conocido como carbón negro o grafito tiene una estructura química similar al grafito impuro y es emitido directamente a la atmósfera principalmente durante los procesos de combustión. El CE es un fuerte absorbente de radiación en el rango visible y es uno de los mayores responsables de la absorción de la luz por parte de las partículas atmosféricas (Díaz, 2016). Los incendios forestales o quemas de madera y la combustión de diésel son las mayores fuentes de CE. La participación del CE en las reacciones químicas atmosféricas con SO_2 , O_3 y NO_2 ha sido sujeto de diversos estudios, los resultados encontrados sugieren que las reacciones del NO_2 en presencia de SO_2 contenido en aerosoles carbonados pueden ser una fuente de HNO_3 en el ambiente urbano (Setzer & Pereira, 1991).

1.1.2. Impactos en el medio ambiente

Al tratarse de un contaminante atmosférico genera impactos en el medio ambiente, deteriorando la calidad del aire, lo que ocasiona efectos adversos en la salud, visibilidad (tráfico en carretera, aviación, etc.), destrucción de la vegetación y los

materiales (deposición ácida) y alteración del clima del planeta (forzamientos radiativos que alteran el balance radiativo tierra-atmósfera).

1.1.2.1. Impactos en la salud

Los contaminantes atmosféricos ingresan al cuerpo humano a través del sistema respiratorio. Las partículas más finas, con mayor posibilidad de ingresar más profundamente en el tracto respiratorio, son generalmente las que más contribuyen a los efectos adversos en la salud humana. Estas partículas pueden producir alergias y problemas respiratorios (Dockery, 1994) cuando estos penetran en los pulmones al respirar. Además, pueden penetrar en el torrente circulatorio y lesionar diversos órganos o provocar intoxicaciones generales.

Los efectos adversos en la salud humana que los aerosoles ocasionan dependerán de la cantidad de partículas que penetran en los pulmones al respirar, así como de su tamaño y composición, propiedades que están directamente relacionadas con el origen de los aerosoles. Por otro lado, los efectos varían con la intensidad y duración de la exposición a la que son sometidos los seres humanos y la edad y la condición sanitaria de los individuos expuestos. La población con mayor riesgo de sufrir efectos adversos incluye a niños, embarazadas, personas mayores de 65 años y personas con enfermedades cardiovasculares y/o respiratorias preexistentes (Lara, 2018).

Estudios de correlación del espesor óptico de aerosoles con las infecciones respiratorias agudas (IRAs), han demostrado que estas dos variables guardan una relación baja, sin embargo, estudios de casos de IRAs estarían más relacionadas con otros factores de riesgo como la climática (Gonzalez, 2020).

En estudios epidemiológicos se han observado asociaciones consistentes entre las concentraciones ambientales de material particulado y la morbilidad, encontrándose efectos claros en la disminución del flujo espiratorio máximo a la exposición de clases de partículas finas y ultrafinas. Las partículas ultrafinas son relevantes para la salud humana, las mismas durante los últimos años se han incrementado de manera constante (Wichmann & Peters, 2000).

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación atmosférica constituye un riesgo medioambiental para la salud y estima que causa alrededor de siete millones de muertes prematuras al año en todo el mundo (OPS/OMS, 2016). Informes de esta organización indican que la exposición crónica a partículas aumenta el riesgo de enfermedades cardiovasculares y pulmonares. Además, se estima que una reducción de 70 a 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de partículas en suspensión puede evitar el 15% de las muertes relacionadas con la calidad del aire. Según la OMS, la mortalidad en ciudades con elevados niveles de contaminación supera entre un 15 y un 20% la registrada en ciudades más limpias, disminuyendo la esperanza de vida promedio (Obregon, 2012).

En la actualidad la OMS, Sociedades científicas y especialistas en aerosoles implicadas en la prevención de los factores ambientales que influyen en la salud han publicado un llamamiento para que las agencias y autoridades sanitarias adopten medidas preventivas para reducir la transmisión aérea por bioaerosoles (gotas respiratorias pequeñas que se emiten al hablar, respirar, gritar, cantar, toser o estornudar), en el marco de estudios epidemiológicos retrospectivos de los brotes recientes de COVID-19 que confirman la necesidad de tener en cuenta el grado de participación de la vía de transmisión aérea como una vía más de transmisión (Vargas & colaboradores, 2020).

1.1.2.2. Impactos en la visibilidad

El otro impacto de este contaminante consiste en la reducción de la visibilidad. La atenuación de la luz producida en la atmósfera por el fenómeno de la dispersión es la principal causante de ella. La visibilidad puede considerarse como la mayor distancia a la cual podemos ver un determinado objeto en contraste con el cielo (fondo) en el horizonte. La visibilidad se reduce cuando la dispersión es grande debido a la existencia de una gran concentración de partículas atmosféricas entre el objeto y el observador. Estas partículas dispersan la luz del sol hacia otras direcciones lejos de la línea de visión que une el objeto y el observador. Esta luz dispersada disminuye el contraste entre el objeto y el fondo bajo el cual se ve, y eso es precisamente lo que consideramos una pérdida de visibilidad (Radojevic & Harrison, 1992). Algunas de

las partículas que más influencia tienen sobre la visibilidad son las de sulfato amónico, ácido sulfúrico y partículas orgánicas.

1.1.2.3. Impactos en los materiales y la vegetación

Los aerosoles deterioran los materiales de construcción y recubrimientos, debido a la deposición en la superficie y su interacción con ellos. La transformación de estos materiales viene dada por la reacción de especies químicas como el dióxido de azufre o los óxidos de nitrógeno (SO_2 , NO_x) presentes en el aerosol con materiales pétreos deteriorando estos últimos. Por ejemplo, la interacción en medio acuoso entre SO_2 y el carbonato cálcico presente en la piedra tiene como resultado la formación de costras de yeso (denominadas costras negras). Además, la reacción de los aerosoles depositados en el substrato puede dar lugar a graves problemas de corrosión de los materiales, especialmente en el caso de estructuras metálicas (Gonzales Ríos et al., 2018).

Los efectos en los ecosistemas se incrementan cuando los aerosoles actúan como sustratos para otros contaminantes atmosféricos, depositándose en la superficie terrestre, bien por deposición seca o húmeda. La deposición ácida puede provocar la acidificación de suelos con los efectos adversos correspondientes en bosques y cultivos. La deposición de nitratos contribuye a la eutrofización de aguas superficiales, lo cual puede repercutir sobre la composición de aguas subterráneas y sobre la vida de animales acuáticos (Palacios Peña, 2014).

1.1.2.4. Impacto en el clima del planeta

El balance radiativo de la Tierra viene definido por la relación existente entre la entrada de energía, que puede ser reflejada y absorbida, y la energía que emite el sistema de la Tierra. Basado en el principio de la física de la conservación de la energía, este balance de radiación representa la diferencia entre la radiación entrante, que es casi en su totalidad la radiación solar, y la radiación saliente, que es parte de la radiación solar reflejada y parte de la radiación emitida por el sistema de la Tierra, incluyendo la atmósfera. Cambios en este balance pueden hacer que la temperatura de la atmósfera aumente o disminuya y eventualmente puedan afectar al clima del planeta (García Cueto, Santillán Soto, & Ojeda-Benítez, 2012).

Por lo tanto, el aerosol atmosférico interactúa con la luz solar mediante la dispersión y absorción de la radiación solar, la cual tiene un papel importante en el balance radiativo terrestre. Las partículas de aerosol pueden tener un efecto de enfriamiento como de calentamiento del aire de la capa atmosférica en la que se encuentra, dependiendo de sus propiedades ópticas. Los principales mecanismos que influyen en el balance radiativo terrestre son la dispersión y la absorción de la radiación solar (el llamado efecto directo); y la modificación de las nubes y las precipitaciones, afectando tanto a la radiación como a la hidrología (denominado efecto indirecto). Los aerosoles que dispersan la luz hacen aumentar el brillo del planeta, produciendo una influencia de enfriamiento, igual que los que aumentan la reflectividad de las nubes. Por su parte, los aerosoles de absorción de luz, tales como el carbón elemental, ejercen una influencia de calentamiento.

El efecto radiativo directo de los aerosoles en la atmósfera es la dispersión y absorción de radiación solar. La dispersión (o en inglés, “scattering”) devuelve al espacio una fracción de la radiación solar incidente. En conjunto, nubes, gases y aerosoles devuelven al espacio el 22% de la radiación solar. El efecto directo en general supone un enfriamiento del sistema climático, debido a la reducción en el flujo de la radiación, donde la temperatura de la superficie es directamente afectada, con potenciales alteraciones también en la precipitación, humedad del aire y del suelo, circulación atmosférica¹ (Serpa, Giraldo, & Torres, 2015).

Los denominados efectos indirectos denotan los cambios producidos por los aerosoles en las nubes. Cuando se habla de los efectos indirectos de los aerosoles, se distinguen dos efectos:

En primer lugar, las partículas de aerosol funcionan como núcleos de condensación de nubes (NCN), por lo que las gotas de nubes se forman por la condensación del vapor de agua en una partícula de aerosol (Artaxo et al., 2006). Por lo tanto, en presencia de gran cantidad de aerosoles, pueden modificar el tamaño de las gotas de nube. Si una misma cantidad de agua se reparte entre un mayor número de gotas, el resultado es que

¹ La circulación atmosférica es un movimiento del aire a gran escala y, junto con las corrientes marinas, distribuyen el calor sobre la superficie de la Tierra.

las gotas de una nube contaminada serán más pequeñas que las de una nube menos contaminada. Las gotas más pequeñas aumentan la reflectividad de la nube, y por tanto contribuyen al enfriamiento del sistema climático.

En segundo lugar, ya que las gotas de nube son más pequeñas, pueden no alcanzar el tamaño crítico para que se produzca la precipitación, que puede ser inhibida o quedar disminuida. De esta forma, aumenta el tiempo de vida media de las nubes y por tanto la cobertura nubosa de la Tierra (Andreae et al., 2004). Este efecto puede producir tanto enfriamiento como calentamiento dependiendo de la altura de las nubes (Toledano Olmeda, 2008). Ambos efectos incrementan la cantidad de energía solar reflejada al espacio impidiendo su llegada a la superficie terrestre.

1.1.3. Propiedades ópticas y su interacción entre aerosoles y radiación solar

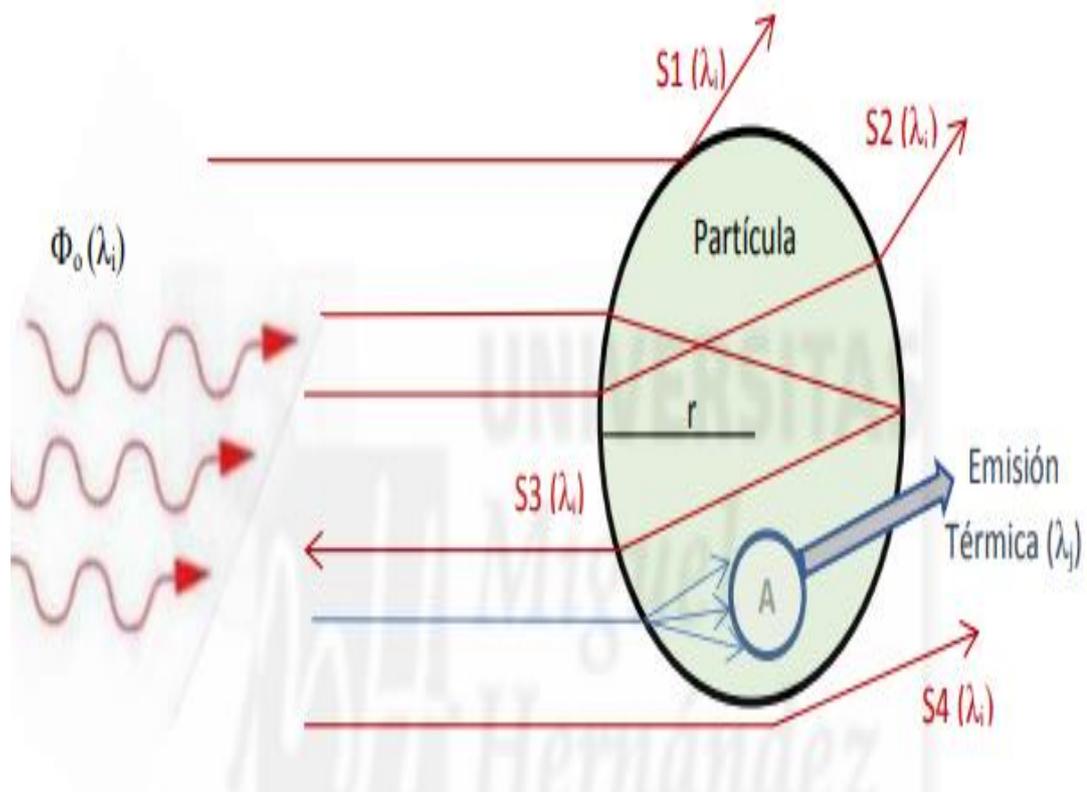
Las propiedades ópticas que describen la interacción entre los aerosoles y la radiación solar son los coeficientes de absorción, dispersión, extinción y el albedo de dispersión simple, las cuales son dependientes de la longitud de onda. Las propiedades ópticas de los aerosoles se resumen a continuación, las cuales son las principales responsables del efecto que estos provocan sobre el clima del planeta (Buseck & Schwartz, 2003):

- Coeficiente de dispersión: es la fracción de flujo radiante perdido por unidad de espesor de aerosol debido a la dispersión de la luz.
- Coeficiente de absorción: es la fracción de flujo radiante perdido por unidad de espesor de aerosol debido a la transformación de la luz en otras formas de energía.
- Coeficiente de extinción: los aerosoles pueden dispersar y absorber la luz, provocando la atenuación de la misma, es decir, se debilitará la intensidad de la luz después de atravesar un espesor de aerosoles en la dirección de su propagación, a este fenómeno se le denomina extinción. Se representa mediante el coeficiente de extinción de la luz que es la suma de los coeficientes de dispersión y absorción.

La Figura 1 muestra algunos de los mecanismos de interacción entre la radiación incidente con una longitud de onda λ_i y la partícula de radio r . Entre ellos, la absorción de la energía de la onda incidente (A) y su posterior emisión y varios efectos que

constituyen la dispersión (S): S_1 , reflexión, S_2 , refracción, S_3 , refracción y reflexión y S_4 , difracción. El resultado finalmente es una parte de la luz dispersada en dirección de la onda incidente (S_1 , S_2 y S_4) y una parte de la luz retrodispersada (S_3).

Figura 1. Mecanismos de interacción entre la radiación incidente y el aerosol.



Nota. El gráfico representa la absorción, dispersión, reflexión, refracción y difracción del haz de luz incidente sobre la partícula de aerosol. Tomado de Caracterización de parámetros ópticos del aerosol atmosférico (p.12), P. Guilabert, 2017.

- Albedo de dispersión simple (SSA): es un buen indicador de la cantidad de luz dispersada respecto a la total que interacciona con las partículas de aerosol, cuyo valor oscilará entre 0 y 1.

$$SSA = \frac{\sigma_s}{\sigma_A + \sigma_s} \quad (12)$$

En la Tabla 1 se presenta algunos intervalos de valores de σ_S , σ_A y SSA observados para determinados tipos de ambientes genéricos.

Tabla 1. Intervalo de valores de σ_S , σ_A y SSA vs del tipo de ambiente muestreado.

Tipo de ambiente	σ_S (Mm-1)	σ_A (Mm-1)	SSA
Urbano	30 - 300	25 - 125	0,50 - 0,85
Fondo continental	10 - 100	1 - 10	0,80 - 0,95
Marino	10 - 50	1 - 5	0,90 - 1,00
Polar	0,2 - 2,0	0,1 - 2,0	0,90 - 1,00

1.1.4. Aerosoles y su actividad en quema de biomasa

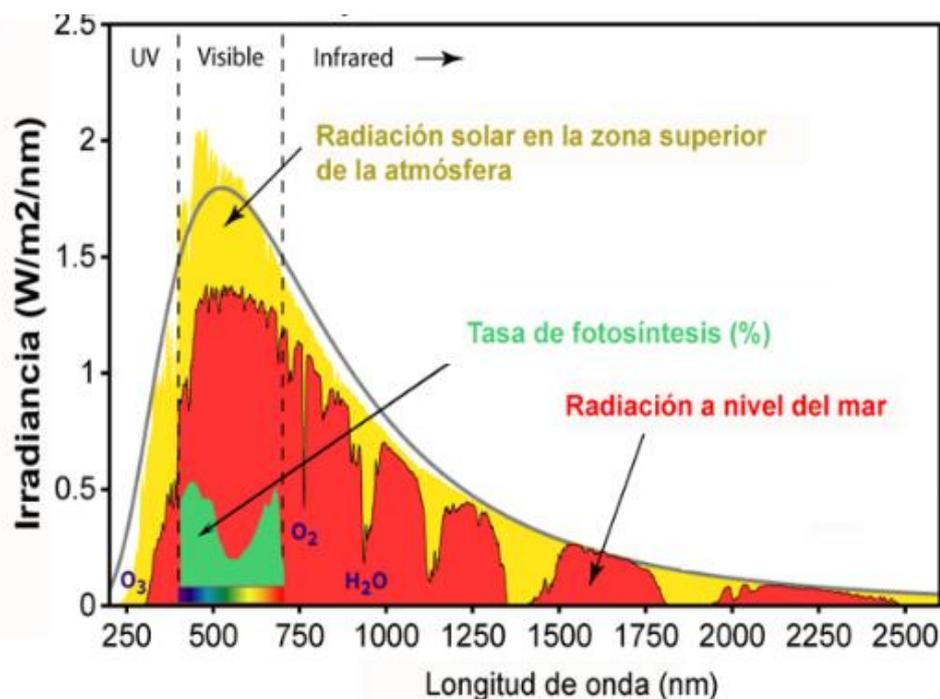
Los aerosoles de sulfatos y nitratos son conocidos por tener un componente antropogénico significativo y ejercen un significativo forzamiento radiativo directo. Otros aerosoles provenientes de la quema de biomasa como el carbono elemental, calientan la atmósfera y enfrían la superficie terrestre.

Además de los combustibles fósiles, la biomasa en forma de madera puede ser quemada en incendios forestales o como combustible para calentamiento y cocina, contribuyendo así a la concentración de contaminantes atmosféricos. Las emisiones de la quema de biomasa se registran estacionalmente (principalmente durante los meses de sequía, en verano o en años especialmente calurosos) y puede tener picos en cualquier época del año (Benavente & Acuña, 2015). Esta fuente de aerosoles es la mayor contribuyente de partículas en muchas regiones del mundo, como, por ejemplo, en la selva tropical del Brasil (Fonseca, Gioda, Ziolli, & Duó, 2013).

La Amazonia es la selva tropical más grande del mundo y está sujeto a una de las tasas más altas de deforestación. Alrededor del 80% de la actividad global de la quema se está produciendo en los trópicos y la Amazonia es tercero en América del Sur. En las condiciones climáticas adecuadas, las características químicas, físicas y ópticas de los aerosoles pueden estar fuertemente influenciadas por las perturbaciones locales y regionales, como las emisiones forestales, incendios, polvo mineral, sal marina, etc., lo que lleva a una mayor heterogeneidad espacial y temporal (Angeles & Angeles, 2017).

Los aerosoles generados por los incendios forestales y la quema de gramíneas, permanecen en suspensión y son arrastrados por los vientos, disminuyendo la calidad del aire aún en zonas distantes de los focos de incendio. La caracterización de estas partículas en suspensión atmosférica se indica mediante la cantidad adimensional denominada espesor óptico de aerosoles (AOD: Aerosol Optical Depth, por sus siglas en inglés), que se define como la atenuación por dispersión y/o absorción que producen los aerosoles a una determinada longitud de onda de la radiación solar incidente (Crinó, Coronel, & Piacentini, 2014). La longitud de onda ampliamente utilizada en la caracterización de aerosoles atmosféricos por quema de biomasa es de 500 nm (Eck et al., 2003). Además, esta longitud de onda representa el máximo energía espectral o energía radiante del Sol, representada en la Figura 2.

Figura 2. Espectro de la radiación solar.



Nota. Espectro de radiación solar fuera de la atmósfera de la Tierra (área amarilla) y a nivel del mar para condiciones de cielo despejado (área roja). Se observa que la longitud máxima de energía del Sola es 500 nm. Adaptado de Meteoglosario, Agencia Estatal de Meteorología, AEMET, 2018.

1.1.5. Espesor óptico del aerosol (AOD)

El espesor óptico del aerosol (AOD) es un parámetro adimensional cuantitativo que mide la extinción de la radiación solar debida a su dispersión y absorción por la presencia de partículas (aerosoles de neblina urbana, humo, polvo desértico, sal marina) distribuidas en la columna de aire desde la superficie terrestre a la parte superior de la atmósfera. Los valores de este parámetro varían entre 0 y aproximadamente 5.

La red AERONET (Aerosol Robotic Network) tiene por objetivo la obtención rutinaria de medidas fotométricas a nivel global para el estudio de espesor óptico del aerosol y la validación de las medidas satelitales (AERONET, 1998). La red está formada por más de 800 fotómetros solares instalados en estaciones estratégicamente distribuidas en todo el mundo. Trabaja en coordinación con la National Aeronautic and Space Administration (NASA) y Photométrie pour le Traitement Opérationnel de Normalization Satellitaire (PHOTONS), situando los datos para el usuario mediante su página web (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>). La red establece estrictos protocolos de calibración y mantenimiento, usando siempre un mismo instrumento estándar y un procesado centralizado. Como resultado se obtiene un registro de medidas de gran calidad y homogeneidad. El instrumento elegido para la red es el fotómetro de la empresa francesa CIMEL Electronique capaz de realizar medidas de irradiancia directa del sol y la luna, realiza medidas de radiancia del cielo en diferentes geometrías en el rango espectral de 380 nm hasta 1640 nm.

A partir de las medidas de irradiancia directa se puede calcular la atenuación de la radiación solar (o lunar) a su paso por la atmósfera. La atenuación viene definida por la ley de Beer-Bouguer-Lambert, de la siguiente forma:

$$F(\lambda) = F_0(\lambda)e^{-m_s\tau} \quad (13)$$

Donde F_0 es el flujo extraterrestre total - solar o lunar - (cantidad de radiación que llega a la parte más externa de la atmósfera), m_s es la masa óptica que puede ser calculada usando la fórmula de Kasten (Kasten & Young, 2000) y τ es el espesor

óptico total, que viene determinado por el tamaño, la composición y la cantidad de los diferentes componentes atmosféricos: moléculas, aerosoles y gases absorbentes.

Existen constituyentes atmosféricos pueden dispersar o absorber la radiación y deben considerarse al calcular el AOD. El espesor óptico de aerosoles debido al vapor de agua (nubes), la dispersión de Rayleigh y otros gases traza (dependientes de la longitud de onda) deben restarse del espesor óptico total (τ) para obtener el componente correspondiente a los aerosoles.

En ausencia de nubes, el espesor óptico total (τ) puede ser descompuesto en sus distintos componentes, es decir, la contribución debida los aerosoles (τ_a), a la absorción de los gases (τ_g) y a la dispersión de Rayleigh producida por las moléculas de aire (τ_R). Por tanto, la siguiente ecuación representa el espesor óptico de aerosoles τ_a a partir del espesor óptico total derivado de la ley de Beer-Bouguer-Lambert:

$$\tau_a = \tau - \tau_g - \tau_R \quad (14)$$

Finalmente teniendo en cuenta que la dispersión de Rayleigh τ_R es conocida para una atmósfera estándar a nivel del mar ($P_0=1013.25$ hPa) y que la masa óptica es distinta para cada componente (moléculas, aerosoles y gases), obtenemos la fórmula de la ley de Beer-Lambert que la red AERONET (Aerosol Robotic Network) usa para el cálculo del espesor óptico de aerosoles:

$$F(\lambda) = F_0(\lambda)e^{-m_a\tau_a - m_R\tau_R - m_g\tau_g} \quad (15)$$

Esta ecuación desarrollada Ley de Beer-Bouguer-Lambert; muestra explícitamente el espesor óptico de aerosoles, así como masas ópticas diferenciadas para aerosoles, moléculas y gases absorbentes.

En cuanto a las medidas de radiancia del cielo, el fotómetro Cimel utiliza una serie de geometrías (almucantar, plano principal, directa). En la medida de almucantar el ángulo cenital permanece constante e igual al ángulo cenital solar y el instrumento barre todo el rango de ángulos acimutales. En la medida de plano principal el ángulo acimutal es el que permanece constante e igual al del sol, y el ángulo cenital barre

distintos ángulos de elevación desde 6° por debajo del sol hasta 150°. La directa es una combinación de ambas geometrías, variando los ángulos cenital y azimutal para un conjunto predeterminado de ángulos de scattering. La geometría condiciona el intervalo de ángulos de “scattering” que se pueden medir por lo que el almucantar es más adecuado para elevaciones solares bajas, mientras que el plano principal y la directa se aplican en torno al mediodía solar.

El espesor óptico del aerosol no se mide de forma directa, sino que es estimado a partir de observaciones de transmisión espectral atmosférica. Estas medidas de radiancia multiespectrales y multiangulares se introducen en los algoritmos de inversión (Dubovik & King, 2000) para obtener un conjunto propiedades ópticas, microfísicas y radiativas de aerosoles para la investigación y caracterización de aerosoles y validación de datos de satélites.

1.1.5.1. Caracterización de aerosoles

Como el espesor óptico depende de la longitud de onda, se parametriza mediante la Ley de Ångström (Ångström, 1929), que describe la distribución del tamaño del aerosol en la columna integrada y que se puede derivar a partir de mediciones simultáneas de espesores ópticos para varias longitudes de onda. Esta ley se expresa como:

$$\tau(\lambda) = \beta\lambda^{-\alpha} \quad (16)$$

donde λ es la longitud de onda en micrómetros (μm), y α y β son dos parámetros de ajuste. El parámetro α es el coeficiente o exponente de Ångström, que está directamente relacionado con la distribución de tamaños de los aerosoles. Este parámetro, en teoría, toma valores de 0 a 4, donde los valores más bajos están asociados con partículas grandes (Toledano, 2005). El parámetro β es el coeficiente de turbiedad y coincide con el espesor óptico de aerosoles correspondiente a $\lambda = 1 \mu\text{m}$.

Es posible estimar el comportamiento del parámetro de Ångström por medio de la siguiente ecuación:

$$\log[\tau]_{\lambda_i} = \log[\beta] - \alpha \cdot \log\left[\frac{\lambda_i}{\lambda_0}\right] \quad (17)$$

Ecuación que ha demostrado que esta estimación es válida para un intervalo de longitudes de onda (Kaufman, 1993).

Debido a la gran variabilidad de las fuentes de aerosoles atmosféricos, existen diversas clasificaciones de los mismos, asociadas al origen, al tamaño o a la composición química principalmente, siendo esta última una de las que mayor utilidad presenta a la hora de determinar las propiedades de los mismos, por lo que se han desarrollado clasificaciones usando los componentes de coeficiente de Ångström y AOD, para establecer grupos de aerosoles predominantes en diferentes regiones del planeta (Hess, Koepke, & Schult, 1998), como se describe a continuación:

- Aerosol desértico: compuesto básicamente por partículas minerales. Predominante en las zonas cercanas a desiertos. Se dice que el desierto del Sahara, aporta entre 60 y 200 millones de toneladas de aerosoles a la troposfera anualmente.
- Aerosol urbano: predominante en zonas donde la actividad antropogénica prima, y proveniente esencialmente de procesos industriales, tráfico vehicular y zonas residenciales. Las actividades rurales como la quema de biomasa, también aportan a este tipo de aerosoles.
- Aerosol marítimo: está compuesto principalmente por sustancias solubles en agua y partículas de sal. Es el más abundante en toda la atmósfera del planeta debido a su origen oceánico.
- Aerosol continental: abarca las partículas generadas en los continentes, específicamente en áreas boscosas, selvas y zonas con baja actividad industrial.
- Aerosol Ártico: Proveniente de las plataformas continentales del norte de Europa y Asia, y los océanos cercanos. Son aerosoles pequeños y se componen principalmente de minerales y partículas marinas.

- Aerosol Antártico: Proveniente de la Antártida. Posee gran estabilidad por no encontrarse afectado por fuentes de contaminación atmosférica, y se compone principalmente de aerosoles marítimos, sulfatos y minerales.

La gráfica del coeficiente o exponente de Ångström versus el AOD permite identificar los distintos tipos de aerosoles (Obregon, 2012), para ello se utiliza la tabla de aerosoles predominantes descrita en la Tabla 2.

Tabla 2. Clasificación de aerosoles.

Tipo de ambiente	AOD (0.5 μ m)	Ångström (α) (0.5-0.8 μ m)
Continental Limpio	0.05 – 0.15	0.8 – 1.5
Continental Promedio	0.1 – 0.3	1 – 1.7
Continental Contaminado	0.08– 0.3	1.5 – 2.5
Urbanos/Industriales	> 0.25	> 1.2
Desértico	> 0.2	< 0.8
Marítimo	< 0.15	< 0.3
Quema de Biomasa	> 0.2	1.5 – 2.6
Antártico	< 0.1	< 0.8

Nota. En la Tabla 2 identifica al grupo de aerosoles predominantes en diferentes regiones de nuestro planeta. Normalmente se utilizan los datos de AOD y coeficiente o exponente de Ångström para catalogar los aerosoles (Hess et al., 1998). Adaptado de Espesor óptico de aerosoles durante el año 2002 para diez estaciones pertenecientes a la red AERONET – NASA (p. 361), L. Otero, 2006, *Óptica Pura Aplicada*, 4 (39).

1.1.6. Aerosoles y su actividad meteorológica

La concentración de los aerosoles en la atmósfera se ve afectada por variables meteorológicas como, la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar, que controlan a su vez la velocidad con la que se realizan las reacciones químicas atmosféricas. Por otro lado, la dispersión de estos contaminantes es influenciada por la velocidad y dirección de los vientos, así como la estabilidad que predomina en la atmósfera (Ramos, Bautista, & Valdez, 2010).

El viento transporta partículas en suspensión denominados aerosoles. Estos pueden ser de origen natural o antropogénico y dependiendo de sus características y propiedades, tanto físicas, químicas como ópticas alteran y modifican la atmósfera y el aire que respiramos (D'Almeida, Shettle, & Koepke, 1991).

La dirección predominante promedio del viento en la ciudad de Asunción varía durante el año. Por su topografía, la influencia de los océanos Pacífico y Atlántico, su proximidad a la región selvática del Amazonas, la ciudad es afectada mayormente por vientos provenientes de noreste y sureste. Los vientos con componente Norte podrían ser consecuencia de la influencia del Río de la Plata, en tanto que los vientos con componente Sur obedecen más bien a patrones meteorológicos regionales, con una marcada influencia del océano Atlántico (CMMCh, 2011). Estas direcciones del viento hacen susceptible el transporte de quemas de biomasa del Norte del continente y de aerosoles marítimos provenientes de los océanos.

2. JUSTIFICACIÓN

El interés que existe actualmente por el estudio de los aerosoles está relacionado con la presencia de aerosoles contaminantes en el ambiente, producto de las actividades industriales, agrícola y ganadera, que a nivel regional genera diversos problemas en la calidad de vida de la población, afectando la salud humana y la de los ecosistemas. Además, la falta de sensibilización de la población hacia los problemas ambientales ha ocasionado que la contaminación se dé en todo el mundo.

A nivel regional se ha puesto atención al problema de la contaminación atmosférica por aerosoles, debido a la predominancia de quemados de biomasa asociados a una variedad de actividades, como la expansión agrícola, deforestación y cambio de uso de suelo, o el control de plagas o maleza (Setzer & Pereira, 1991). Las masas de aire promueven la dispersión de estos contaminantes e influenciada por la velocidad y dirección de los vientos transportan desde su lugar de origen a diversos puntos, los aerosoles provenientes de la quema de biomasa. Estas quemados se presentan principalmente en la época seca (mayo a octubre), que también coincide con la menor capacidad de remoción de los contaminantes por las mínimas lluvias y con ello una mayor posibilidad de que los contaminantes alcancen mayores distancias (Weatherspark, 2020).

En el Paraguay se observa que los problemas en la calidad del aire están relacionados con la actividad agrícola fronteriza y prácticas agroganaderas, con emisiones de los ingenios azucareros, quema de pastizales y las industrias cementeras. Se documentan pocos estudios sobre la concentración, distribución y transporte de aerosoles en Paraguay. Crino y colaboradores (Crinó et al., 2014) analizaron eventos de contaminación atmosférica sobre la Asunción y Clorinda producidos por aerosoles emitidos por intensas quemados de biomasa. Coronel y colaboradores identificaron los

lugares de mayor concentración de aerosoles basados en la cantidad de habitantes y los efectos en la salud (Coronel et al., 2018).

Por lo mencionado anteriormente, se evidencia la importancia de implementar una metodología que permita estimar las concentraciones de aerosoles en la ciudad de Asunción, Paraguay. Para efectos de esta investigación se utilizó la red AERONET (Aerosol Robotic Network) que trabaja con datos estandarizados, lo cual es importante para poder comparar los datos entre estaciones, es decir, que se puede hacer comparación temporal y espacial de Espesor Óptico de Aerosoles (AOD) y otras propiedades como; agua precipitada, parámetro Angstrom, fracción en modo fino y grueso, albedo de dispersión simple, etc. La flexibilidad en la obtención de los datos permitió presentar evidencias del transporte transfronterizo de las masas de aire contaminado que provienen de quemas de biomásas en Brasil (Mato Grosso y Norte Amazónico de Bolivia) y las quemas locales, que contaminan la atmósfera de Asunción (Paraguay), evaluando la influencia del transporte de masas de aire en la variabilidad del espesor óptico de los aerosoles (AOD) medido a 500 nm.

Además, la investigación dará soporte documental para justificar la instalación del primer fotómetro solar en el predio del Aeropuerto Internacional Silvio Pettirossi en el marco del proyecto LABO16-27 de la Dirección Nacional de Aeronáutica Civil (DINAC) y cofinanciado por CONACYT. La estación en operación desde marzo del 2021 busca proporcionar información real sobre: las propiedades ópticas, microfísicas y radiativas de los aerosoles atmosféricos y el efecto de la atenuación sobre el flujo solar incidente en la superficie terrestre; la influencia a largo plazo de los aerosoles emitidos por la combustión de la biomasa y el efecto sobre la vegetación, así como los procesos meteorológicos regionales; y otras aplicaciones como: la corrección y validación de imágenes de satélites, estudios de clima y cambio climático, pronóstico y monitoreo de la calidad del aire.

El producto más importante que ofrece esta investigación, es la de promover la importancia que tiene la instalación de estaciones de monitoreo de calidad del aire, ya que permite la captura de los datos llenando los vacíos de información con datos reales, mientras que la información obtenida por métodos de interpolación generalmente presenta errores en sus resultados.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

Estimar el espesor óptico de aerosoles (AOD) sobre la ciudad de Asunción (Paraguay) a través de análisis estadísticos de cuatro (4) estaciones de la red AERONET mediante el aporte de quemadas de biomasa para un año durante el periodo noviembre 2018 a noviembre 2019.

3.2. Objetivos Específicos

- Realizar un estudio estadístico del espesor óptico de aerosoles (AOD) de los datos fotométricos con un nivel de calidad denominado 1.5 (datos corregidos automáticamente) de las estaciones analizadas.
- Caracterizar los tipos de aerosoles predominantes en las estaciones analizadas.
- Estimar la dirección y velocidad del viento predominante en las estaciones analizadas con el fin de determinar los vectores de transporte de aerosoles emitidos por las quemadas de biomasa sobre la ciudad Asunción (Paraguay).
- Identificar y cuantificar los focos de incendios próximos a las estaciones analizadas y la ciudad Asunción (Paraguay).
- Correlacionar los datos de espesor óptico de aerosoles de las estaciones analizadas con la temperatura, humedad, dirección y velocidad del viento, y focos de incendios para el periodo de estudio.
- Proponer una función de regresión que pueda describir la concentración del espesor óptico de aerosoles (AOD) en función de las variables meteorológicas y los focos de incendios.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

Los datos obtenidos de la red AERONET (Aerosol Robotic Network) forman parte de un programa a escala mundial de monitoreo espacio temporal en columna vertical de las propiedades ópticas espectrales de los aerosoles presentes en la atmósfera. La red impone sistemas de estandarización de instrumentos, calibración, procesamiento y distribución, establecida por NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio) y PHOTONS (Fotometría para el procesamiento operativo de la normalización de satélites), que es un Laboratorio de Óptica Atmosférica de la Universidad de Lille, Francia.

El sistema de estandarización radica en el hecho que: i) todos los equipos son fotómetros solares de la misma marca (CIMEL Electronique, modelo CE-318) ii) se calibran en la NASA siguiendo el mismo protocolo, y iii) sus datos son procesados de la misma forma, también en la NASA, en tres niveles de calidad de datos, estos son:

- Datos de nivel 1.0 (datos en bruto): está constituido por las medidas primarias, siendo aquellos datos que no han sido revisados ni filtrados, es decir aquellos obtenidos sin ninguna modificación.

- Datos de nivel 1.5 (datos calibrados, extraídos la contribución nubosa): es la serie en la cual se han eliminado las medidas afectadas por nubosidad, mediante un algoritmo automático.

- Datos de nivel 2.0 (recalibrados y asegurados): son los datos definitivos, han sido filtrados por nubes y además pasan por un control de calidad. Está supeditado al proceso mismo de calibración del fotómetro.

Esta estandarización es importante para poder comparar los datos entre estaciones, es decir, que se puede hacer comparación temporal y espacial de los mismos.

4.1. Instrumentos de medición

4.1.1. Fotómetro Solar CIMEL CE318

El fotómetro solar CIMEL CE318 es capaz de hacer observaciones de forma automática en tres escenarios principales, a) directa, b) almucantar y c) plano principal. El primero es la medición directa al sol cada 15 minutos, permite obtener el espesor óptico de aerosoles, el contenido de agua precipitable y el exponente de Ångström, para la columna atmosférica que atraviesa directamente el haz de luz que sale del sol e impacta los detectores del equipo. Para la obtención del espesor óptico se recurre a la Ley de Lambert-Beer, ya que, según esta, el espesor óptico total se obtiene a través del flujo solar directo a nivel del suelo y el flujo extraterrestre.

Los instrumentos son controlados electrónicamente y tienen la capacidad de almacenar los datos e incorporan un sistema automático para un seguimiento preciso del posicionamiento solar.

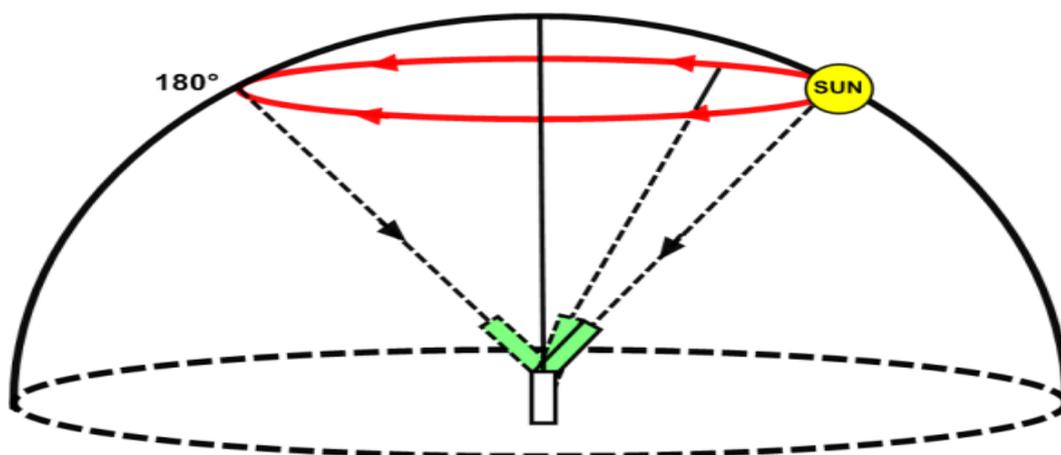
Los otros dos escenarios: b) almucantar y c) plano principal, realizan mediciones de radiancia del cielo en cuatro canales específicamente, 440, 670, 870 y 1020 nm, que sirven de insumo para la aplicación de algoritmos de inversión que permiten obtener información valiosa acerca de otras propiedades ópticas y microfísicas de los aerosoles, tales como la distribución de tamaños, el albedo de dispersión simple, el índice de refracción y la función de fase, entre otras.

El Almucantar, consiste en una serie de mediciones que se toman con un ángulo cenital constante igual al ángulo cenital solar, mientras se realiza un barrido por el campo azimutal iniciando en el punto a donde se observa directamente el sol, que se toma como 0° y girando hacia la derecha hasta 180° , luego retoma la posición inicial (apuntando al sol) en 0° y realiza el recorrido en el sentido opuesto otros 180° para completar toda la esfera, como lo muestra la Figura 3 (CIMEL, 2020).

El escenario Plano Principal, también parte desde la ubicación del sol, y recorre el cielo variando el ángulo cenital mientras el ángulo acimutal (igual al ángulo acimutal solar) se mantiene constante, como lo muestra la Figura 4 (CIMEL, 2020). Este escenario se inicia después de una medición directa al sol, para ubicar el ángulo

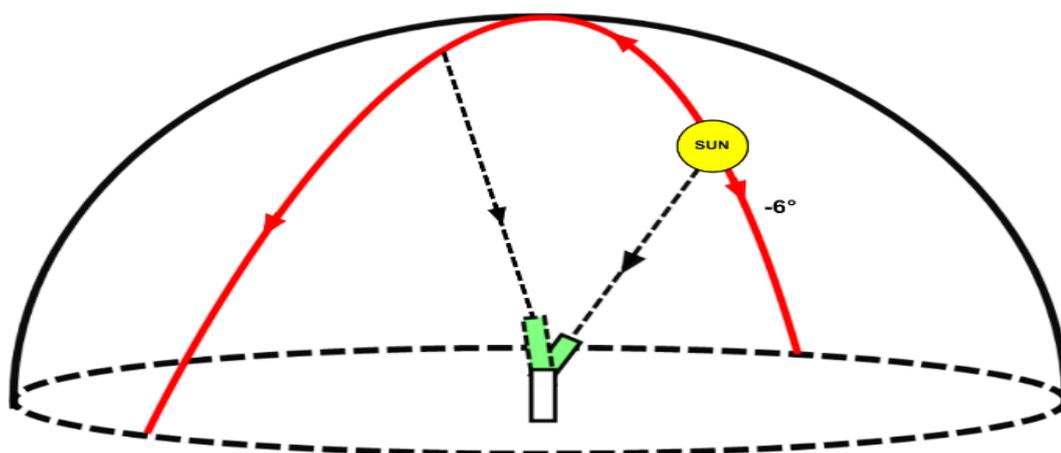
acimutal solar y luego inicia las mediciones desde unos 6° por debajo del nivel del sol hasta 150° , el proceso se repite para cada uno de los cuatro canales. La siguiente figura ilustra el proceso de ejecución del escenario Plano Principal.

Figura 3. Operación del escenario Almucantar.



Nota. Tomado de User Operation Manual CE318-T Photometer, CIMEL, 2020.

Figura 4. Operación del escenario Plano Principal.



Nota. Tomado de User Operation Manual CE318-T Photometer, CIMEL, 2020.

En este estudio solo se analizó el espesor óptico de aerosoles y el exponente de Ångström.

4.2. Instrumentos para el modelado estadístico

A partir del modelado de regresión es posible hacer predicciones sobre la respuesta con base en valores de la variable predictora. Los modelos de regresión simple y múltiple presentan las características ideales para el tratamiento de variables cuantitativas que responden según las variables predictoras o regresoras dentro del fenómeno estudiado.

Los factores que intervienen en un experimento pueden ser cuantitativos o cualitativos. Un factor cuantitativo es aquel cuyos niveles pueden asociarse con puntos en una escala numérica, como la temperatura, la humedad relativa, la conductividad eléctrica, la presión o el tiempo. Los factores cualitativos son aquellos cuyos niveles no pueden ordenarse por magnitud.

El análisis de regresión múltiple es un método estadístico empleado en muchas áreas del conocimiento y es uno de los modelos más utilizados entre todos los modelos estadísticos.

Usualmente, el modelo de regresión lineal simple (es decir, con una sola variable predictora o regresora o explicativa) provee una descripción inadecuada de la respuesta, ya que suele suceder que son muchas las variables que ayudan a explicar la respuesta y la afectan de formas distintas e importantes. Entonces es necesario trabajar con modelos más complejos, que contengan variables predictoras adicionales, para proporcionar predicciones más precisas y colaborar en la cuantificación del vínculo entre ellas. En esos casos, se debe recurrir al uso de regresión múltiple. En este sentido, el modelo de regresión múltiple es una extensión natural del modelo de regresión lineal simple y se puede utilizar tanto para datos observacionales como para estudios controlados a partir de ensayos aleatorizados o experimentales.

Existen modelados de regresión que muestran que los contaminantes atmosféricos y las variables meteorológicas se correlacionan. Una investigación centrada en los modelos de regresión lineal, simple y múltiple, estableció la relación existente entre las variables de temperatura, luz, pH y oxígeno disuelto, con la dinámica de crecimiento de un cultivo de microalgas (Batista et al., 2016).

Existe otro estudio, que aplico un análisis estadístico sobre cuatro contaminantes atmosféricos (SO_2 , NO_2 , H_2S y PM_{10}), monitoreados en tres estaciones, proponiendo funciones de regresión que describieron adecuadamente la concentración anual y mensual de los contaminantes en función de las variables meteorológicas (temperatura, humedad relativa y la dirección del viento) (Ramos et al., 2010).

Un estudio reciente aplica el modelo de regresión lineal múltiple para evaluar la concentración de PM_{10} en el polvo de Sahel utilizando como variables regresoras al espesor óptico de aerosol y el tiempo, estimando así la concentración de PM_{10} en superficie de forma mensual y diaria en función a la variabilidad estacional y desplazamiento vertical de la capa de polvo (Léon, Martiny, & Merlet, 2020).

El análisis estadístico de los datos obtenidos de la red AERONET (Aerosol Robotic Network) se basó en la estimación de una serie temporal del espesor óptico aerosol (AOD) a un intervalo de observaciones entre las 10:00 y las 19:00 horas, de tal forma a abarcar la mayor proporción de irradiancia solar sobre la superficie de la tierra, dicho análisis se ejecutó con la ayuda del software Minitab[®]18, para el periodo de noviembre/2018 a noviembre/2019.

Como criterio de tratamiento de los datos, se consideran los siguientes rangos:

- Todo día que tenga una sola medición, no será tomado en cuenta debido a su escasa representatividad estadística.
- A cada dato filtrado de AOD le corresponde un valor de velocidad del viento (VV), dirección del viento (DV), temperatura (T) y humedad relativa (HR).
- A cada valor medio mensual obtenido de AOD, velocidad del viento (VV), dirección del viento (DV), temperatura (T) y humedad relativa (HR), le corresponde un valor medio de foco de incendio.

4.3. Ubicación geográfica de las estaciones de recolecciones de datos.

Las 4 estaciones que se utilizaron para desarrollar este trabajo se encuentran: dos (2) en el territorio brasileño, uno (1) en territorio argentino y uno (1) en territorio

boliviano. En la Tabla 3 y en la Figura 5, se presenta la ubicación geográfica de cada una de ellas.

Tabla 3. Ubicación de las estaciones de recolecciones de datos.

N°	País	Estación Aeronet	Ciudad	Latitud (Sur)	Latitud (Oeste)	Altura a nivel de mar [m]
1	Bolivia	Santa_Cruz_Utepsa	Santa Cruz	17,76732°	63,20096°	432
2	Brasil	Ji_Parana_SE	Ji Parana	10,93425°	61,85152°	218
3	Brasil	Cuiaba-Miranda	Cuiaba Miranda	15,73091°	56,07086°	210
4	Argentina	Ceilap-Bs.As.	Buenos Aires	34,55542°	58,50641°	26

4.4. Procesamiento de los datos recolectados de las estaciones.

Para realizar este estudio se utilizaron las mediciones de AOD a 500 nm (AOD_{500nm}) registradas en cada estación para los periodos noviembre 2018 y noviembre 2019. La cantidad de datos disponibles depende mucho de cuando se puso en marcha el equipo, de cómo se realizó su mantenimiento y de la cantidad de días con cielo despejado o parcialmente despejado con el Sol sin cobertura nubosa.

Llevar los datos a Nivel 2.0 requiere muchos meses de calibración, los cuales no están disponibles aun para los meses de estudio, por lo que la mayor cantidad de datos utilizados corresponden al Nivel 1.5. En la Tabla 4 se presenta el tiempo de operación de cada instrumento desde su inicio hasta la actualidad, la cantidad de datos extraídos y la cantidad de datos que se procesaron para llevar adelante este trabajo.

Tabla 4. Tiempo de operación y datos procesados.

N°	Estación Aeronet	Tiempo de operación		Datos al nivel 1,5		
		Inicio	Tiempo	Extraídos	Procesados	%
1	Santa_Cruz_Utepsa	18-09-2006	3411 días	21126	14632	69
2	Ji_Parana_SE	24-09-2005	3844 días	8554	4990	58
3	Cuiaba-Miranda	04-04-1994	6008 días	12957	7864	61
4	Ceilap-Bs.As.	18-10-1999	6882 días	21388	21250	99

Figura 5. Mapa de Estaciones.



Nota. Ubicación geográfica de las estaciones de recolecciones de datos, Ji_Parana_SE (A), SANTA_CRUZ_UTEPSA (B), CUIABA-MIRANDA (C), y CEILAP-BA (D).

De los datos registrados en cada estación AERONET se extraen y se procesan para este estudio el espesor óptico de aerosoles y el exponente de Ångström. Los datos son descargados en archivos comprimidos zip, que posteriormente son importados a hojas de cálculo de Excel.

Los días procesados para el estudio son claros y sin nubes. Se seleccionan solamente los datos medidos durante las 10:00 y las 19:00 horas. Esto reduce el error de cálculo por tratarse de una medición directa al sol. Los días con una sola medición no fueron tenidos en cuenta por su baja representatividad.

Los datos de velocidad del viento (VV), dirección del viento (DV), temperatura (T) y humedad relativa (HR) en superficie para los periodos noviembre 2018 y noviembre 2019 son extraídos del Sistema automatizado de observación de superficie (ASOS), que recopila datos ambientales de miembros cooperantes con redes de observación. Los datos se almacenan y están disponibles en este sitio web. (https://mesonet.agron.iastate.edu/request/download.phtml?network=PY__ASOS).

En la Tabla 5 se presenta la cantidad de datos meteorológicos extraídos y procesados para llevar adelante este trabajo.

Tabla 5. Datos meteorológicos procesados.

N°	Estación Aeronet	Estación Meteorológica	Datos para cada AOD(0.5 μ m)		
			Extraídos	Procesados	%
1	Santa_Cruz_Utepsa	(SLVR)	19644	14632	74
2	Ji_Parana_SE	(SBPV)	20316	4990	25
3	Cuiaba-Miranda	(SBCY)	19248	7864	41
4	Ceilap-Bs.As.	(SAEZ)	21444	21250	99
-	Asunción	(SGAS)	21448	21448	100

Tabla 6. Datos focos de incendios procesados.

N°	Estación Aeronet	Estación Meteorológica	Focos de incendios próximas a
			cada Estación
1	Santa_Cruz_Utepsa	(SLVR)	26531
2	Ji_Parana_SE	(SBPV)	11410
3	Cuiaba-Miranda	(SBCY)	31337
4	Ceilap-Bs.As.	(SAEZ)	1353
-	Asunción	(SGAS)	23376

La densidad de focos mensuales para los periodos noviembre 2018 y noviembre 2019 son extraídos de la página web del Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (<http://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas>). En la Tabla 6 se presenta la cantidad incendios registrados, extraídos y procesados para el estudio de aerosoles.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La metodología de trabajo se basó en procesar todos los datos AOD y coeficiente de Ångström diarios a medias mensuales. El análisis estadístico se ejecutó con la ayuda del software Minitab®18, para el periodo de noviembre/2018 a noviembre/2019, entre las 10:00 y las 19:00 horas del día. Se trabajó con mediciones de AOD a la longitud de onda de 500 nm, longitud de onda ampliamente usada en la caracterización de aerosoles atmosféricos por quema de biomasa (Eck et al., 2003) y para el coeficiente de Ångström a un intervalo de longitud de onda de 440 a 870 nm, se ha demostrado que esta estimación es válida para un intervalo de longitudes de onda (Kaufman, 1993).

Los datos de AOD_{500nm} y coeficiente de Ångström($\alpha_{440-870nm}$) fueron extraídos de la red AERONET para las estaciones de Bolivia (SANTA_CRUZ_UTEPSA); Brasil (CUIABA-MIRANDA); Brasil (JI_PARANA) y Argentina (CEILAP-BA). En la Tabla 7 se presenta un resumen de estadísticos descriptivos para medias mensuales de los datos extraídos de AOD_{500nm} y coeficiente de Ångström($\alpha_{440-870nm}$).

Tabla 7. Estadísticos descriptivos mensuales. Periodo de nov/2018 a nov/2019

Estación Aeronet	Estación Meteorológica	AOD _{500nm}			Coeficiente Ångström ($\alpha_{440-870nm}$)		
Noviembre/2018							
		Media	Mínimo	Máximo	Media	Mínimo	Máximo
CEILAP-BA	SAEZ	0,0760	0,0309	0,2163	0,8146	0,2513	1,5368
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,0917	0,0585	0,2159	1,5538	1,1004	1,8427
Ji_Parana_SE	SBPV	0,1593	0,1019	0,3033	1,5584	1,4469	1,7107
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	0,1261	0,0721	0,3186	1,3355	0,7056	1,8693

Estación Aeronet	Estación Meteorológica	AOD _{500nm}			Coeficiente Ångström (0.440-870nm)		
Diciembre/2018							
		Media	Mínimo	Máximo	Media	Mínimo	Máximo
CEILAP-BA	SAEZ	0,0916	0,0306	0,2539	0,7727	0,1220	1,3502
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,0861	0,0597	0,1551	1,4044	1,0529	1,5840
Ji_Parana_SE	SBPV	0,1688	0,1045	0,2119	0,9823	0,8293	1,1203
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	0,1074	0,0365	0,2060	1,3207	0,4036	1,7541
Enero/2019							
CEILAP-BA	SAEZ	0,0951	0,0259	0,2705	0,8156	0,1890	1,7590
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,1119	0,0619	0,2913	1,0656	0,3326	1,5617
Ji_Parana_SE	SBPV	0,0589	0,0529	0,0733	0,7872	0,5061	0,9755
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	0,0867	0,0417	0,2429	1,0553	0,1456	1,8068
Febrero/2019							
CEILAP-BA	SAEZ	0,0781	0,0230	0,3262	0,7166	0,0498	1,6717
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,0933	0,0527	0,1695	1,4780	0,9767	1,6744
Ji_Parana_SE	SBPV	*	*	*	*	*	*
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	0,0933	0,0581	0,2301	1,2017	0,1536	1,5761
Marzo/2019							
CEILAP-BA	SAEZ	0,0902	0,0270	0,2756	0,6918	0,0356	1,7427
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,0496	0,0295	0,1134	0,8929	0,1925	1,3334
Ji_Parana_SE	SBPV	0,0490	0,0490	0,0490	1,1027	1,1027	1,1027
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	0,0728	0,0350	0,1376	1,2728	0,1519	2,4414
Abril/2019							
CEILAP-BA	SAEZ	0,0796	0,0249	0,2916	0,8537	0,1418	1,6884
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,0910	0,0439	0,2042	1,0792	0,3048	1,4481
Ji_Parana_SE	SBPV	0,0438	0,0434	0,0442	1,1920	1,1646	1,2193
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	0,0858	0,0334	0,2281	1,3142	0,4722	2,2834
Mayo/2019							
CEILAP-BA	SAEZ	0,0721	0,0246	0,2873	0,8129	0,0118	1,7394
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,0889	0,0361	0,2245	1,2012	0,3642	1,7655
Ji_Parana_SE	SBPV	0,0729	0,0337	0,1510	1,3441	0,8677	1,7077
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	*	*	*	*	*	*

Estación Aeronet	Estación Meteorológica	AOD _{500nm}			Coeficiente Ångström ($\alpha_{440-870nm}$)		
Junio/2019							
		Media	Mínimo	Máximo	Media	Mínimo	Máximo
CEILAP-BA	SAEZ	0,0489	0,0185	0,2142	0,9332	0,0081	1,6179
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,0890	0,0477	0,1919	0,9937	0,1192	1,7376
Ji_Parana_SE	SBPV	0,0903	0,0518	0,2220	1,3479	0,7891	1,5877
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	0,0664	0,0494	0,0833	1,7946	1,7830	1,8062
Julio/2019							
CEILAP-BA	SAEZ	0,0844	0,0290	0,3513	1,1425	0,1532	1,8357
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,1262	0,0382	0,3357	1,2949	0,6004	2,0089
Ji_Parana_SE	SBPV	*	*	*	*	*	*
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	0,0725	0,0618	0,0851	1,6576	1,5896	1,7439
Agosto/2019							
CEILAP-BA	SAEZ	0,0856	0,0227	0,5272	1,1183	0,2821	1,8901
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,7659	0,3233	2,2590	1,7572	1,3341	1,9753
Ji_Parana_SE	SBPV	0,7906	0,5083	1,1494	1,9035	1,8195	1,9480
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	0,3714	0,0415	1,5089	1,6247	0,3404	2,0324
Setiembre/2019							
CEILAP-BA	SAEZ	0,0866	0,0354	0,4240	1,0255	0,2955	1,8180
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,7187	0,2742	1,6156	1,7652	1,3662	2,0467
Ji_Parana_SE	SBPV	0,7134	0,2354	1,3524	1,6061	0,2827	1,9130
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	0,5413	0,1807	2,2989	1,7655	0,7158	2,0584
Octubre/2019							
CEILAP-BA	SAEZ	0,0701	0,0391	0,1022	0,9020	0,4996	1,5334
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,2490	0,0666	0,5804	1,4573	0,3764	1,9229
Ji_Parana_SE	SBPV	0,2313	0,1145	0,4238	1,4114	0,9711	2,0054
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	0,2162	0,0872	0,7621	1,6989	1,0552	2,1583
Noviembre/2019							
CEILAP-BA	SAEZ	0,1196	0,0570	0,2475	0,8663	0,4671	1,2459
CUIABA-MIRANDA	SBCY	0,2095	0,1073	0,5740	1,4228	0,7307	1,7401
Ji_Parana_SE	SBPV	0,1706	0,0710	0,4530	1,2636	0,2559	1,6833
SANTA_CRUZ_UTEPSA	SLVR	0,1610	0,0633	0,3745	1,5901	0,7742	2,0455

* Dato mensual de la estación sin medición

** Días con una sola medición no fueron tenidos en cuenta por su baja representatividad.

De los datos obtenidos en la Tabla 7, se presenta en la Figura 6, distribución de la media mensual de AOD_{500nm} para cada estación y en la Figura 7 se observa la distribución de los máximos mensuales de AOD_{500nm} .

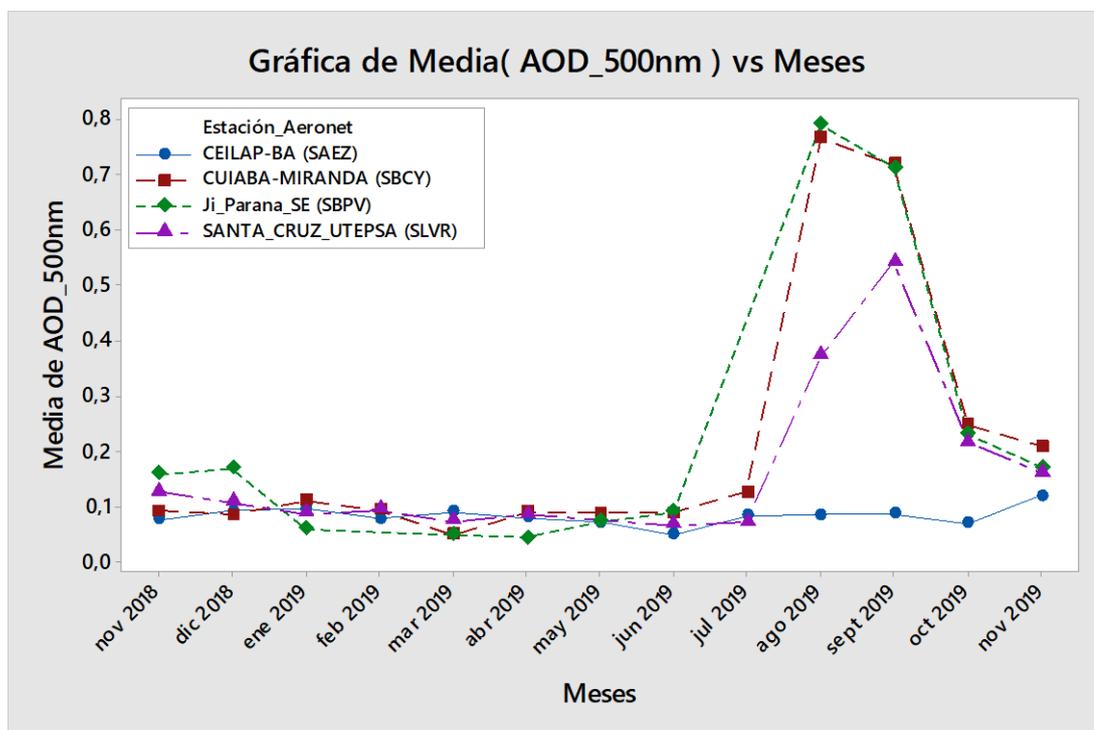


Figura 6. Gráfica Media mensual del AOD_{500nm} .

Se puede observar que en las estaciones al norte de Asunción - Paraguay presentan valores de media mensual para AOD_{500nm} en torno a 0,2 para los meses de noviembre/2018 – julio/2019 (Figura 6), con valores máximos entre 1,3 y 2,3 para los meses de agosto/2019 – setiembre/2019 (Figura 7), y el correspondiente descenso nuevamente de la variable próxima a 0,2. Estudios del espesor óptico de los aerosoles realizados en Perú indican incremento de la concentración de AOD durante la estación seca, se debe al incremento de los focos de incendios forestales en la Amazonía brasileña y boliviana (Cholan, 2016).

En la estación al sur de Asunción - Paraguay presenta variación mensual constante mínima que no supera el valor medio 0,1. Esta estación, si bien está en el límite de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, diariamente se ve poco influenciada por la contaminación directa de la ciudad debido a la circulación preferencial elevada de los vientos (L. Otero et al., 2006).

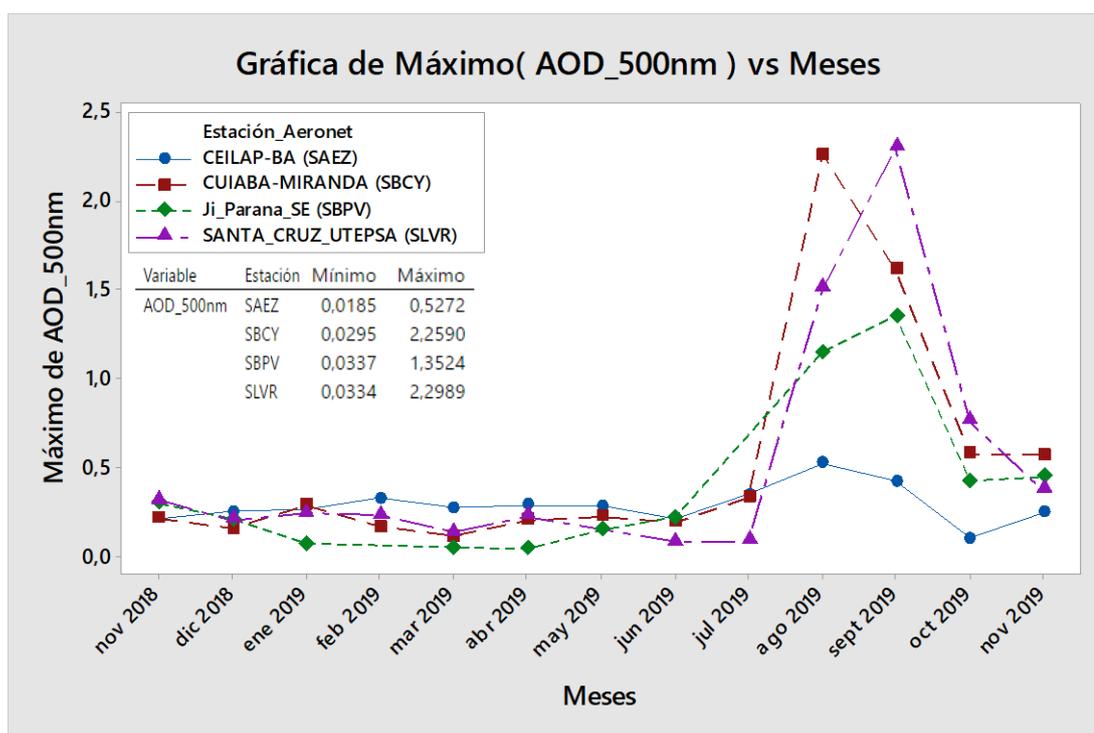


Figura 7. Gráfica de Máximo de AOD_{500nm}.

La Figura 8 describe la distribución de la media mensual de coeficiente de Ångström($\alpha_{440-870nm}$) para cada estación. Como se está trabajando con valores medios mensuales de AOD_{500nm}, también se calcula el valor medio mensual del coeficiente de Ångström. Realizar este estudio con valores medios de coeficiente o exponente de Ångström ($\alpha_{440-870nm}$), proporciona información del tipo de aerosoles más frecuente, minimizándose el efecto de los eventos puntuales. En el mismo, se visualiza que las medias mensuales presentan valores que oscilan en torno en 1,4 (Figura 8), con valores máximos entre 1,9 y 2,0 para los meses de agosto – setiembre (Tabla 8), y el correspondiente descenso nuevamente de la variable próxima a 1,4. Estudios de Caracterización de aerosoles en los Andes tropicales y en Amazonia adyacente usando mediciones de AERONET vinculan directamente al incremento del coeficiente de Ångström($\alpha_{440-870nm}$) con actividades de quema de biomasa para periodos de agosto a octubre (Pérez et al., 2017).

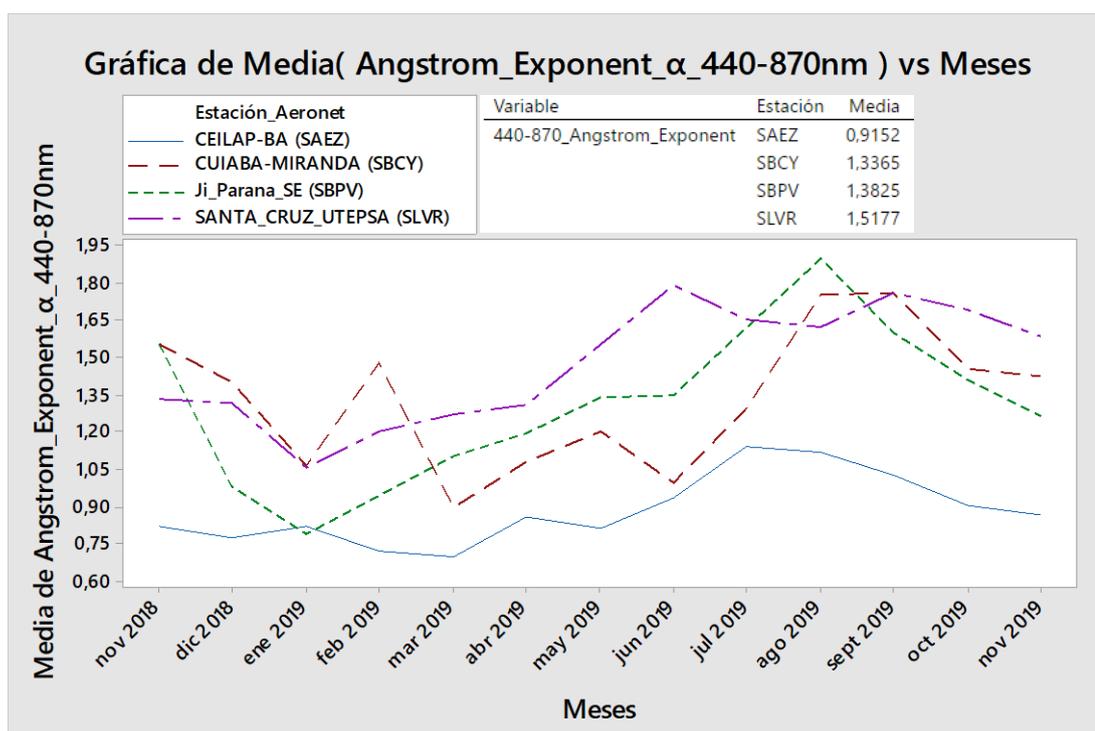


Figura 8. Gráfica Media mensual del coeficiente de Ångström($\alpha_{440-870nm}$).

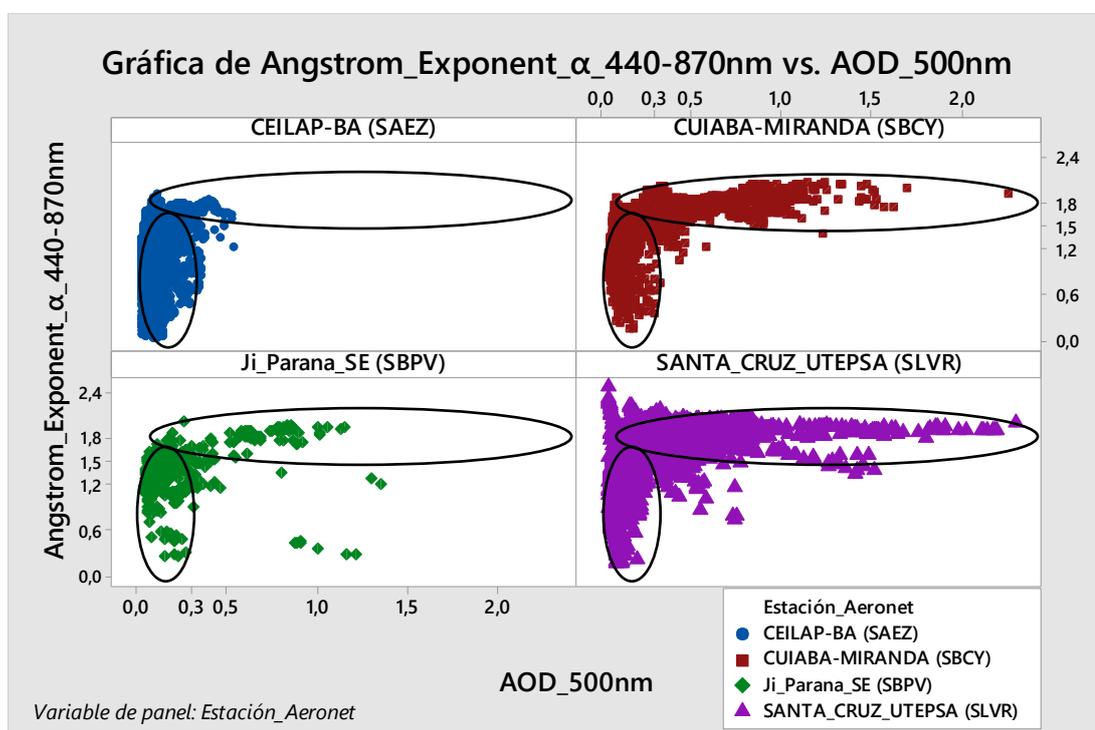


Figura 9. Gráfica de Clasificación de Aerosoles por estación.

En la Figura 9 se muestra al coeficiente de Ångström($\alpha_{440-870nm}$) versus el AOD_{500nm} , este estilo de gráficos permite clasificar el tipo de aerosoles en suspensión próxima a cada estación de aeronet (Hess et al., 1998).

Del análisis del gráfico se puede extraer que mayormente las partículas de aerosol corresponden al tipo; Quema de Biomasa, Continental Contaminado y Urbano/Industrial, de acuerdo a la Tabla 2 de clasificación de aerosoles. A continuación, se describe al tipo de aerosol para cada estación de estudio:

- Estación CEILAP-BA es del tipo Continental Contaminado y Urbano/Industrial, con aerosoles antropogénicos y polvo, ya que la estación se encuentra instalada en las afueras de la Ciudad de Buenos Aires, en una zona altamente poblada e industrializada.

- Estación CUIBA MIRANDA y Ji_Parana_SE es el tipo Continental Contaminado y Quema de Biomasa. Este último tipo de aerosoles corresponde a aerosoles con un alto contenido de humo proveniente de la quema de vegetación, actividad muy frecuente en la zona. Ambas estaciones se encuentran alejadas de zonas urbanas.

- Estación SANTA_CRUZ_UTEPSA es el tipo Quema de Biomasa, Continental Contaminado y Urbano/Industrial. Corresponde a aerosoles provenientes de la quema de vegetación y aerosoles antropogénicos, ya que la estación se encuentra en centro de la ciudad, zona urbana.

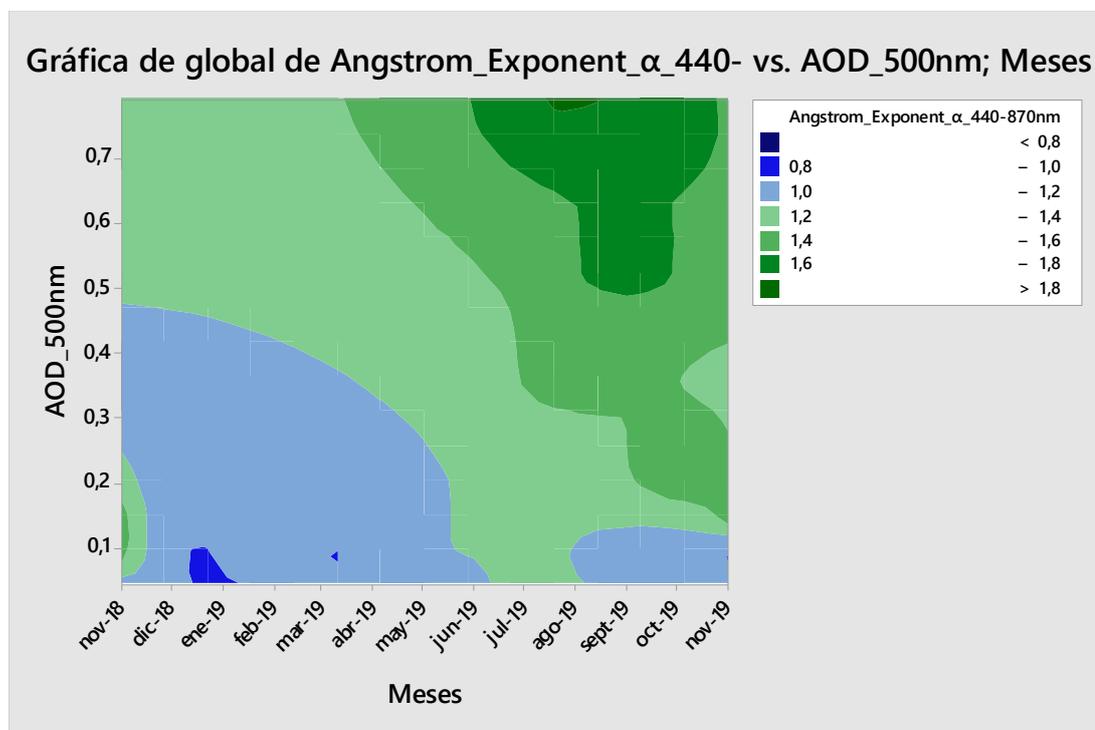


Figura 10. Gráfica de contorno Global de Clasificación de Aerosoles.

Analizando la Figura 10, gráfica de contorno global de clasificación de aerosoles, se visualiza que las regiones de color verde oscuro, corresponden a los meses de julio a octubre, las cuales están expuestas a una alta proporción a aerosoles al tipo Quema de Biomasa. Estudios de caracterización del aerosol permitieron identificar la distribución del aerosol en la atmósfera asociado a la quema de biomasa en estudios realizados en México (Aparicio, 2014) y Argentina (L. Otero et al., 2006).

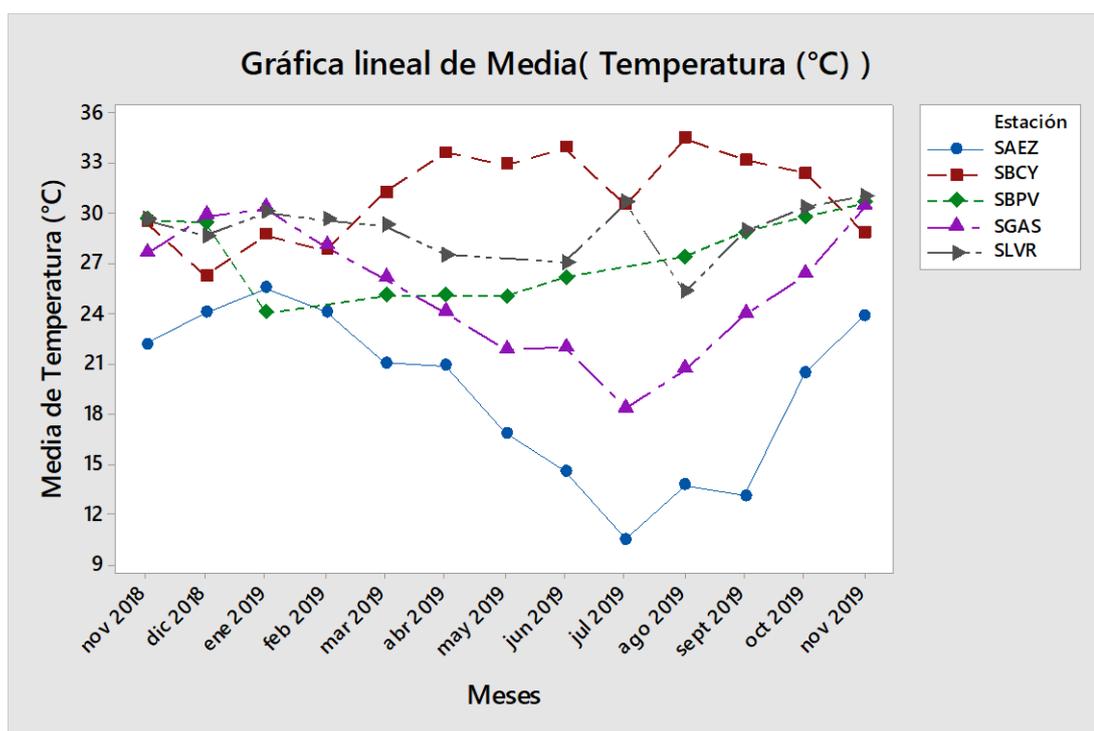


Figura 11. Gráfica lineal de Media (Temperatura °C).

En la Figura 11, gráfica lineal de media (Temperatura °C), contiene al promedio mensual de Temperatura (°C) para cada estación, observándose el claro descenso entre los meses de mayo - agosto, para las estaciones de Argentina (SAEZ) y Paraguay (SGAS). Para las estaciones de Bolivia (SLVR); Brasil (SBCY, SBPV) se visualiza un promedio que se mantiene entre los 28 – 32 °C, esto es debido a la mayor parte del noreste y norte se encuentran en la zona tropical amazónica.

Para el estudio de las condiciones meteorológicas correspondientes a la temperatura (T) y humedad relativa (HR), se aplicaron análisis estadísticos, procesados con la ayuda del software Minitab®18.1.

En la Figura 12, gráfica lineal de media (Humedad %), contiene a la distribución media mensual de Humedad (%) para cada estación, observándose la disminución de la humedad relativa entre los meses de mayo - agosto, período que corresponde a la época seca del año, debido a las escasas precipitaciones que ocurren.

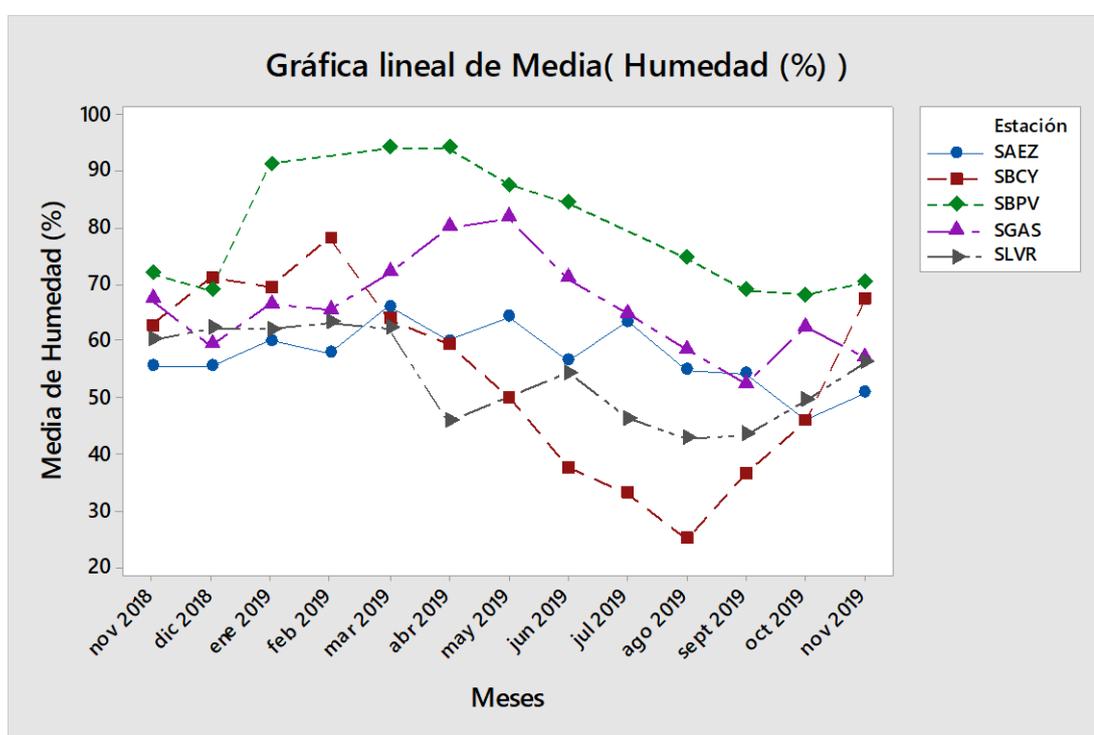


Figura 12. Gráfica lineal de Media (Humedad %).

En la Figura 13, gráfica de contorno mensual de Humedad Relativa (%) y Temperatura (°C), se observa con claridad que la reducción de la humedad relativa se corresponde con la época seca del año, donde en los meses de agosto y setiembre presentan valores $< 30\%$ y temperaturas $> 30^{\circ}\text{C}$, esta época del año también es conocida como estación de quema de biomasa en todo el continente sudamericano, generando una atmósfera altamente contaminada, que impacta directamente en la calidad aire.

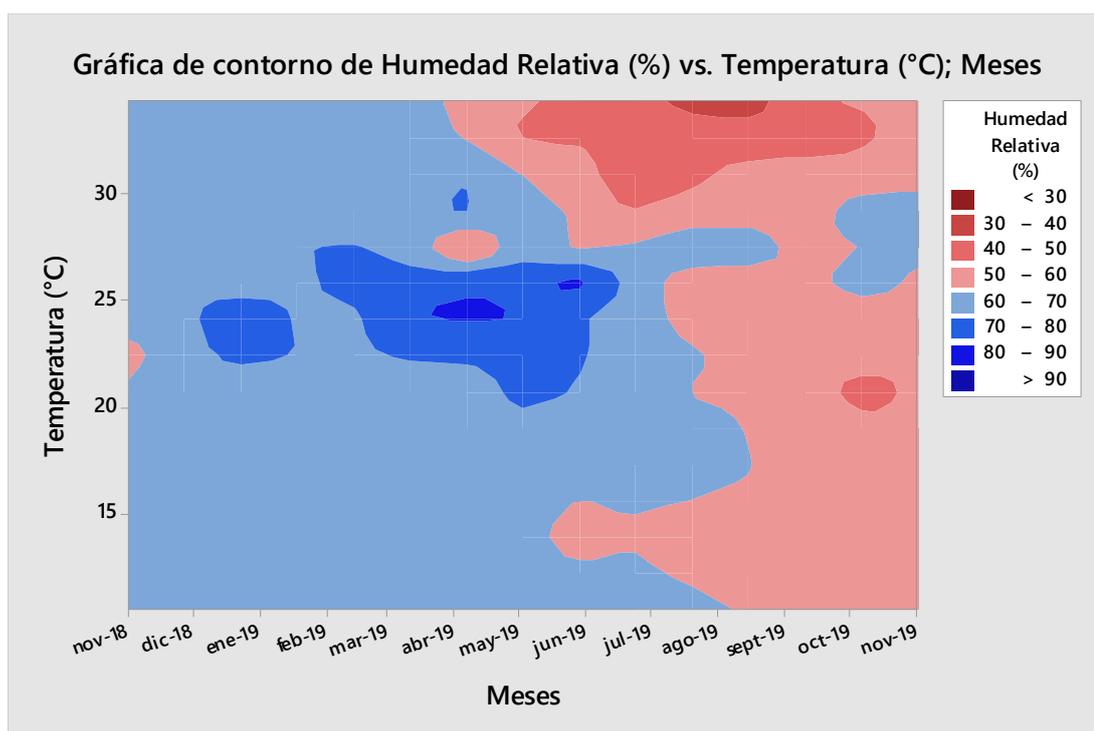


Figura 13. Distribución Global de Humedad Relativa (%) y Temperatura (°C).

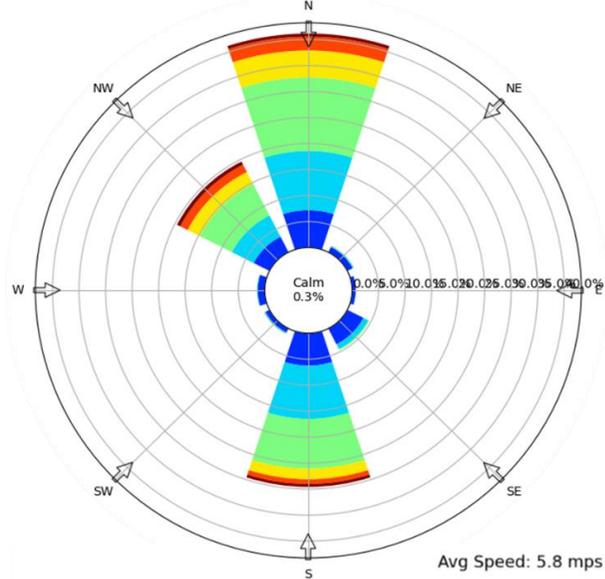
El estudio de las variables meteorológicas de velocidad del viento (VV) y dirección del viento (DV), se realizó procesando datos extraídos de la red Iowa Environmental Mesonet (IEM), para las ocho direcciones principales de la Rosa de los Vientos para describir su dirección (N, S, E, O NE, NO, SE y SO). Se utilizó el programa “online” perteneciente a la red Iowa Environmental Mesonet (IEM), obteniéndose las Figuras 14, 15, 16, 17 y 18, correspondientes a las rosas de los vientos anual para cada estación. En la Tabla 8 se visualizan los intervalos angulares aplicados para clasificar cada dirección.

Tabla 8. Intervalos angulares para clasificar la dirección del viento

Dirección	Intervalo angular (°)	Intervalo letras	Intervalo imagen
Norte	337,5 - 22,5	N	
Noreste	22,5 – 67,5	NE	
Este	67,5 – 112,5	E	
Sureste	112,5 - 157	SE	
Sur	157 – 202,5	S	
Suroeste	202,5 – 247,5	SO	
Oeste	247,5 – 292,5	O	
Noroeste	292,5 – 337,5	NO	

Los datos extraídos del análisis de las Figuras del 14 al 18, se introdujeron al software WRPLOT View, para obtener la Figura 19, Rosa de vientos GLOBAL, que representa la frecuencia de aparición de vientos predominantes ingresantes a la Ciudad de Asunción – Paraguay, para el período de estudio, obteniéndose que las componentes de mayor influencia en el transporte de masas de aire son Norte, Noroeste, Noreste y Sur.

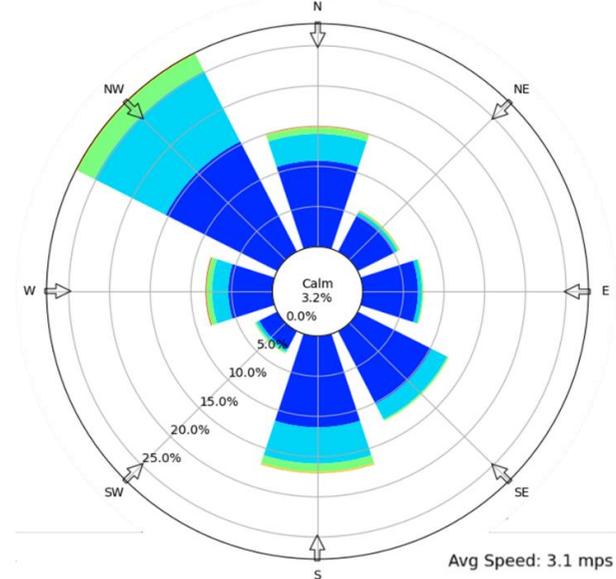
Rosa de vientos. Periodo nov/2018 a nov/2019
SANTA_CRUZ_UTEPSA_(SLVR)



Dirección	Wind Speed [meter / second]							Total
	Calma	1,0-3,9	4,0-5,9	6,0-7,9	8,0-9,9	10,0-11,9	12,0+	
337,5-22,5	0,26	7,192	11,417	14,106	5,186	2,668	0,598	41,167
22,5-67,5		1,131	0,171	0,064	0,021	0,021	0,000	1,408
67,5-112,5		0,683	0,043	0,000	0,000	0,000	0,000	0,726
112,5-157		3,414	1,024	0,213	0,000	0,000	0,000	4,651
157-202,5		6,253	10,243	9,560	2,049	0,896	0,576	29,577
202,5-247,5		0,854	0,192	0,043	0,021	0,043	0,000	1,153
247,5-292,5		1,344	0,085	0,064	0,000	0,000	0,000	1,493
292,5-337,5		3,350	4,609	6,786	2,582	1,558	0,683	19,568

Figura 14. Rosa de vientos SANTA_CRUZ_UTEPSA (SLVR)

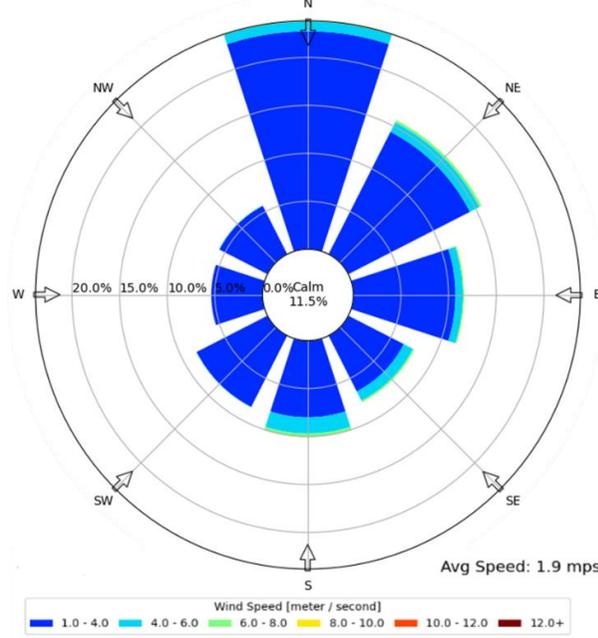
Rosa de vientos. Periodo nov/2018 a nov/2019
CUIABA-MIRANDA_(SBCY)



Dirección	Wind Speed [meter / second]							Total
	Calma	1,0-3,9	4,0-5,9	6,0-7,9	8,0-9,9	10,0-11,9	12,0+	
337,5-22,5	3,17	10,708	3,336	0,762	0,103	0,021	0,021	14,951
22,5-67,5		5,107	0,391	0,185	0,062	0,000	0,021	5,766
67,5-112,5		6,796	0,494	0,165	0,021	0,000	0,000	7,476
112,5-157		10,152	2,183	0,185	0,021	0,000	0,000	12,541
157-202,5		11,367	4,510	1,009	0,124	0,041	0,000	17,051
202,5-247,5		2,492	0,371	0,247	0,000	0,000	0,000	3,110
247,5-292,5		5,416	1,998	0,618	0,082	0,021	0,062	8,197
292,5-337,5		15,383	9,802	2,389	0,124	0,041	0,000	27,739

Figura 15. Rosa de vientos CUIABA-MIRANDA (SBCY)

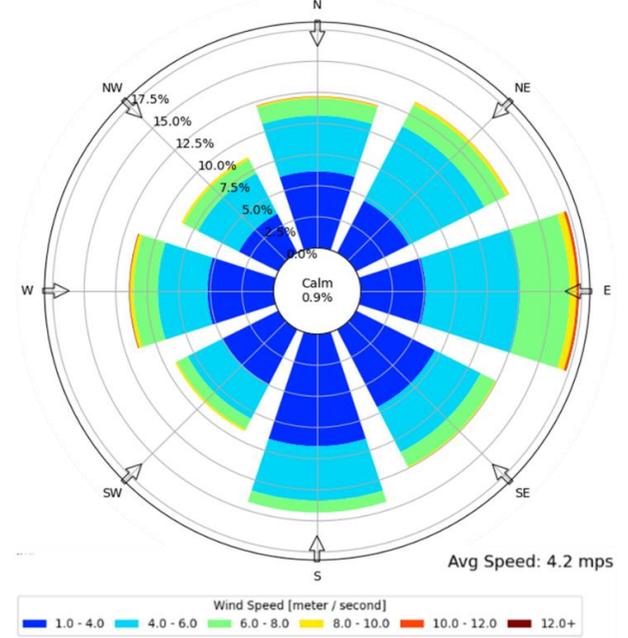
Rosa de vientos. Periodo nov/2018 a nov/2019
 Ji_Parana_SE_(SBPV)



Dirección	Calma	1,0-3,9	4,0-5,9	6,0-7,9	8,0-9,9	10,0-11,9	12,0+	Total
337,5-22,5	11,52	22,725	1,013	0,060	0,020	0,000	0,000	23,818
22,5-67,5		14,323	1,112	0,238	0,020	0,000	0,000	15,693
67,5-112,5		10,727	0,775	0,099	0,040	0,000	0,000	11,641
112,5-157		6,536	1,073	0,159	0,020	0,000	0,000	7,788
157-202,5		8,006	1,689	0,318	0,020	0,020	0,000	10,053
202,5-247,5		8,343	0,040	0,000	0,000	0,000	0,000	8,383
247,5-292,5		5,383	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	5,383
292,5-337,5		5,662	0,040	0,020	0,000	0,000	0,000	5,722

Figura 16. Rosa de vientos JI_PARANA (SBPV)

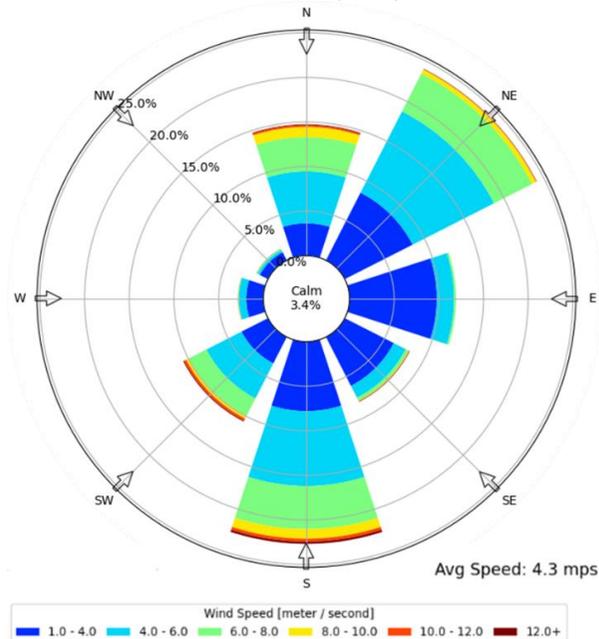
Rosa de vientos. Periodo nov/2018 a nov/2019
 CEILAP-BA_(SAEZ)



Dirección	Calma	1,0-3,9	4,0-5,9	6,0-7,9	8,0-9,9	10,0-11,9	12,0+	Total
337,5-22,5	0,89	6,165	4,474	1,381	0,124	0,041	0,000	12,185
22,5-67,5		4,680	6,722	1,938	0,247	0,021	0,000	13,608
67,5-112,5		5,134	7,485	3,918	0,536	0,165	0,041	17,279
112,5-157		7,010	4,062	1,299	0,103	0,000	0,000	12,474
157-202,5		9,010	4,371	0,948	0,000	0,000	0,000	14,329
202,5-247,5		4,948	3,113	0,948	0,165	0,000	0,000	9,174
247,5-292,5		5,237	3,938	1,918	0,289	0,021	0,041	11,444
292,5-337,5		3,505	3,649	1,258	0,206	0,000	0,000	8,618

Figura 17. Rosa de vientos CEILAP_BA (SAEZ)

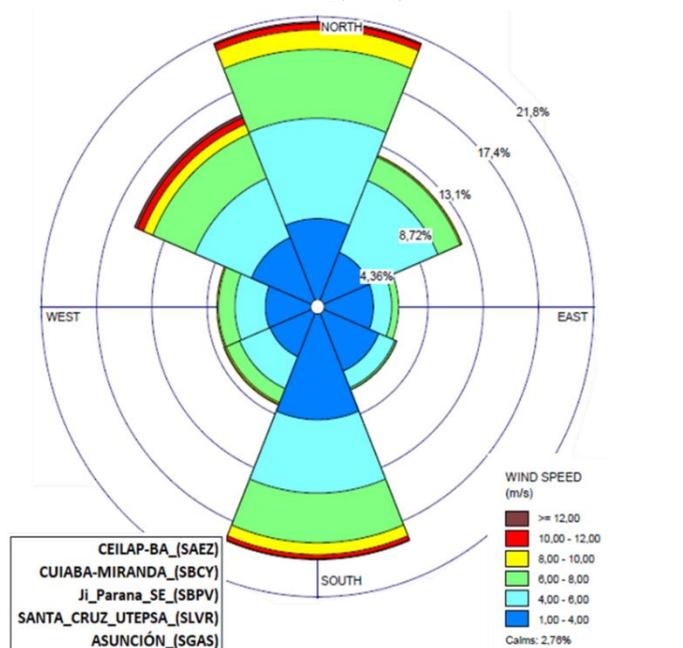
Rosa de vientos. Periodo nov/2018 a nov/2019
ASUNCIÓN_(SGAS)



Dirección	Calma	1,0-3,9	4,0-5,9	6,0-7,9	8,0-9,9	10,0-11,9	12,0+	Total
337,5-22,5	3,41	3,639	5,822	3,847	1,144	0,208	0,083	14,743
22,5-67,5		8,526	10,231	4,762	0,520	0,042	0,042	24,123
67,5-112,5		9,773	1,934	0,208	0,000	0,000	0,000	11,915
112,5-157		6,155	1,497	0,354	0,062	0,062	0,042	8,172
157-202,5		7,798	8,401	4,824	1,081	0,333	0,250	22,687
202,5-247,5		3,327	4,408	2,204	0,333	0,270	0,104	10,646
247,5-292,5		1,913	0,832	0,062	0,021	0,021	0,000	2,849
292,5-337,5		1,019	0,270	0,146	0,000	0,000	0,021	1,456

Figura 18. Rosa de vientos ASUNCIÓN (SGAS)

Rosa de vientos. Periodo nov/2018 a nov/2019
ASUNCIÓN_(SGAS)



Dirección	Calma	1,0-3,9	4,0-5,9	6,0-7,9	8,0-9,9	10,0-11,9	12,0+	Total
337,5-22,5	0,89	6,165	4,474	1,381	0,124	0,041	0,000	12,185
22,5-67,5		4,680	6,722	1,938	0,247	0,021	0,000	13,608
67,5-112,5		5,134	7,485	3,918	0,536	0,165	0,041	17,279
112,5-157		7,010	4,062	1,299	0,103	0,000	0,000	12,474
157-202,5		9,010	4,371	0,948	0,000	0,000	0,000	14,329
202,5-247,5		4,948	3,113	0,948	0,165	0,000	0,000	9,174
247,5-292,5		5,237	3,938	1,918	0,289	0,021	0,041	11,444
292,5-337,5		3,505	3,649	1,258	0,206	0,000	0,000	8,618

Figura 19. Rosa de vientos GLOBAL

Al analizar la Figura 20, gráfica de la distribución Focos Incendios mensuales, se observa que los máximos picos de incendios forestales que se registran agosto y setiembre en las estaciones de Bolivia (SANTA_CRUZ_UTEPSA); Brasil (CUIABA-MIRANDA); Brasil (JI_PARANA) y Paraguay (Región Occidental). La inmensa cantidad de focos de incendios producidos en la región Amazónica, que abarca en mayor extensión al Brasil y en menor extensión a Bolivia, y la región del Gran Chaco, en el que se incluye a Bolivia, Paraguay y Argentina, son impulsados mayormente por la ganadería, incentivado por los comercios internacionales de carne y cuero, y la agricultura mecanizada para la producción de soja, que utilizan el método tala y quema para uso de la tierra.

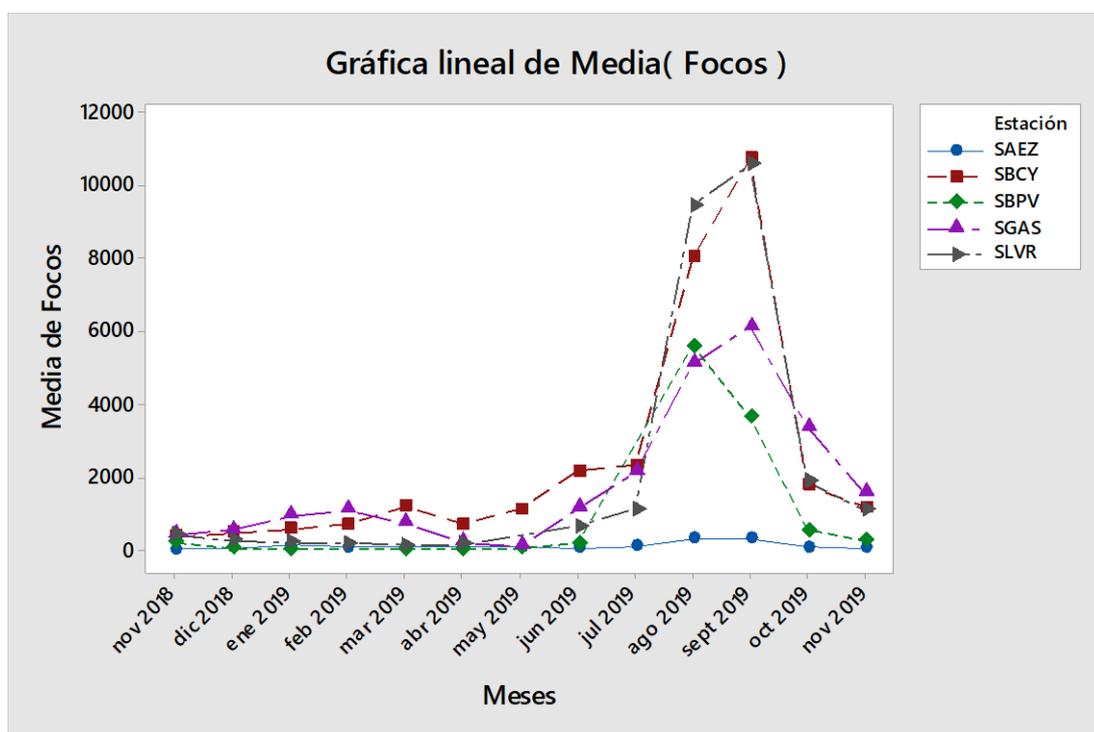


Figura 20. Gráfica de la distribución Focos de incendios mensuales.

Tal como se describió en las Figuras 11, 12 y 13, el correspondiente descenso de la humedad relativa a un mínimo para los meses de agosto-setiembre, con un aumento en la velocidad e intensidad de vientos, generan las condiciones meteorológicas propicias para los incendios, verificándose que las componentes de los vientos que contribuyen principalmente al transporte de masas de aire contaminado son; Norte (N), Noreste (NE), Noroeste (NO) y Sur (S), condiciones meteorológicas observables en la Figura 21 y 22.

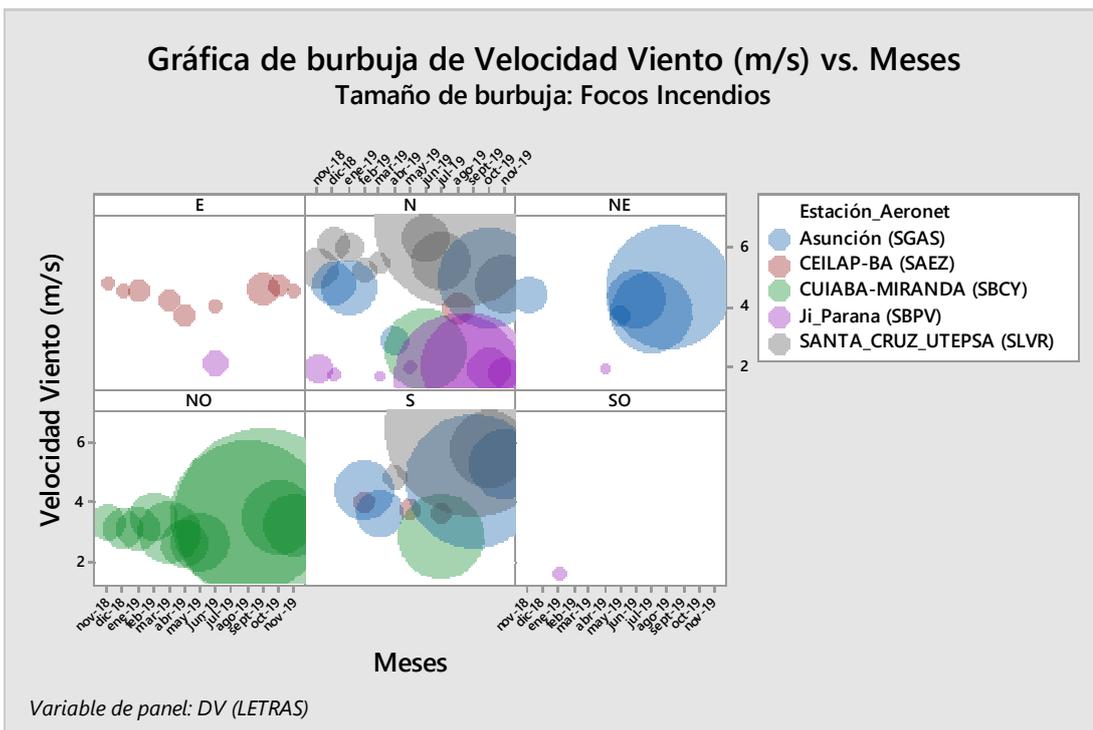


Figura 21. Distribución de la media Focos Incendios y Velocidad Vientos.

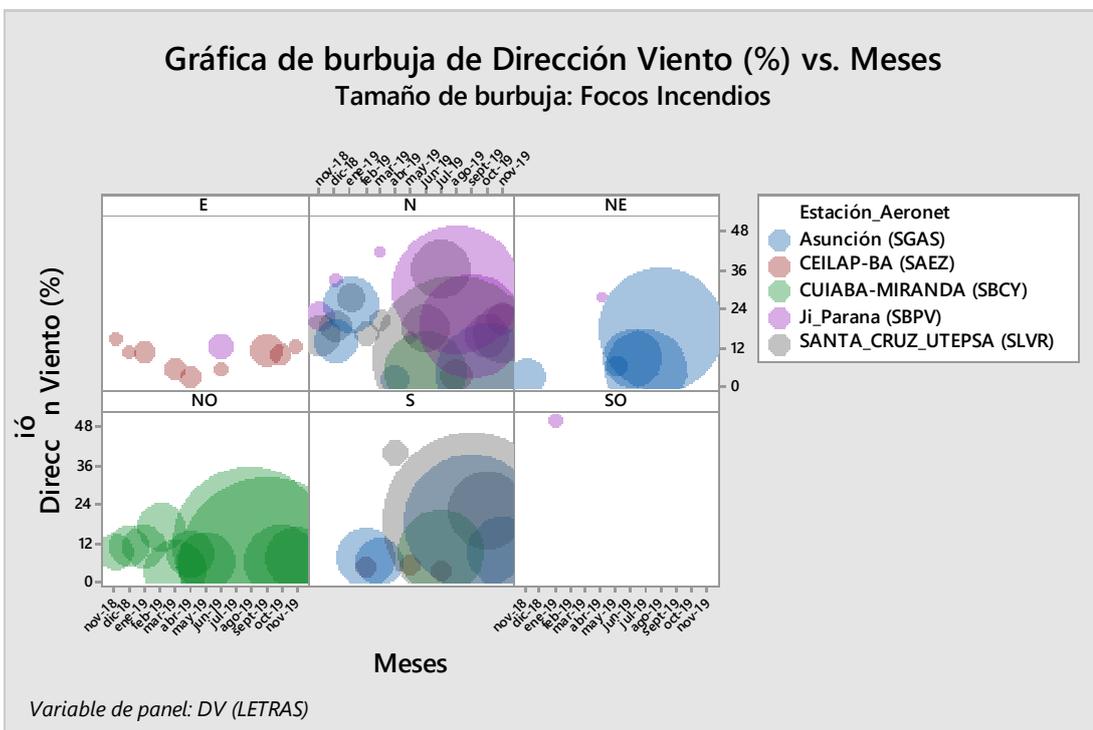


Figura 22. Distribución de la media Focos Incendios e Intensidad de Vientos.

En la Figura 23, se observa que básicamente los incendios producidos en las regiones de estudio son la principal causa en la producción de aerosoles en la atmósfera, que en la temporada seca son transportados por el movimiento de las masas de aire mediante las componentes N-NO-NE-S de los vientos. En la Región de Sudamérica, esta época del año también es conocida como estación de quema de biomasa, donde incendios locales son una importante fuente de aerosoles atmosféricos en todo el continente Sudamericano. Así, por ejemplo, se estima que, durante la estación seca, debido al patrón de circulación continental típico, más del 30% del AOD en Paraguay y norte de Argentina proviene de los incendios de las regiones Amazonia y Cerrado de Brasil (Castro Videla, Barnaba, Angelini, Cremades, & Gobbi, 2013).

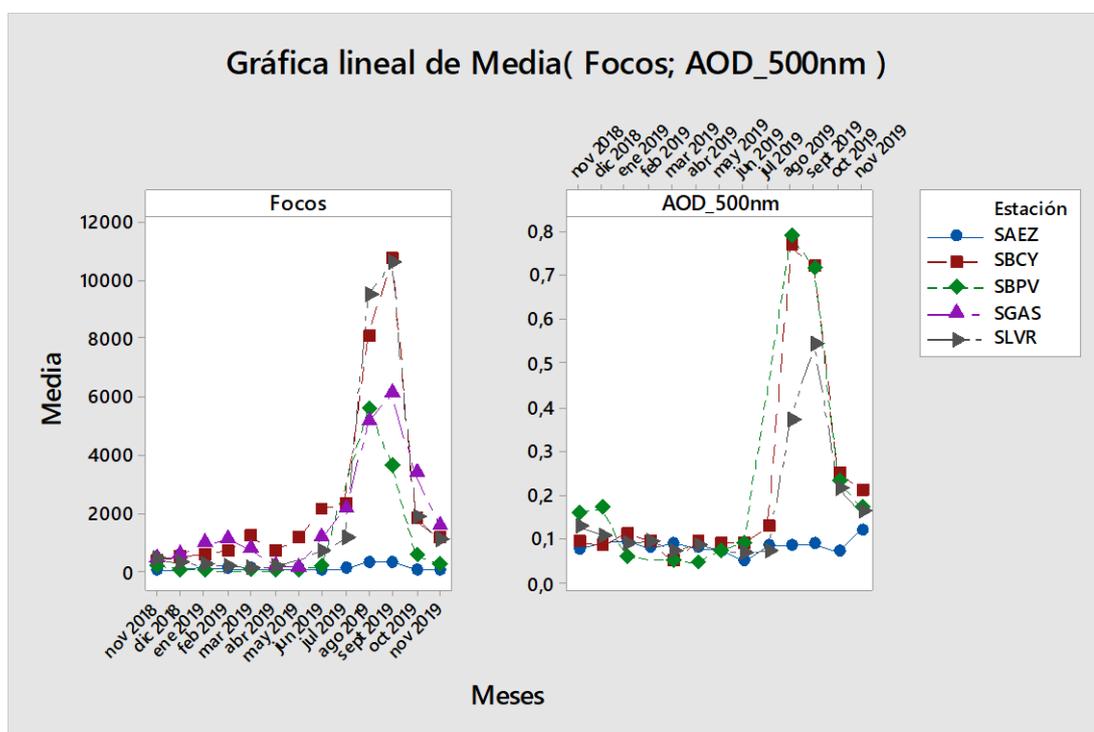


Figura 23. Gráfica de la distribución de la media Focos de incendios y AOD.

El transporte de estos eventos de contaminación registrados en los meses de agosto/2019 y setiembre/2019 (Figura 23), fue evaluado utilizando el máximo pico de contaminación generado a finales de agosto/2019, aplicando el modelo HYSPLIT, desarrollado por el Air Resources Laboratory de la NOAA, obteniéndose las Figuras 24 al 27.

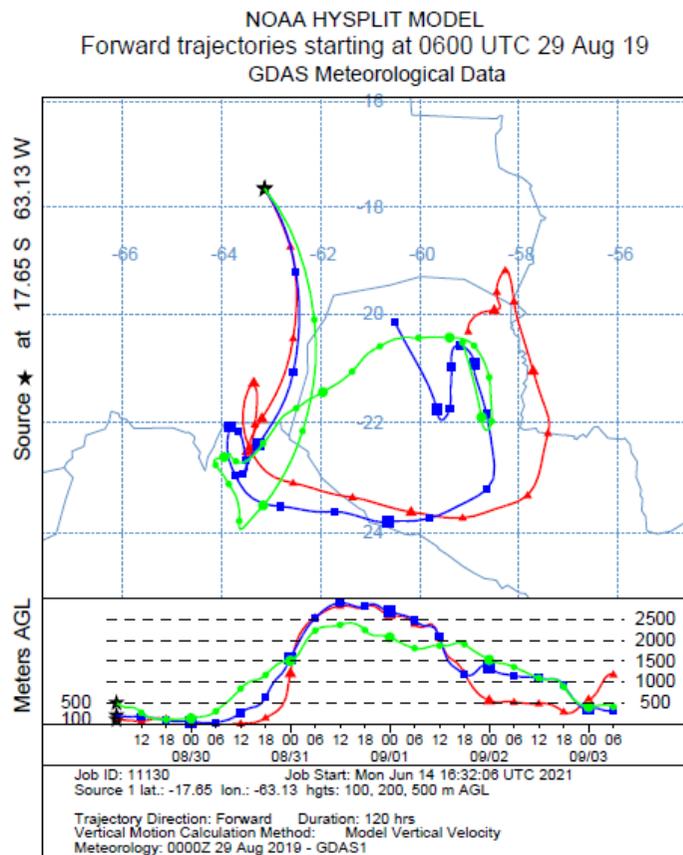


Figura 24. Trayectoria de evento contaminante SANTA_CRUZ_UTEPSA (SLVR).

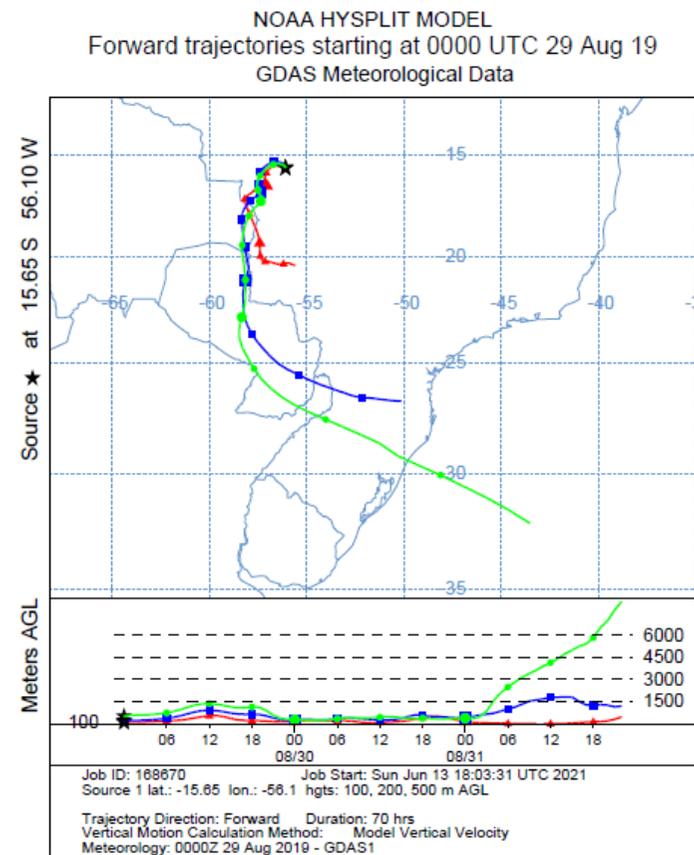


Figura 25. Trayectoria de evento contaminante CUIABA-MIRANDA (SBCY).

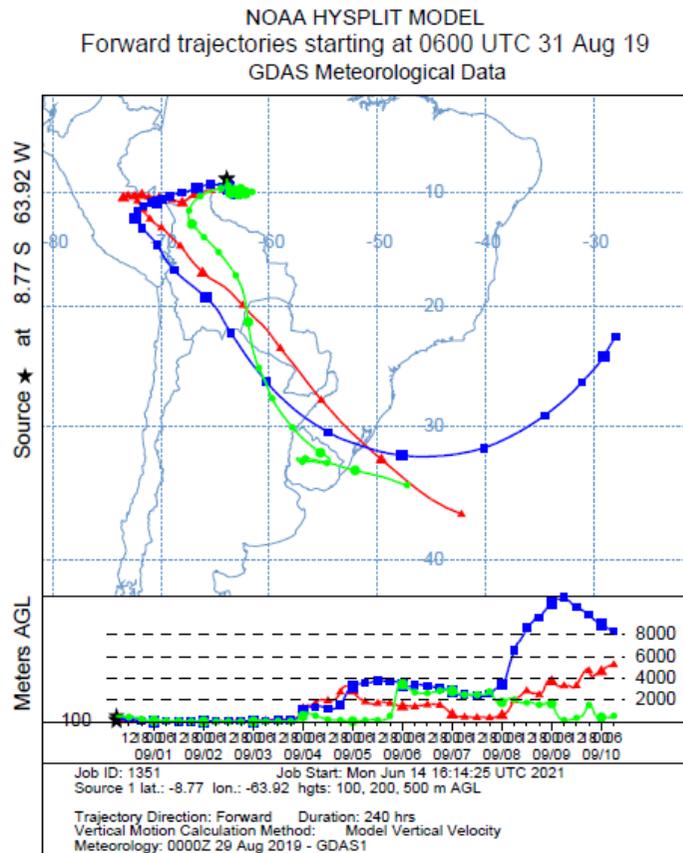


Figura 26. Trayectoria de evento contaminante JI_PARANA (SBPV).

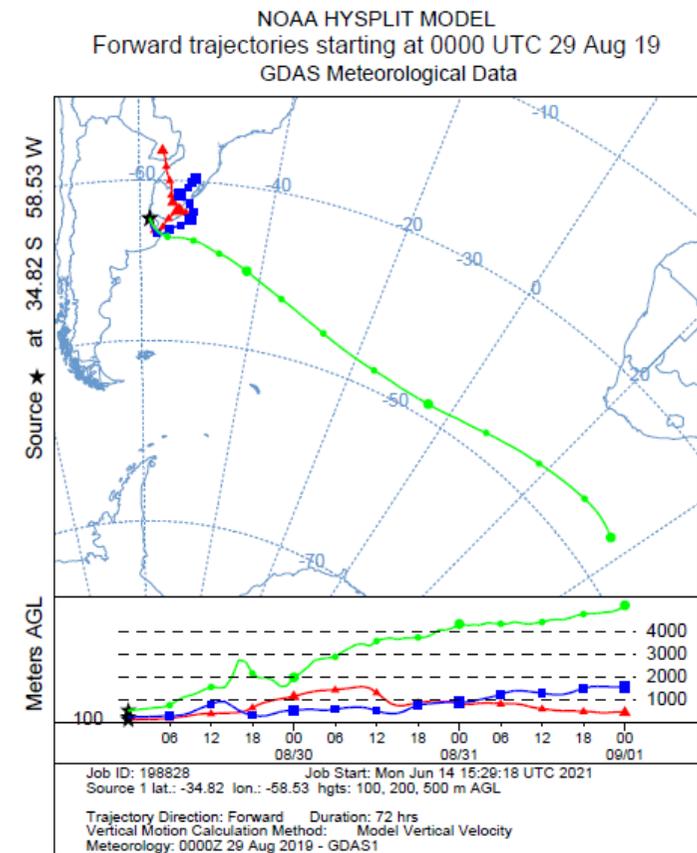


Figura 27. Trayectoria de evento contaminante CEILAP_BA (SAEZ).

Las Figuras 24 al 27, presentan las retrotrayectorias de las masas de aire para días posteriores a 29 de agosto/2019, de alta contaminación, con origen en quemas de biomasa desarrolladas en las estaciones AERONET de estudio, que influenciados por las componentes predominantes de N-NO-NE-S de los vientos, son causantes de la modificación de la atmósfera sobre la ciudad de Asunción - Paraguay.

El evento contaminante SANTA_CRUZ_UTEPSA (SLVR), no atraviesa por la ciudad de Asunción, queda en circulación en la región del Gran Chaco, que incluye a Bolivia, Paraguay y Argentina, durante esta trayectoria el evento contaminante CUIABAMIRANDA (SBCY) y evento contaminante JI_PARANA (SBPV) se mezclan, generando el transporte de las masas de aires que viajan a la ciudad de Asunción – Paraguay a la altura de 100 y 500 metros sobre el nivel del suelo para los primeros días de setiembre. Con respecto al evento contaminante CEILAP_BA (SAEZ), la masa de aire que llega la ciudad de Asunción corresponde a la altura de 100 metros sobre el nivel del suelo en los primeros días de setiembre.

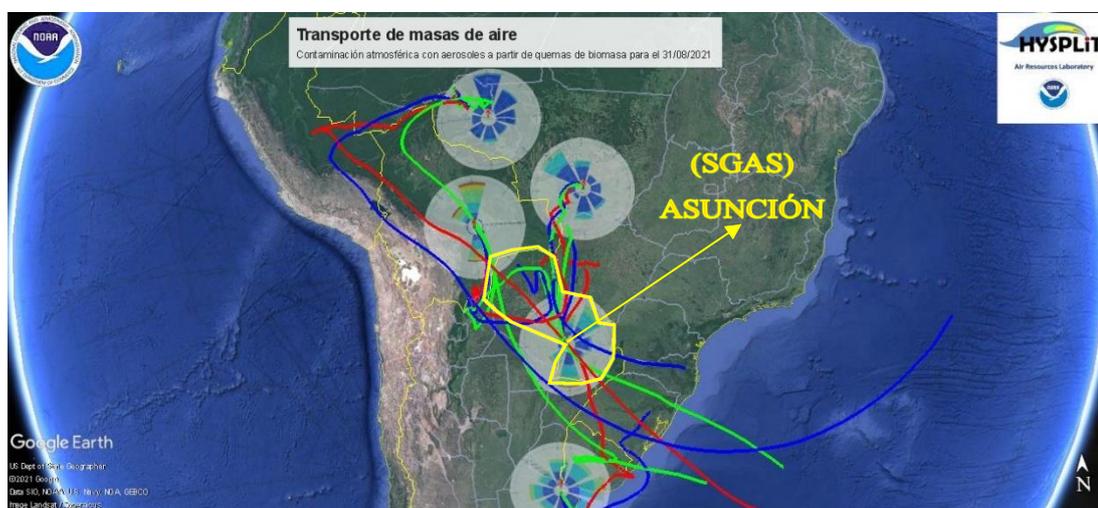


Figura 28. Trayectoria de evento contaminante Global.

Finalmente, en la Figura 28, se visualiza el análisis global de las retrotrayectorias de las masas de aire, evaluadas para agosto, mes de máxima contaminación con aerosoles del tipo Quema de Biomasa, obteniéndose que la evolución de estos eventos de contaminación de aerosoles por quema de biomasa, sobre la Ciudad de Asunción – Paraguay, densamente poblada, afecta significativamente la calidad del aire, generados en gran medida por fuentes externas.

Estudios de correlación desarrollados por algunos autores expresan escalas de interpretación, que facilitan el análisis y comprensión de datos, dicha escala se presenta a continuación en la Tabla 9 (M. Martínez, Pendás, Mercedes, Pérez, & Cánovas, 2009).

Tabla 9. Escala de interpretación de correlación.

Relación	Rango
Baja	0 – 0,20
Débil	0,21 – 0,40
Moderada	0,41-0,60
Fuerte	0,61- 0,80
Alta	0,81- 1,00

El análisis de correlación de AOD_{500nm} con las variables regresoras; temperatura (T), humedad relativa (HR), velocidad de viento (VV), dirección del viento (DV), y focos de incendios, visualizados en la Tabla 10, muestra los resultados del análisis de correlación realizado para evaluar la covariación de las variables consideradas en el modelo de regresión múltiple. Los comportamientos de estas variables son evidenciados en las Figuras 11-12-20 y 21.

Tabla 10. Coeficiente de correlación entre las variables; AOD_{500nm}: espesor óptico de aerosoles, Coeficiente de Ångström ($\alpha_{440-870nm}$), °C: temperatura, %: humedad relativa, VV: velocidad del viento, DV: dirección del viento, FI: Focos de Incendios.

Variables	AOD _{500nm}	($\alpha_{440-870nm}$)
($\alpha_{440-870nm}$)	0,574 Moderada < 0,001	
(°C)	0,332 Moderada < 0,001	0,396 Débil < 0,001
(%)	-0,224 Débil < 0,001	-0,133 Baja < 0,001
DV (°)	0,117 Baja < 0,001	0,271 Débil < 0,001
VV (m/s)	0,083 Baja < 0,001	0,121 Débil < 0,001
FI	0,748 Fuerte < 0,001	0,565 Moderada < 0,001

Contenido de Celda: - Correlación de Pearson
- Valor p

En los resultados de la Tabla 10, coeficiente de correlación entre las variables, se observa que los valores p son menores que el nivel de significancia de 0,05, lo cual indica que los coeficientes de correlación de Pearson son estadísticamente significativos, y existe una asociación estadísticamente significativa entre la variable AOD_{500nm} ; y las variables regresoras; focos de incendios (FI), velocidad de viento (VV), dirección del viento (DV), temperatura ($^{\circ}C$) y humedad relativa (%), estableciendo que los cambios de las variables regresoras influyen en los cambios de la dependiente AOD_{500nm} .

Finalmente, se establece que la variable AOD_{500nm} posee una correlación positiva fuerte con Focos de Incendios; una correlación positiva moderada con la temperatura y Coeficiente de Ångström ($\alpha_{440-870nm}$); una correlación negativa débil con la humedad relativa; una correlación positiva baja con la dirección y velocidad del viento. Estudios estadísticos de la correlación entre contaminantes atmosféricos y variables meteorológicas realizados en México (Ramos et al., 2010), han demostrado una correlación con la humedad relativa (HR) negativa; y positiva con la temperatura (T).

En cuanto al análisis del efecto de la dirección y velocidad del viento en la concentración de los aerosoles se observó la existencia de una correlación positiva baja. Estudios realizados por L. A. Otero y colaboradores, (2020), expusieron que el tipo de aerosol que se encuentra en suspensión en la atmósfera es influenciado por la dirección de los vientos.

El R-cuadrado (R^2) también se conoce como el coeficiente de determinación o determinación múltiple (en la regresión lineal múltiple). El coeficiente de determinación (R^2) del modelo de regresión lineal múltiple, expresa el porcentaje de variación de la variable de respuesta que explica su relación con una o más variables predictoras. Por lo general, mientras mayor sea el R^2 , mejor será el ajuste del modelo a sus datos. El R^2 siempre se encuentra entre 0 y 100%.

Con los resultados del análisis de correlación se aplican las corridas de regresión lineal múltiple en el software Minitab[®]18, donde se estimó el espesor óptico de aerosoles (AOD), utilizando como variables regresoras a los focos de incendios y la meteorológica de superficie: velocidad de viento (VV), dirección del viento (DV),

temperatura (°C) y humedad relativa (%). El modelo de regresión lineal múltiple descrito en la Tabla 11 que incorpora todas estas variables presentó un $R^2=75,58\%$ y un $p < 0,001$, es decir que explica un 75,58 % de la variabilidad de AOD_{500nm} observada, un valor relativamente fuerte.

Tabla 11. Porcentaje (%) de variación explicado por el modelo.

S	R^2	R^2 (ajustado)	R^2 (predictivo)	
0,101192	75,58%	72,74%	64,75%	$R^2 = 75,58\%$

El modelo de regresión puede explicar el 75,58 % de la variabilidad de AOD_{500nm}

Tabla 12. Modelo de regresión lineal múltiple.

Ecuación de regresión	
	+ 0,226
	+ 0,000060 * Focos Incendios
	- 0,00088 * Temperatura (°C)
$AOD_{500nm} =$	- 0,00069 * Humedad (%)
	- 0,0331 * Velocidad Viento (m/s)
	+ 0,000194 * Dirección Viento (°)

En la Tabla 12, se presenta al modelo de regresión lineal múltiple desarrollado en este estudio, el cual, según la escala de interpretación de correlación (ver Tabla 9), posee suficiente fuerza para explicar con exactitud la variabilidad de los datos de AOD_{500nm} calculados a través la red AERONET y las variables meteorológicas sobre la ciudad de Asunción. Sin embargo, las estimaciones de AOD_{500nm} obtenidas presentan aproximaciones predictivas con $R^2(\text{predictivo})=64,75\%$ como se visualiza en la Tabla 11, al nivel de significancia de $p < 0,05$, para el periodo nov/2018 a nov/2019, constituyendo así el primer estudio exploratorio para la ciudad de Asunción con datos de la red AERONET.

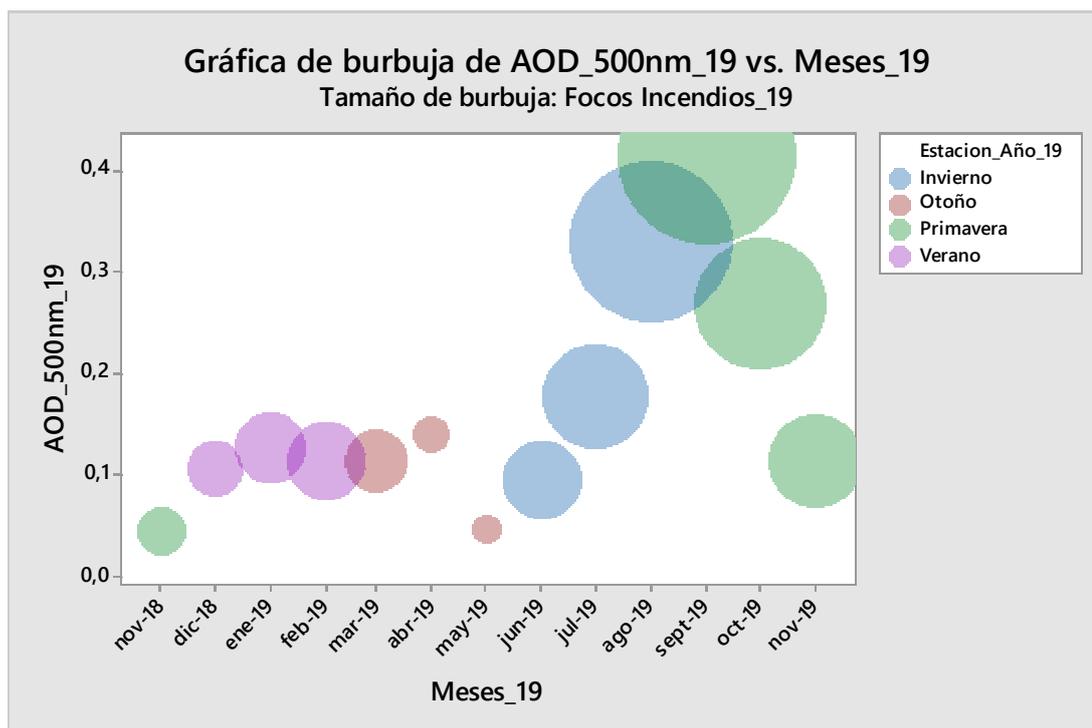


Figura 29. Distribución de AOD_{500nm}; Focos Incendios vs meses periodo 2019

En la Figura 29, Distribución de AOD_{500nm}; Focos Incendios vs meses para el periodo 2019 (_19) se visualiza que la estimación de AOD_{500nm} es mayor al 0,2 entre los meses de agosto/2019 a setiembre/2019, llegando a máximo de 0,4143 en setiembre (ver Tabla 13), este nivel de AOD_{500nm} se atribuye a la mayor frecuencia de incendios generados por condiciones meteorológicas favorables. Además, se debe tener en cuenta que, en las regiones de estudio, esta época del año es conocida como estación de quema de biomasa, donde los incendios locales son una importante fuente de aerosoles atmosféricos que son transportados por las masas de aire a través de los componentes de vientos predominantes N-NO-NE-S sobre la ciudad de Asunción – Paraguay.

Tabla 13. Estadísticos descriptivos mensuales para la estación SGAS (Asunción)

Variable	Estación_Aeronet_19	Media	Desv.Est.	Mínimo	Máximo
AOD_500nm_19	Asunción (SGAS)	0,1596	0,1110	0,0440	0,4143
Å_α_440-870nm_19	Asunción (SGAS)	1,1966	0,1928	0,9217	1,5084

Para clasificar el tipo de aerosoles presentes en la ciudad de Asunción, para el periodo 2019 (_19) se grafica el Coeficiente de Ångström ($\alpha_{440-870\text{nm}}$) versus el $\text{AOD}_{500\text{nm}}$. Como se está trabajando con valores medios mensuales de AOD, también se calculará el valor medio mensual del coeficiente de Ångström. Al realizar este estudio con valores medios, proporciona información del tipo de aerosoles más frecuentes en cada estación.

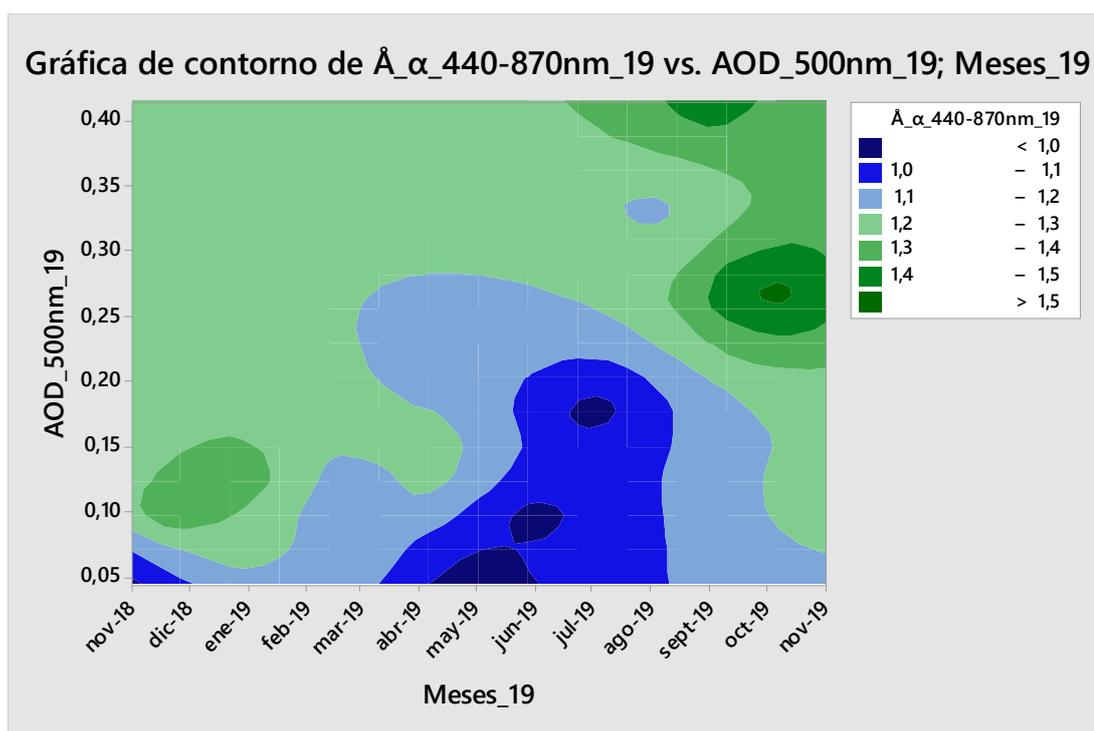


Figura 30. Gráfica de contorno Ångström ($\text{Å}_{\alpha_{440-870\text{nm}}_{19}}$) y $\text{AOD}_{500\text{nm}}_{19}$

A partir de la Figura 30, se obtiene que los aerosoles predominantes sobre la ciudad de Asunción – Paraguay tipo Quema de Biomasa y Continental Contaminado, de acuerdo a la Tabla 2 de clasificación de aerosoles.

De manera a evaluar la fuerza de predicción del modelo de regresión lineal obtenido en el software Minitab®18, con un coeficiente de determinación predictivo al 64,75 %, se efectuó la comparación entre Predicción de AOD_{500nm} y valores actuales del recientemente Fotómetro Cimel 318, instalado en la estación de Asunción – Paraguay. La intercomparación se realizó para los meses de abril, mayo y junio, correspondientes a los años 2019, 2020 y 2021.

Tabla 14. Ecuación de regresión $R^2(\text{predictivo}) = 64,75 \%$.

$$\text{AOD}_{500\text{nm}} = 0,226 + 0,000060 \text{ Focos Incendios} - 0,00088 \text{ Temperatura } (^{\circ}\text{C}) - 0,00069 \text{ Humedad } (\%) - 0,0331 \text{ Velocidad Viento (m/s)} + 0,000194 \text{ Dirección Viento } (^{\circ})$$

Tabla 15. Datos de variables regresoras para la predicción de AOD_{500nm}.

Variables	2019			2020			2021		
	Abr	May	Jun	Abr	May	Jun	Abr	May	Jun
Focos Incendios	197	113	1131	3568	2028	1600	663	763	803
Temperatura (°C)	24	22	22	24	20	20	23	20	18
Humedad (%)	80	82	71	59	66	71	74	76	81
Velocidad Viento (m/s)	2,81	3,66	4,25	3,2	3,6	4,3	3,44	3,17	1,34
Dirección Viento (°)	45	45	45	180	45	45	45	45	180

En la Tabla 15 se verifica que, las variables de Temperatura (°C), Velocidad Viento (m/s), y Dirección Viento (°), permanecen casi inalterables para los meses evaluados. En cambio, en el año 2020, se visualiza incrementos muy elevados de focos de incendios, con reducción de alrededor de entre el 10 – 20 % en Humedad, en comparación a los años 2019 y 2021.

En la Tabla 16, se visualiza que la predicción para el año 2020, indica eventos de contaminación elevados de AOD_{500nm} en comparación a los años 2019 y 2021. Dicha concentración de contaminante guarda estricta relación con los focos de incendios generados en el mismo periodo, verificados en la Tabla 15.

Tabla 16. Predicción de AOD_{500nm} y valores actuales del Fotómetro Cimel 318.

Año	Mes	AOD _{500nm}	IC de 95%
2019	Abr	0,077419	(-0,005979; 0,160819)
	May	0,044693	(-0,005979; 0,160819)
	Jun	0,093650	(0,016658; 0,170643)
2020	Abr	0,306838	(0,256711; 0,356965)
	May	0,174009	(0,102760; 0,245258)
	Jun	0,121832	(0,043605; 0,200058)
2021	Abr	0,089477	(0,013507; 0,165448)
	May	0,105665	(0,029906; 0,181424)
	Jun	0,103067	(0,114859; 0,271275)
2021	Abr	0,078	RED AERONET ASUNCIÓN (SGAS)
	May	0,095	
	Jun	0,082	

Se contempla además en la Tabla 16, que los valores promedios obtenidos con el fotómetro Cimel 318 de la red AERONET, puesto en funcionamiento a finales de marzo/2021, para los meses de abril, mayo y junio, se encuentran dentro del intervalo de confianza al 95%. Lo que hace al modelo Predicción de espesor óptico de aerosoles (AOD_{500nm}) obtenido en el software Minitab®18, aplicando las variables regresoras de focos de incendios y meteorológica de superficie: velocidad de viento (VV), dirección del viento (DV), temperatura (°C) y humedad relativa (%), bastante fuerte para estimar la concentración de este contaminante sobre la ciudad de Asunción – Paraguay.

6. CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se estimó la concentración de los aerosoles atmosféricos sobre la ciudad de Asunción y sus alrededores, mediante el aporte de quemas de biomasa, utilizando datos de espesor óptico de aerosoles (AOD) obtenidas de la red AERONET (Aerosol Robotic Network) para cuatro (4) estaciones, aplicando análisis estadísticos para el periodo noviembre/2018 a noviembre/2019, obteniéndose las siguientes conclusiones:

El estudio estadístico de las mediciones de espesores ópticos del aerosol (AOD) para las estaciones de Bolivia (SANTA_CRUZ_UTEPSA); Brasil (CUIABA-MIRANDA) y Brasil (JI_PARANA), ubicadas al norte de Asunción - Paraguay, arrojan elevados valores media mensual de AOD_{500nm} y coeficiente de Ångström $_{(\alpha 440-870nm)}$ para los meses de agosto/2019 – setiembre/2019 característicos de una atmósfera altamente contaminada. La estación al sur de Asunción - Paraguay presenta variación de media mensual constante mínima de 0,1, debido a las fuertes corrientes de vientos preferenciales típico de la zona.

La caracterización de este contaminante atmosférico queda en evidencia al enfrentar en una gráfica los valores media mensual de AOD_{500nm} y coeficiente de Ångström $_{(\alpha 440-870nm)}$, visualizándose que, para los meses de agosto/2019 – setiembre/2019, las estaciones ubicadas al norte de Asunción – Paraguay, están expuestas a aerosoles del tipo Quema de Biomasa, Continental Contaminado y Urbano/Industrial, mientras que para la estación al sur de Asunción – Paraguay contiene tipo Continental Contaminado y Urbano/Industrial.

El estudio de las condiciones meteorológicas correspondientes a la temperatura (T) y humedad relativa (HR), se observa una correspondencia entre la estación de Argentina (SAEZ) y Paraguay (SGAS) indicando un claro descenso de ambas variables para los

meses de mayo – agosto, período que corresponde a la época seca del año. Para las estaciones ubicadas al norte de Asunción – Paraguay, la temperatura permanece invariable con una media entre 28 – 32°C, característico de zona tropical amazónica, y la humedad presenta un descenso típico para los meses de mayo – agosto.

A partir del estudio de velocidad y dirección de vientos predominantes en cada estación de la red AERONET, se logró diseñar la rosa de los vientos GLOBAL, para estimar la frecuencia de aparición de vientos ingresantes a la Ciudad de Asunción – Paraguay, para el período de estudio, determinándose que los vectores de mayor influencia en el transporte de masas de aire son las componentes Norte (N), Noroeste (NO), Noreste (NE) y Sur (S).

Se identificó y cuantificaron los focos de incendios para cada estación de la red AERONET, visualizándose, que los incendios producidos en las regiones de estudio, se corresponden con el mínimo de la humedad relativa y el aumento en la velocidad e intensidad de vientos con componentes predominantes de N-NE-NO-S para los meses de mayo-octubre, estas condiciones ponen en evidencia el aumento del espesor óptico del aerosol (AOD) para los meses de agosto – setiembre.

La evolución de estos eventos de contaminación de aerosoles por quema de biomasa, sobre la Ciudad de Asunción – Paraguay, densamente poblada, entre agosto – setiembre de 2019 afectó significativamente la calidad del aire. Las retrotrayectorias de las masas de aire para días de alta contaminación, obtenidas a partir del modelo HYSPLIT, muestran que dicho evento tuvo su origen en las quemas de biomasa desarrolladas en las regiones donde se encuentran las estaciones AERONET de estudio, que influenciados por las componentes predominantes de N-NO-NE-S de los vientos, son causantes de la modificación de la atmósfera sobre la ciudad de Asunción.

El modelo de regresión lineal múltiple desarrollado en este estudio posee suficiente fuerza para explicar con exactitud la variabilidad de los datos de AOD_{500nm} calculados a través la red de AERONET y las variables meteorológicas sobre la ciudad de Asunción. Sin embargo, las estimaciones de AOD_{500nm} obtenidas presentan aproximaciones predictivas con $R^2(\text{predictivo})=64,75 \%$, para el periodo nov/2018 a nov/2019, constituyendo el primer estudio exploratorio para la ciudad de Asunción.

7. FUTURAS INVESTIGACIONES

Queda como trabajo futuro analizar la influencia de la velocidad del viento como forzante de los aerosoles, teniendo en cuenta la capa límite.

Por otro lado, sería deseable estimar la concentración de AOD_{500nm} mensual por hora, para definir el horario al cual se encuentra a mayor exposición la población.

Siendo los aerosoles atmosféricos uno de los principales contaminantes considerados en estudios de calidad del aire, por sus efectos en la salud humana, se recomienda, continuar este estudio incluyendo los nuevos datos registrados con el fotómetro Cimel 318, con la finalidad de que la explicación de la variabilidad total de este modelo se acerque más al 100%.

Finalmente, aplicar el modelo en los distintos departamentos del país, podría aportar las condiciones ambientales a la que está expuesta la población mensualmente, siendo de gran interés evaluar el grado de relación de las enfermedades respiratorias asociadas los eventos de contaminación con aerosoles provenientes de quema de biomasa.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AEMET. (2018). Glosario Meteorológico Visual - Agencia Estatal de Meteorología . Retrieved July 9, 2021, from <https://meteoglosario.aemet.es/>
- AERONET. (1998). *Aerosol Robotic Network (AERONET)*. Retrieved from <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>
- Andreae, M. O., Rosenfeld, D., Artaxo, P., Costa, A. A., Frank, G. P., Longo, K. M., & Silva-Dias, M. A. F. (2004). Smoking Rain Clouds over the Amazon. *Science*, *303*(5662), 1337–1342. <https://doi.org/10.1126/science.1092779>
- Angeles, R., & Angeles, J. (2017). Impacto del transporte transfronterizo de aerosoles atmosféricos debido a la quema de vegetación en la amazonia sobre la Región Andina del Perú. *Prospectiva Universitaria*, *21*.
- Ångström, A. (1929). On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air. *Geografiska Annaler*, *11*(2), 156–166. <https://doi.org/10.1080/20014422.1929.11880498>
- Aparicio, J. (2014). Caracterización de aerosoles por quema de biomasa en el sureste de México. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, *1*(1), 145–156. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tca/v5n1/v5n1a9.pdf>
- Artaxo, P., Oliveira, P., Lara, L., Pauliquevis, T., Rizzo, L., Junior, C., ... Correia, A. (2006). Efeitos climáticos de partículas de aerossóis biogênicos e emitidos em queimadas na amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, *21*(3).
- Batista, A., Rodríguez, A., Montero, K., Espinoza, O., Valverde, J., & Barrantes, M. (2016). Regresión lineal simple y múltiple: aplicación en la predicción de variables naturales relacionadas con el crecimiento microalgas. *Tecnología En Marcha*, *1*(1), 33–35. <https://doi.org/10.18845/tm.v29i8.2983>
- Benavente, N. R., & Acuña, J. R. (2015). Study of the dynamics of the aerosol optical depth in South America from MODIS images of Terra and Aqua satellites (2000-2012). *AIP Conference Proceedings*, *1527*(March), 625–628. <https://doi.org/10.1063/1.4803349>
- Buseck, P., & Schwartz, S. (2003). Tropospheric Aerosols. *Treatise on Geochemistry*, *4*(91–142). <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/04178-5>
- Castro Videla, F., Barnaba, F., Angelini, F., Cremades, P., & Gobbi, G. P. (2013). The relative role of amazonian and non-amazonian fires in building up the aerosol optical depth in south america: A five year study (2005-2009). *Atmospheric Research*, *122*, 298–309. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2012.10.026>

- Cholan, E. (2016). Estimación del espesor óptico de los aerosoles a partir de los datos Level 1B del sensor MODIS sobre Perú. *Revista de Investigación de Física*, 19(2), 1–247. Retrieved from http://repositorio.concytec.gob.pe/bitstream/20.500.12390/129/6/Cholan_re.pdf
- CIMEL. (2020). *CE318-T Photometer* (Vol. 1). Retrieved from https://www-loa.univ-lille1.fr/documents/PHOTONS/Support_photons/DOCUMENTATIONS/CE318_T_Photometer_UserManual_V4-9.pdf
- CMMCh. (2011). *Plan de acción para combustibles y vehículos más limpios en Paraguay, Centro Mario Molina Chile*.
- Coronel, G., Rolon, T., Baez, Si., Ovelar, S., Cañiza, D., & Aquino, C. (2018). Editorial Revista Aranduka Vol. 9 N° 2. *Aranduka*, 9(2).
- Crinó, E., Coronel, G., & Piacentini, R. (2014). Eventos de contaminación atmosférica sobre Asunción (Paraguay) y Clorinda (Argentina) producidos por el gas NO₂ y por aerosoles emitidos durante intensas quemadas de biomasa. *ANALES AFA*, 25(2), 13–17.
- D’Almeida, G. A., Shettle, E. P., & Koepke, P. (1991). *Atmospheric aerosols : global climatology and radiative characteristics*. A. Deepak Pub. Retrieved from <https://catalogue.nla.gov.au/Record/569776>
- Díaz, C. (2016). *Estudio del Carbono Negro (Black Carbon) contenido en partículas suspendidas en ambientes urbanos. Centro de investigación en materiales avanzados, S.C.* Retrieved from https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/2244/1/CARLOS_DIAZ_TESIS_MCTA.pdf
- Dockery, D. (1994). Acute Respiratory Effects of Particulate Air Pollution. *Annual Review of Public Health*, 15(1), 107–132. <https://doi.org/10.1146/annurev.publhealth.15.1.107>
- Dubovik, O., & King, M. D. (2000). A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(D16), 20673–20696. <https://doi.org/10.1029/2000JD900282>
- Eck, T. F., Holben, B. N., Reid, J. S., O’Neill, N. T., Schafer, J. S., Dubovik, O., ... Artaxo, P. (2003). High aerosol optical depth biomass burning events: A comparison of optical properties for different source regions. *Geophysical Research Letters*, 30(20), 2–5. <https://doi.org/10.1029/2003GL017861>
- Fegueruelo, J., & Marino, M. (2004). *Química Física del Ambiente y de los Procesos Medioambientales*. Reverte. Retrieved from <https://books.google.com.py/books?id=aVq87XOWWH4C&lpg=PA197&dq=holin como fuente de HNO3&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=false>
- Fonseca, A., Gioda, A., Ziulli, R., & Duó, D. (2013). Contaminación atmosférica y deposición húmeda en la Amazonia brasileña. *Revista Cubana de Salud Pública*, 39(4), 627–639. Retrieved from <http://scielo.sld.cu>

- García Cueto, R., Santillán Soto, N., & Ojeda-Benítez, S. (2012). Balance Radiativo y sus Consecuencias en el comportamiento térmico en tiraderos municipales: Estudio de caso en la ciudad de Mexicali, B.C., México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(SUPPL 1), 107–115.
- Gibilisco, R. G. (2016). *Degradación en fase gaseosa de compuestos orgánicos oxigenados y/o pesticidas*.
- Gonzales Ríos, V., De La Vera Cruz Chávez, P., Guzman Ale, R., S. Lavallo Sullasi, H., Manuel Mayhua Choque, F., & Nelly. Chambi Laura, V. (2018). Estudio de daños y contaminación atmosférica en los monumentos históricos de la ciudad de Arequipa, Perú. *Revista Noctua*, II(3), 63–89. <https://doi.org/10.26892/noctua.v2i3p63-89>
- Gonzalez, M. (2020). *Caracterización temporal del espesor óptico de aerosoles y su relación con las infecciones respiratorias agudas, Huachac - Chupaca 2015-2017*. Retrieved from <https://repositorio.igp.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12816/4882/Gonzales-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Guilabert, P. (2017). *Caracterización de parámetros ópticos del aerosol atmosférico en un enclave de alta montaña*.
- Hess, M., Koepke, P., & Schult, I. (1998). Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5), 831–844. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<0831:OPOAAC>2.0.CO;2)
- Jacobson, M. C., & Hansson, H. (2000). Review of Atmospheric Aerosols ' Science and State of the. *Reviews of Geophysics*, (1998), 267–294. <https://doi.org/10.1029/1998RG000045>
- Kasten, F., & Young, A. T. (2000). Revised Optical Air Mass Tables. *Applied Optics*, 28(22), 4735–4738.
- Kaufman, Y. J. (1993). Aerosol optical thickness and atmospheric path radiance. *Journal of Geophysical Research*, 98(D2), 2677–2692. <https://doi.org/10.1029/92JD02427>
- Lara, S. (2018). *Análisis espacio-temporal de la distribución de aerosoles atmosféricos en la ciudad de Córdoba (Argentina) y desarrollo de un modelo predictivo de los niveles de material particulado*. Retrieved from <http://hdl.handle.net/11086/6009>
- Léon, J. F., Martiny, N., & Merlet, S. (2020). A multi linear regression model to derive dust PM10 in the Sahel using AERONET aerosol optical depth and CALIOP aerosol layer products. *Remote Sensing*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/RS12183099>
- Martínez, A. R. (2011). *Estudio de los aerosoles atmosféricos en Valencia mediante medidas del nefelómetro de integración. Universitat de València. Departamento de Termodinàmica*. Retrieved from <https://www.tdx.cat/handle/10803/77718?show=full>

- Martínez, M., Pendás, L., Mercedes, O., Pérez, A., & Cánovas, A. (2009). Revista Habanera de Ciencias Médicas. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8(2). Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180414044017>
- NAPAP, U. S. (2005). *Status and Trends of Emissions and Environmental Impacts*.
- Obregon, M. (2012). *Estudio de los aerosoles en columna sobre Caceres a partir de medidas radiométricas*. Retrieved from <https://core.ac.uk/download/pdf/72043232.pdf>
- OPS/OMS. (2016). Organización Mundial de la Salud (OMS) Calidad del aire. Retrieved December 13, 2020, from <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- Osorio, J., Mendoza, B., Zavala-Hidalgo, J., Osorio, J., Mendoza, B., Exterior, C., ... Zavala-Hidalgo, J. (2013). Relationship between solar radiation and dimethylsulfide concentrations using in situ data for the pristine region of the southern hemisphere. *Geofísica Internacional*, 52(4), 343–354. Retrieved from <http://www.esrl.noaa.gov/psd/cgi->
- Otero, L. A., Ristori, P. R., Martorella, E., Pereyra, A. F., Brusca, S., Fierro, V. E., ... Quel, E. J. (2020). CLASIFICACIÓN DE LOS AEROSOL PARA LA ESTACIÓN AERONET DE COMODORO RIVADAVIA DURANTE 2015 AEROSOL CLASSIFICATION FOR COMODORO RIVADAVIA AERONET STATION DURING 2015. *Anales AFA*, 30(4), 85–89. <https://doi.org/https://doi.org/10.31527/analesafa.2019.30.4.85>
- Otero, L., Ristori, P., Holben, B., & Quel, E. (2006). Espesor óptico de aerosoles durante el año 2002 para diez estaciones pertenecientes a la red AERONET – NASA. *Optica Pura Aplicada*, 39(4), 355–364. Retrieved from <https://anales.fisica.org.ar/journal/index.php/analesafa/article/view/213>
- Palacios Peña, L. (2014). *Estudio del efecto directo de los aerosoles atmosféricos sobre Europa*. Retrieved from www.conama2014.org
- Pérez, D., Andrade, M., Eck, T., Stein, A., O'Neill, N., Lyamani, H., ... Alados, L. (2017). Multi year aerosol characterization in the tropical Andes and in adjacent Amazonia using AERONET measurements. *Atmospheric Environment*, 166(April 2018), 412–432. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.07.037>
- Radojevic, M., & Harrison, M. (1992). *Atmospheric Acidity: Sources, Consequences and Abatement* - Google Libros. Elsevier. Retrieved from [https://books.google.com.py/books?id=aU3i3TEk8nYC&lpg=PA435&dq=Horvath%2C H. \(1992\). Effects on visibility%2C weather and climate.&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.py/books?id=aU3i3TEk8nYC&lpg=PA435&dq=Horvath%2C%20H.%20(1992).%20Effects%20on%20visibility%20weather%20and%20climate.&lr&hl=es&pg=PP1#v=onepage&q&f=false)
- Ramos, S., Bautista, R., & Valdez, A. (2010). Atmosféricos y variables meteorológicas en la zona norte de Chiapas, México. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 26(1), 65–80.
- Rivela, C. (2013). *Degradación de compuestos halogenados iniciada por radicales OH y átomos de Cl*.
- Saxena, P., & Seigneur, C. (1987). On the oxidation of SO₂ to sulfate in atmospheric

- aerosols. *Atmospheric Environment* (1967), 21(4), 807–812. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(87\)90077-1](https://doi.org/10.1016/0004-6981(87)90077-1)
- Serpa, C. M., Giraldo, J. F., & Torres, P. (2015). *Propiedades microfísicas de los aerosoles troposféricos derivadas de medidas de fotómetro solar y Lidar en el Valle de Aburrá*. Retrieved from <http://lalinet.org/uploads/Main/Publications/Dairo2015.pdf>
- Setzer, A. W., & Pereira, M. C. (1991). Amazonia biomass burnings in 1987 and an estimate of their tropospheric emissions. *Ambio*, 20(1), 19–22. <https://doi.org/10.2307/4313765>
- Toledano, C. (2005). *Climatología de los aerosoles mediante la caracterización de propiedades ópticas y masas de aire en la estación “El Arenosillo” de la red AERONET*. Universidad de Valladolid.
- Toledano Olmeda, C. (2008). *Los aerosoles atmosféricos y su influencia en la Península Ibérica. Manuales Formativos de ACTA*. Retrieved from https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/048009.pdf
- Tuazon, E. C., Atkinson, R., Plum, C. N., Winer, A. M., & Pitts, J. N. (1983). The reaction of gas phase N_2O_5 with water vapor. *Geophysical Research Letters*, 10(10), 953–956. <https://doi.org/10.1029/GL010i010p00953>
- Vargas, F., Ruiz, M., Marín, I., & Moreno, S. (2020). *Transmisión del SARS-CoV-2 por gotas respiratorias, objetos contaminados y aerosoles (vía aérea)*.
- Warneck, P. (1988). *Chemistry of the Natural Atmosphere* (Segunda). Academic Press. Retrieved from [https://books.google.com.py/books?id=bG1qyjZ_HmUC&lpg=PA622&dq=Gillani y Wilson%2C 1983&pg=PP1#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.py/books?id=bG1qyjZ_HmUC&lpg=PA622&dq=Gillani+and+Wilson%2C+1983&pg=PP1#v=onepage&q&f=false)
- Weatherspark. (2020). Clima promedio en Asunción, Paraguay, Weather Spark. Retrieved July 19, 2020, from <https://es.weatherspark.com/>
- Wichmann, H.-E., & Peters, A. (2000). Epidemiological Evidence of the Effects of Ultrafine Particle Exposure. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 358(1775), 2751–2769. <https://doi.org/10.2307/2666953>