



*La investigación, su esencia y arte.*

# FONDO EDITORIAL



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE TAYACAJA  
DANIEL HERNÁNDEZ MORILLO

## AEROSOLLES ATMOSFÉRICOS EN EL CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

<https://fondoeditorial.unat.edu.pe>

Roberto Angeles Vasquez  
Julio Angeles Suazo  
Carmencita Lavado Meza  
Gloria Maria Lopez Yupanqui  
Luis Suarez Salas  
Hugo Abi Karam

# Aerosoles atmosféricos



*La investigación, su esencia y arte.*

Roberto Angeles Vasquez

Julio Angeles Suazo

Carmencita Lavado Meza

Gloria Maria Lopez Yupanqui

Luis Suarez Salas

Hugo Abi Karam

**Pampas – Perú**

**2024**

# AEROSOLES ATMOSFÉRICOS EN EL CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

© **Roberto Angeles Vasquez**

<https://orcid.org/0000-0002-7248-912X>

**Julio Angeles Suazo**

<https://orcid.org/0000-0001-8327-9032>

**Carmencita Lavado Meza**

<https://orcid.org/0000-0003-1620-7180>

**Gloria Maria Lopez Yupanqui**

<https://orcid.org/0000-0002-4945-7189>

**Luis Suarez Salas**

<https://orcid.org/0000-0003-1857-8399>

**Hugo Abi Karam**

<https://orcid.org/0000-0002-0154-5569>

© Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo (UNAT) - Fondo Editorial.

Dirección: Bolognesi N° 416, Tayacaja, Huancavelica -Perú

[info@unat.edu.pe](mailto:info@unat.edu.pe)

Telf: (+51) 67 -990847026

Web: <https://unat.edu.pe/>

Primera edición digital: Junio 2024

Libro digital disponible en <https://fondoeditorial.unat.edu.pe>

Hecho el Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú

N° 202405430

ISBN: 978-612-5123-23-7

No está permitida la reproducción total o parcial de este libro, su tratamiento información, la transmisión de ninguna otra forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, por fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de los titulares del copyright.

## PRÓLOGO

En la etapa de docencia que realice desde el año 2014, he presenciado ausencia de bibliografía peruana adecuada para los cursos relacionados a la contaminación del aire. Así mismo, he observado en aula la deficiencia en los estudiantes de pregrado en la manipulación de modelos atmosféricos, procesamiento de datos satelitales y comprensión en la temática de contaminación de aire, con especial interés en aerosoles atmosféricos

También he observado la falta de motivación al investigar temas relacionados a los aerosoles atmosféricos. Por ello, me he motivado en escribir el presente libro con gran apoyo de los demás autores, para inculcar y motivar a los lectores a realizar investigaciones que contribuyan a plantear soluciones para mitigar impactos ambientales ocasionados por los aerosoles atmosféricos.

Por ello el presente libro de investigación constituye una versión que plantea investigaciones y conceptos básicos relacionados a la temática o área de aerosoles atmosféricos, enfocados a la contaminación del aire y a la vez al cambio climático, así mismo aborda las amenazas e impactos ambientales. Así mismo, en el presente libro se plasma conocimientos de ciencia e ingeniería, y estará disponible para profesionales, maestros y estudiantes. Con esto es posible situar de forma apropiada al público laico en asuntos de contaminación del aire por aerosoles atmosféricos. Por consecuencia, estoy agradecido y en deuda con mis colegas científicos por sus ideas sobre cómo incorporar las nuevas tendencias de investigaciones atmosféricas.

*La investigación, su esencia y arte.*

## AGRADECIMIENTOS

Me siento honrado de haber tenido esta oportunidad y privilegio de trabajar en esta importante publicación. Mucha gente que ayudó tremendamente durante el proceso merece un reconocimiento especial. En primer lugar, agradezco a los co-autores del presente libro. Su experiencia, conocimientos, dedicación, trabajo duro y la profesionalidad que garantiza la calidad de este libro.



*La investigación, su esencia y arte.*

## ÍNDICE DE CONTENIDO

PROLOGO.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	6
INDICE DE FIGURAS .....	8
ÍNDICE DE TABLAS .....	10
CAPITULO 1 .....	12
APUNTES SOBRE AEROSOLAS ATMÓSFERICOS .....	12
Aerosoles atmosféricos .....	12
Fuentes y tipos de aerosoles .....	15
Mezcla de aerosoles y su impacto en las Propiedades ópticas del aerosol.....	16
Espesor óptico de aerosol (EOA).....	17
Coeficiente de angstrom.....	17
Propiedades microfísicas de las propiedades de aerosol .....	19
Parámetro de tamaño.....	19
Índice de refracción complejo.....	19
Distribución lognormal volumétrica de tamaño de las partículas.....	20
Radio efectivo .....	21
Propiedades ópticas de las partículas de aerosol.....	21
Parámetro de asimetría.....	22
Albedo Scattering single.....	22
Ley de Beer-Lambert-Bouguer .....	22
Forzamiento radiativo directo por aerosoles.....	23
Investigaciones realizadas a nivel nacional.....	24
CAPITULO 2.....	32
EFFECTO DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOL EN EL FORZAMIENTO RADIATIVO EN LA ESTACION ANTÁRTICA PERUANA MACHU PICCHU .....	32
Materiales y métodos.....	32
Lugar de estudio.....	32
Fotómetro solar.....	32
Metodología para la obtención del espesor óptico de aerosol.....	33
Coeficiente de Angstrom para la obtención del tipo de aerosol.....	34
SBDART- SANTA BARBARA Disort Radiative Transfer .....	34
Cálculo de intensidades iniciales .....	35

Espesor Óptico de Aerosol, Rayleigh y Ozono .....	36
Espesor Óptico de Aerosol.....	37
Tipo de aerosol.....	39
Influencia del espesor óptico de aerosol en la cantidad de radiación solar mediante el SBDART .....	40
Forzamiento radiativo directo .....	42
Comparación del EOA (500nm) con otras Estaciones Antárticas.....	43
CAPÍTULO 3.....	44
PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AEROSOL ES ATMOSFÉRICOS EN HUANCAYO	44
Materiales y Métodos.....	44
AERONET .....	44
Resultados .....	45
Espesor óptico de aerosol.....	45
Coeficiente de Angstrom.....	46
Forzamiento radiativo directo y eficiencia de forzamiento instantánea del aerosol ..	47
Influencia del espesor óptico de aerosol sobre la tasa de calentamiento .....	48
Agradecimientos .....	49
CAPÍTULO 4.....	50
MATERIAL PARTICULADO Y MODELO HYSPLIT .....	50
Materiales y métodos.....	50
Lugar de estudio.....	50
Purple Air PA-II .....	52
Modelo Hysplit.....	53
Sistema de previsión global (GFS) .....	54
Trayectorias de los vientos.....	54
CAPÍTULO 5.....	56
CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO EN HUANCAYO .....	56
Materiales y métodos.....	56
Purple Air PA-II .....	56
Espectómetro Grimm 1.109.....	56
Referencias .....	60

## INDICE DE FIGURAS

Fig 1.1 Efecto Directo e indirecto de aerosoles atmosféricos.....	12
Fuente:.....	12
Fig. 1.2: Ilustración esquemática de interacciones aerosol-nube: (a) albedo de nube y efecto de su tiempo de vida, (b) efecto semidirecto, y (c) efecto de glaciación, basado en la Figura 7.20 de Denman et al. (2007) (Ramachandran, 2018). ....	13
Fig 1.3: Esquema de la distribución del tamaño del aerosol en función del tamaño de la partícula en radio que muestra tres modos de distribución, producción y mecanismos de eliminación, Fuente: (Ramachandran, 2018; Whitby, 1978) .....	14
Fig. 1.4 Forzamiento radiativo media global y anual, con respectivas incertezas entre 1750 y 2019) para gases de efecto invernadero (CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O), aerosoles y otros agentes. ....	15
Fig. 1.5 Esquema de escenarios de mezcla de aerosoles en la atmósfera, es decir, externa e interna. La mezcla interna se puede dividir además en mezcla coreshell y mezcla homogénea. Se dan ejemplos de mezcla de aerosol correspondientes a cada estado de mezcla. En la mezcla externa no hay física y/o tienen lugar interacciones químicas entre diferentes especies de aerosoles. En la mezcla núcleo-carcasa, un aerosol (carbono negro) puede recubrir otro aerosol (polvo mineral) y viceversa. Cuando todas las diferentes especies de aerosoles se mezclan juntos y producen una entidad de aerosol con la misma composición química, entonces se dice que el aerosol está internamente mezclado homogéneamente (Ramachandran, 2018).....	17
Fig. 1.6. Patrones angulares esquemáticos de intensidades de radiación dispersa para (a) molécula de aire y partículas de aerosol de radio (b) 0,1 $\mu\text{m}$ y (c) 1,0 $\mu\text{m}$ , respectivamente, en $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ . (Ramachandran, 2018).....	20
Fig. 1.7. Principio de las mediciones del fotómetro solar utilizado para derivar espesores ópticos de aerosoles (Ramachandran, 2018). ....	23
Fig. 1.3. Distribucion espacial de publicaciones a nivel nacional al 2020.....	24
Fig. 2.1 imagen del satélite AQUA. En un área delimitada para el estudio a coordenadas de latitud $-60.645^{\circ}$ a $-70.488^{\circ}$ y longitud de $-54.043^{\circ}$ a $-67.051^{\circ}$ .....	32
Fig. 2.2 fotómetro solar SP02.....	33
Fig. 2.3 Ventana del programa SBDART.....	35
Fig. 2.4 intensidad inicial mediante langley-plot.....	36
Fig. 2.5 Residuales para el cálculo de la intensidad inicial.....	36
Fig. 2.6 Variación diaria del EOA a 500nm.....	38
Fig.2.7 Variación de EOA para 412, 500, 675 y 862nm .....	38
Fig. 2.8 Variación del coeficiente de turbiedad respecto a la longitud de onda.....	39
Fig. 2.9 variación del coeficiente de turbiedad y EOA.....	39
Fig. 2.10 Tipo de Aerosol presente en la Estación Antártica Peruana Machu Picchu ....	40
Fig. 2.11 Variación de la radiación Ultravioleta a 305nm respecto a los EOA (500nm) .	41



Fig. 2.12 Variación de la radiación Ultravioleta a 320nm respecto a los EOA (500nm) .	41
Fig. 2.13 Variación de la radiación Ultravioleta a 340nm respecto a los EOA (500nm) .	41
Fig. 2.14 Variación de la radiación Ultravioleta a 380nm respecto a los EOA (500nm)...	41
Fig. 2.15 Variación del índice UV respecto a los EOA (500nm) .....	42
Fig. 2.16 Variación del Forzamiento radiativo en los días medidos .....	42
Fig. 2.17 variación del AOD a 500nm en las estaciones Antárticas .....	43
Fig. 3.1 a. Aeronet data, b. fotómetro solar CIMEL. Fuente: <a href="https://aeronet.gsfc.nasa.gov/">https://aeronet.gsfc.nasa.gov/</a> .....	45
Fig. 3.2 Serie temporal del espesor óptico de aerosol en 440 nm obtenida por el AERONET. La línea se refiere a las medias diarias.....	46
Fig. 3.3 Serie temporal del espesor óptico de aerosol en 500 nm obtenida por el AERONET. La línea se refiere a las medias diarias.....	46
Fig. 3.4 Coeficiente de Angstrom entre las longitudes de onda 870-440 nm versus el espesor óptico de aerosol en 500 nm .....	47
Fig. 3.5 Relación entre el forzamiento radiativo directo instantáneo del aerosol en la parte superior de la atmosfera y el espesor óptico de aerosol a 500 nm. La parte de abajo, el mismo forzamiento radiativo de aerosol versus el radio efectivo del mismo..	48
Fig. 3.6 Tasa de calor en la provincia de Huancayo para estación seca y húmeda. ....	49
Fig. 4.1 Ubicación de las estaciones de monitoreo.....	51
Fig. 4.2 Sensor purpleair.....	53
Fig. 4.3 Composiciones de las líneas de corriente del viento (m s-1) y de las velocidades verticales medias (Pa s-1) para el evento del 17 de enero de 2018 a las 18 UTC (13 LT) para los niveles altos: (A) 300 hPa, niveles medios: (B) 450 hPa (Flores Rojas, 2021). Trayectorias calculadas para 2019. Febrero (C) y junio (D).....	54
Fig. 4.4. Variación espacial del material particulado a 1 um en la A. estación seca, B. húmeda; para PM2.5 en la C. estación seca, D. húmeda y para PM10 en la E. estación seca y F. húmeda. ....	55
Fig. 5.1 A. Distribucion de cantidad de particulas, B. $dN/d\log(r)$ , C. $dA/d\log(r)$ , D. $dV/d\log(r)$ .....	58
Fig. 5.2 Calidad de aire durante febrero y marzo de 2024.....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de los aerosoles según EOA a 440nm y coeficiente de angstrom .....	18
Tabla 2.1 evaluación de EOA, espesor óptico de Rayleigh y espesor óptico del ozono.	37
Tabla 4.1. Mediciones de material particulado .....	52
Tabla 5.1 .....	57
Rango del índice de calidad del aire (AQI) y clasificación del aire según los valores indexados.....	57



*La investigación, su esencia y arte.*



*La investigación, su esencia y arte.*

## CAPITULO 1

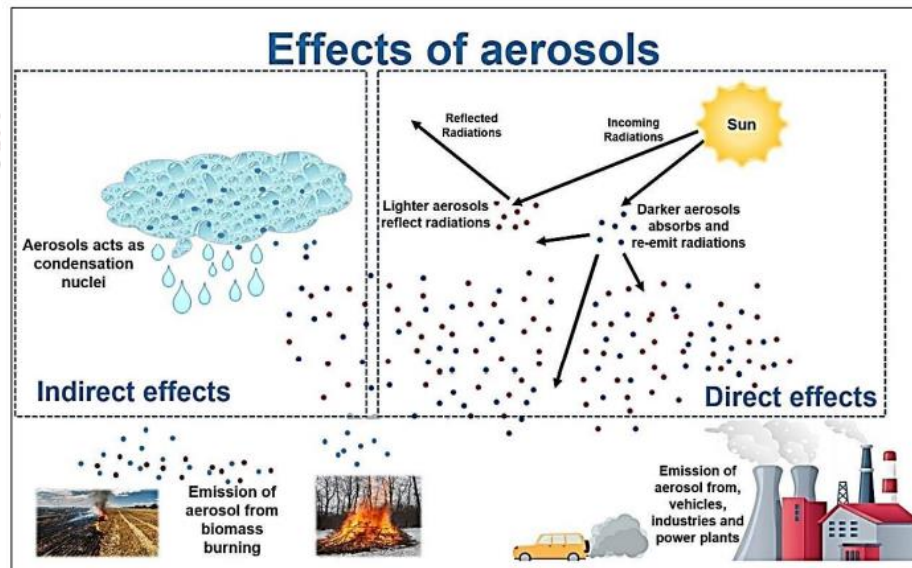
### APUNTES SOBRE AEROSOLAS ATMÓSFERICOS

#### Aerosoles atmosféricos

Las partículas de aerosoles atmosféricos son esenciales en el sistema climático global, ya que afectan directamente el balance de radiación de la Tierra por dispersión o absorción de la radiación solar. Los aerosoles también sirven como núcleos de condensación de nubes y modifican la microfísica y formación de nubes; impactando así indirectamente en el clima (Fig. 1.1 y 1.2) ([Masson-Delmotte et al., 2021; Boiyo et al., 2019; Regmi et al., 2020; Russell et al., 2010) y cambiando las propiedades de las nubes y la vida útil (Yang et al., 2021; Zhao et al., 2018).

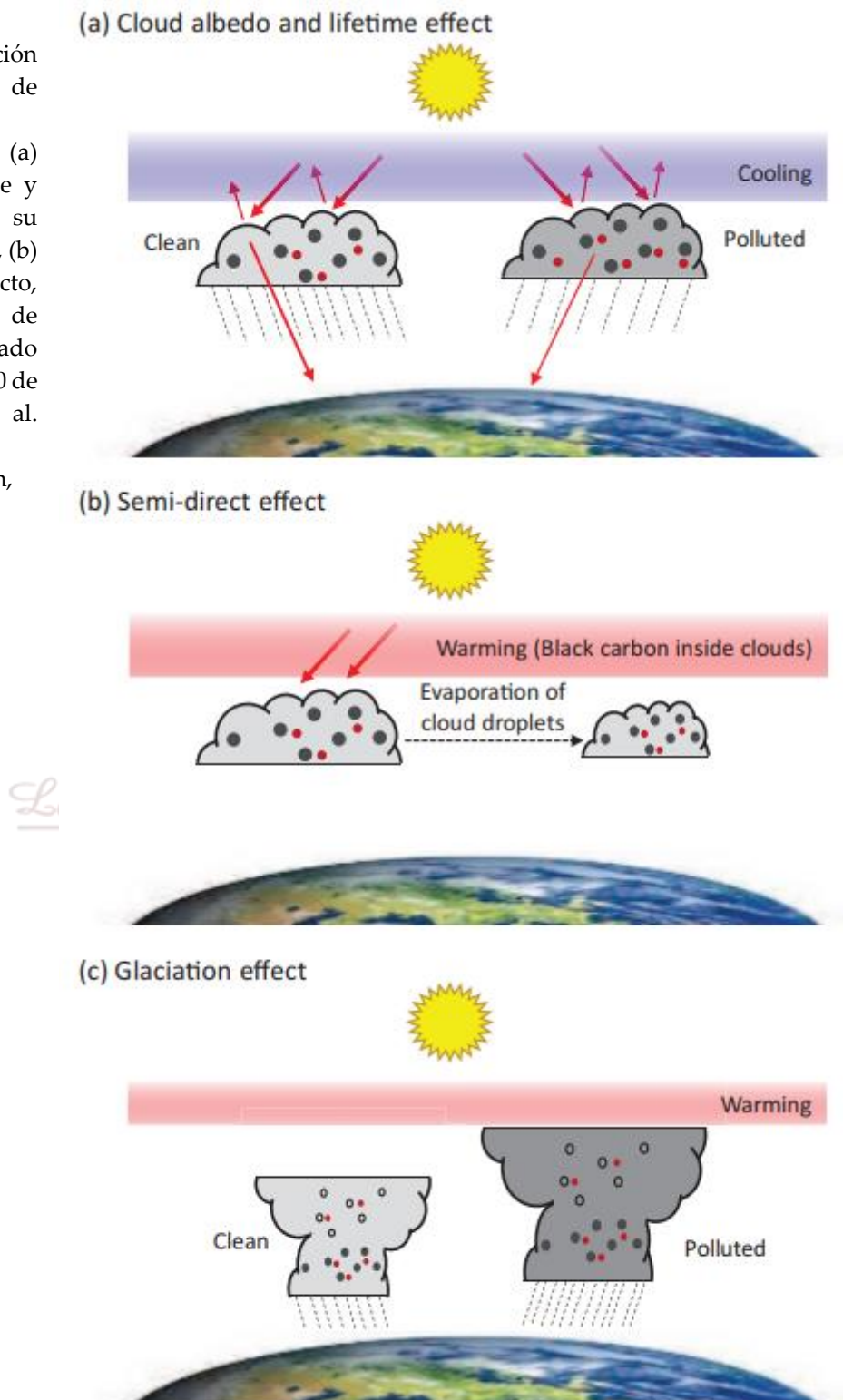
Fig 1.1 Efecto Directo e indirecto de aerosoles atmosféricos.

Fuente:



Los aerosoles atmosféricos son heterogéneos y difíciles de caracterizar en el tiempo y espacio debido a su corta vida, fuentes geográficamente diversas, y mecanismos de producción (Giles et al., 2012; Shin et al., 2019).

Fig. 1.2: Ilustración esquemática de interacciones aerosol-nube: (a) albedo de nube y efecto de su tiempo de vida, (b) efecto semidirecto, y (c) efecto de glaciación, basado en la Figura 7.20 de Denman et al. (2007) (Ramachandran, 2018).



El aerosol es un sistema de dispersión coloidal formado por pequeñas partículas sólidas y líquidas dispersas y suspendidas en la atmósfera (Y. Wang et al., 2007). Su tamaño es generalmente de 0,001 a 100  $\mu\text{m}$  (H. Bin Wang et al., 2015; Wu et al., 2021). La distribución de los aerosoles atmosféricos es caracterizada en tres diferentes modas o tamaños (Fig. 1.3):

- Moda de nucleación, o núcleo de Aitken: tiene origen en la condensación de vapores supersaturados, que lleva a la coagulación de las partículas
- Moda de acumulación: las partículas con más tiempo en la atmósfera (de días a semanas) interactúan con las partículas de moda de nucleación.
- Moda gruesa: partículas originadas por procesos mecánicos, como la resuspensión de polvo del suelo, spray marino y otros.

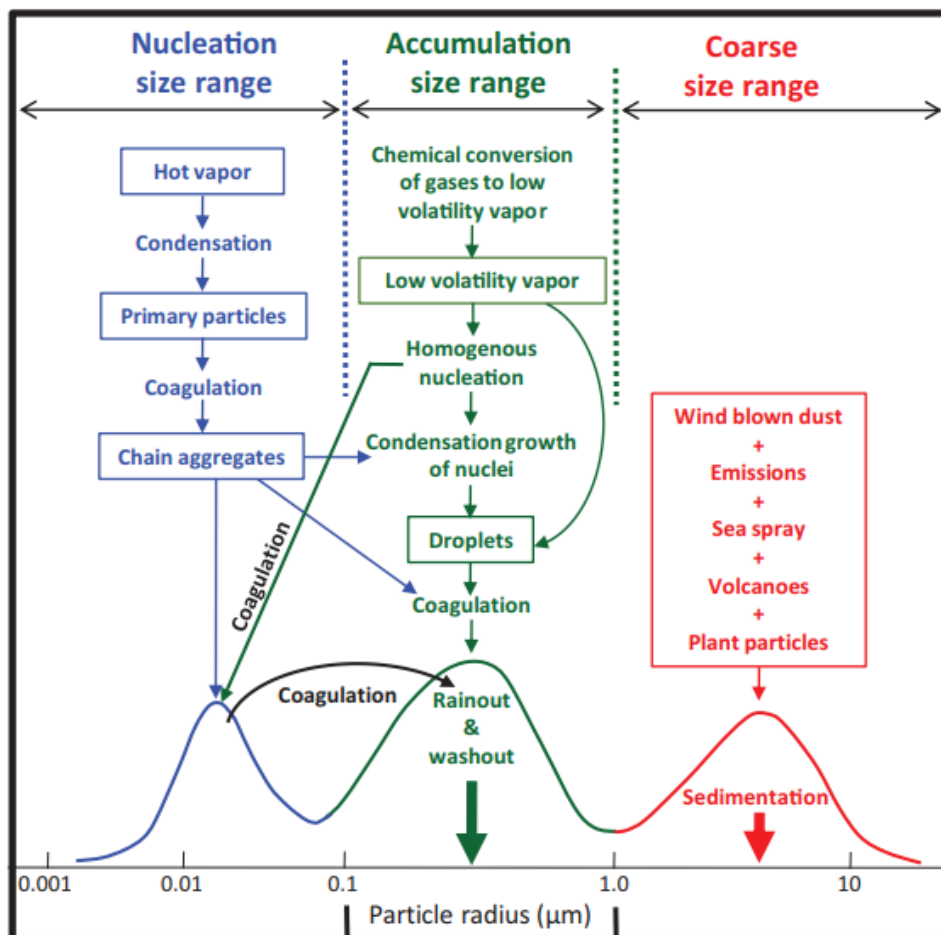


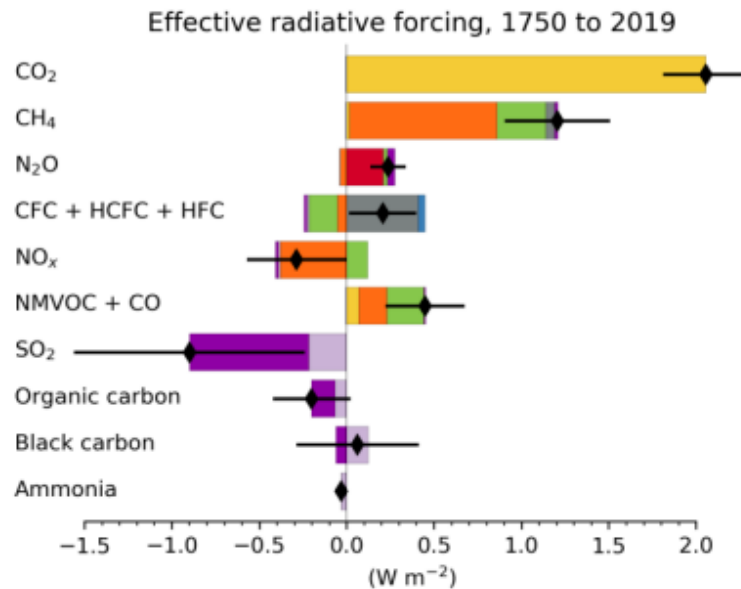
Fig 1.3: Esquema de la distribución del tamaño del aerosol en función del tamaño de la partícula en radio que muestra tres modos de distribución, producción y mecanismos de eliminación, Fuente: (Ramachandran, 2018; Whitby, 1978)

Asimismo, las partículas de polvo ambiental han sido identificadas como una de las más abundantes tipos de aerosoles que dominan las PM<sub>10</sub> en muchos lugares

del mundo, se han asociado con efectos adversos para la salud, como problemas respiratorios y enfermedades cardiovasculares al depositarse en el sistema respiratorio (Hochgatterer et al., 2013; Middleton et al., 2008; Tohidi et al., 2020)

Fig. 1.4 Forzamiento radiativo media global y anual, con respectivas incertezas entre 1750 y 2019 para gases de efecto invernadero (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O), aerosoles y otros agentes.

Fuente: ([Masson-Delmotte et al., 2021)



En general, se cree que los aerosoles emplean un sistema de enfriamiento en el clima, por ejemplo, el sulfato, el nitrato produce un efecto de enfriamiento en el globo al dispersarse y reflejando las radiaciones solares entrantes (Fig. 1.4) (Charlson et al., 1992). En contrario, aerosoles como el carbón elemental o equivalente al carbón negro que son efectivos absorbente de radiación solar actúa como el impulsor más importante de la radiación global inducida por el calentamiento (Bollasina et al., 2011; Bond et al., 2013).

## Fuentes y tipos de aerosoles

Las fuentes de aerosoles se pueden clasificar en primarias y secundarias. Las fuentes primarias o directas que son en su mayoría de origen natural incluyen el mundo de océanos (que cubren dos tercios de la superficie de la Tierra, partículas de sal marina), regiones áridas y semiáridas (polvo del suelo arrastrado por el viento), biota terrestre (material biológico de origen vegetal), humo de la quema de biota terrestre y emisiones de partículas antropogénico directo, por ejemplo, hollín, humo, polvo de la carretera, etc., eyección terrestre (efluvios volcánicos, que incluye las emisiones directas de partículas y los productos derivados posteriormente de reacciones de los gases emitidos), y meteoritos (polvo extraterrestre e interplanetario). La fuente secundaria o indirecta, que es la principal fuente de partículas por debajo de 1  $\mu\text{m}$  de radio, es la conversión de los gases traza atmosféricos naturales y artificiales disponibles en partículas sólidas y líquidas. Este proceso llamado mecanismo de conversión de gas a partículas depende de una serie de precursores que incluyen gases que contienen

azufre y nitrógeno entre otros. Las principales especies de aerosoles presentes en la atmósfera incluyen sal marina, polvo mineral, sulfato, nitrato y aerosoles carbónicos (carbono negro y carbón orgánico) (Ramachandran, 2018).

### **Mezcla de aerosoles y su impacto en las Propiedades ópticas del aerosol**

Los diferentes tipos de aerosoles producidos a partir de fuentes locales y transportados desde largas distancias pueden existir en la atmósfera en diferentes estados de mezcla, es decir, como mezclada externamente (sin interacción física o química entre diferentes especies de aerosoles), mezcla de núcleo y cubierta (una especie recubre a la otra), y mezcladas internamente (todas estas especies pueden mezclarse homogéneamente dando como resultado una entidad de aerosol) (Figura 2.27). Las características físicas y ópticas de aerosoles tales como la distribución del tamaño, el índice de refracción, el albedo de dispersión simple, y el parámetro de asimetría depende del estado de mezcla de los aerosoles (Ramachandran, 2018).

Sobre continentes y océanos, pueden existir sulfato, carbón negro y sal marina, independientemente como una mezcla externa. Los aerosoles de carbón negro pueden cubrir las partículas de polvo (núcleo-corteza) y viceversa. Se puede producir aerosol mezclado internamente por la combustión de combustibles fósiles y biomasa. Los aerosoles en cierto estado de mezcla no necesitan permanecer en el mismo estado de mezcla después del transporte a larga distancia y puede sufrir transformación a otros estados de mezcla. La presencia de una mezcla interna homogénea en la atmósfera parece poco física (Jacobson, 2000).

La humedad relativa también juega un papel en la determinación de la naturaleza de la mezcla de aerosol. Por ejemplo, cuando la partícula alcanza la deliquesencia HR, el agua en los aerosoles solubles se separa del componente insoluble. Así, mezclando los aerosoles puede cambiar la distribución de tamaño de los aerosoles, su dispersión y características de absorción debido a cambios en el índice de refracción y sus tiempos de residencia. Se aplica una regla de mezcla para calcular el índice de refracción compuesta (que es la raíz cuadrada de la constante dieléctrica) para un núcleo/carcasa o mezcla interna de componentes de aerosol. Las dos reglas de mezcla ampliamente utilizadas son Maxwell-Garnett y Bruggeman (Chýlek et al., 2000).



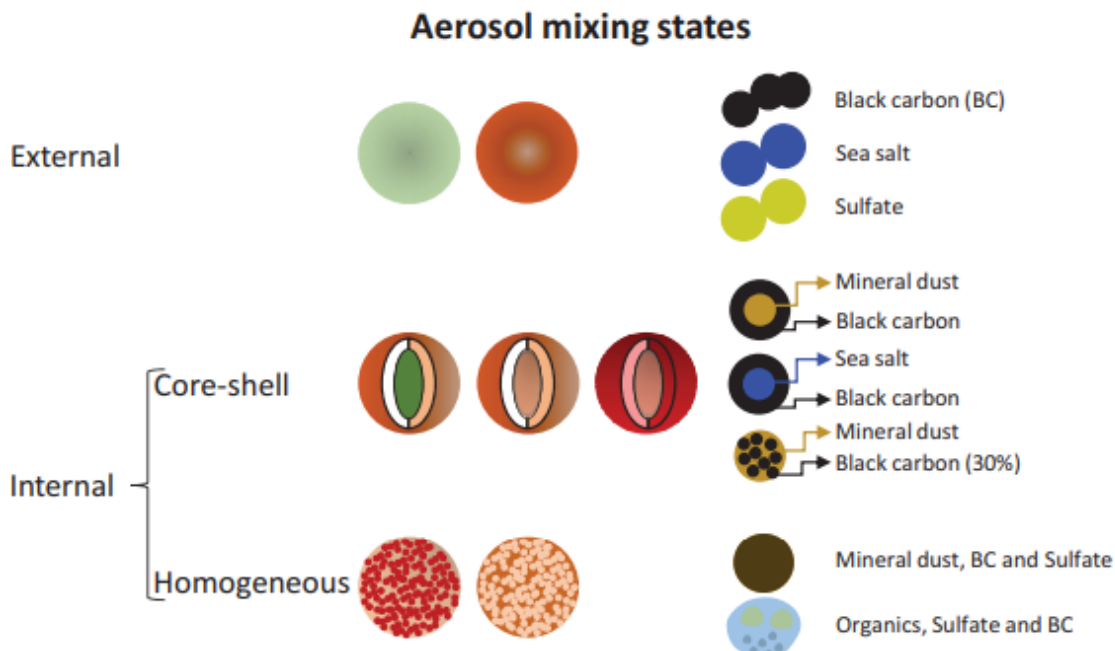


Fig. 1.5 Esquema de escenarios de mezcla de aerosoles en la atmósfera, es decir, externa e interna. La mezcla interna se puede dividir además en mezcla coreshell y mezcla homogénea. Se dan ejemplos de mezcla de aerosol correspondientes a cada estado de mezcla. En la mezcla externa no hay física y/o tienen lugar interacciones químicas entre diferentes especies de aerosoles. En la mezcla núcleo-carcasa, un aerosol (carbono negro) puede recubrir otro aerosol (polvo mineral) y viceversa. Cuando todas las diferentes especies de aerosoles se mezclan juntos y producen una entidad de aerosol con la misma composición química, entonces se dice que el aerosol está internamente mezclado homogéneamente (Ramachandran, 2018).

### Espesor óptico de aerosol (EOA)

Representa la carga de aerosoles en la columna atmosférica (Kiran Kumar et al., 2013; Mukherjee & Vinoj, 2020). La dependencia espectral de EOA varía con varios tipos de aerosoles debido a sus diferentes propiedades físicas y químicas sobre la base de la fuente de generación y evolución del aerosol. La dependencia espectral se observó en muchos estudios y se encontraron valores más altos en longitudes de onda corta que longitudes de onda más largas (Kiran Kumar et al., 2013; Srivastava et al., 2012).

### Coefficiente de angstrom

El exponente de Angstrom ( $\alpha$ ) es una función de la distribución del tamaño del aerosol (Deep et al., 2021; Gadhavi & Jayaraman, 2010).

Los valores más altos del exponente de angstrom significan la contribución de las partículas de modo fino dominante, mientras que los valores más bajos del exponente de angstrom indican el dominio de moda gruesa de partículas (Alam et al., 2011)

Para poder estudiar el tipo de aerosol, es necesario calcular el exponente ángstrom, este es determinado según la definición de Ångström (Ångström, 1929), por la siguiente relación:

$$\alpha = - \frac{\log \left( \frac{\tau_{412}}{\tau_{675}} \right)}{\log \left( \frac{412}{675} \right)} \quad (1.1)$$

También es posible determinarlo, realizando un ploteo potencial entre el espesor óptico de aerosol versus la longitud de onda para cada instante. La regresión potencial está dada por la ecuación del EOA en función de los parámetros de turbidez atmosférica o coeficiente de turbiedad  $\beta$  y  $\alpha$ , donde  $\alpha$ , es el exponente Ångström.

$$EOA = \beta \lambda^{-\alpha} \quad (1.2)$$

### Determinación de los Tipos de aerosoles

Existen diversas clasificaciones de tipos de aerosoles, en este caso en particular tomaremos los determinados en función del espesor óptico de aerosol y el exponente ángstrom, mencionándose entre los más importantes son los siguientes: *La investigación, su esencia y arte.*

Tabla 1.1 Clasificación de los aerosoles según EOA a 440nm y coeficiente de angstrom

Tipo de Aerosol	EOA a 440nm	$\alpha$
Continental Limpio	0.05 – 0.15	0.8 – 1.5
Continental Promedio	0.1 – 0.3	1.3 – 2
Continental Contaminado	0.08 – 0.2	1.3 – 2.5
Urbanos/Industriales	> 0.2	1.5 - 3
Desértico	> 0.2	< 0.5
Marítimo	< 0.15	< 0.3
Quema de biomasa	> 0.3	1.5-2.6
Antártico	< 0.1	< 0.8

Fuente. (Che et al., 2018; O. Dubovik et al., 2000, 2002; Eck et al., 1999; Holben et al., 2001; L. Otero et al., 2006).

## Propiedades microfísicas de las propiedades de aerosol

Las propiedades microfísicas de las partículas de aerosol son: el tamaño de la partícula, generalmente expresado en forma adimensional ( $x$ ) (ecuación 1.3); y el índice de refracción complejo ( $m$ ) relativo entre la partícula y su medio (aire  $n_0 \sim 1$ ) (Seinfeld & Pandis, 2006)

### Parámetro de tamaño

$$x = \frac{2\pi}{r} [\text{adimensional}] \quad (1.3)$$

Donde  $r$  es el radio de la partícula

### Índice de refracción complejo

$$m(\lambda) = n(\lambda) + k(\lambda)i [\text{adimensional}] \quad (1.4)$$

La teoría de Mie puede servir como procedimiento para el cálculo de la dispersión y absorción para cualquier tamaño de la partícula en función de la longitud de onda. Existen, entretanto, aproximaciones validas en determinados límites, como: la teoría de dispersión de Rayleigh; la dispersión puede ser explicado por la óptica geométrica de reflexión, refracción y difracción para partículas mucho mayores que la longitud de onda, y para el tamaño de las partículas en orden de la longitud de onda, y dispersión de Mie y otros más apropiado. Un claro ejemplo es lo que se muestra en la fig. 1.6 (Remer & Kaufman, 1998);

$x \ll 1$  *dispersion Rayleigh*

$x \sim 1$  *dispersion Mie*

$x \gg 1$  *dispersion geometrico*

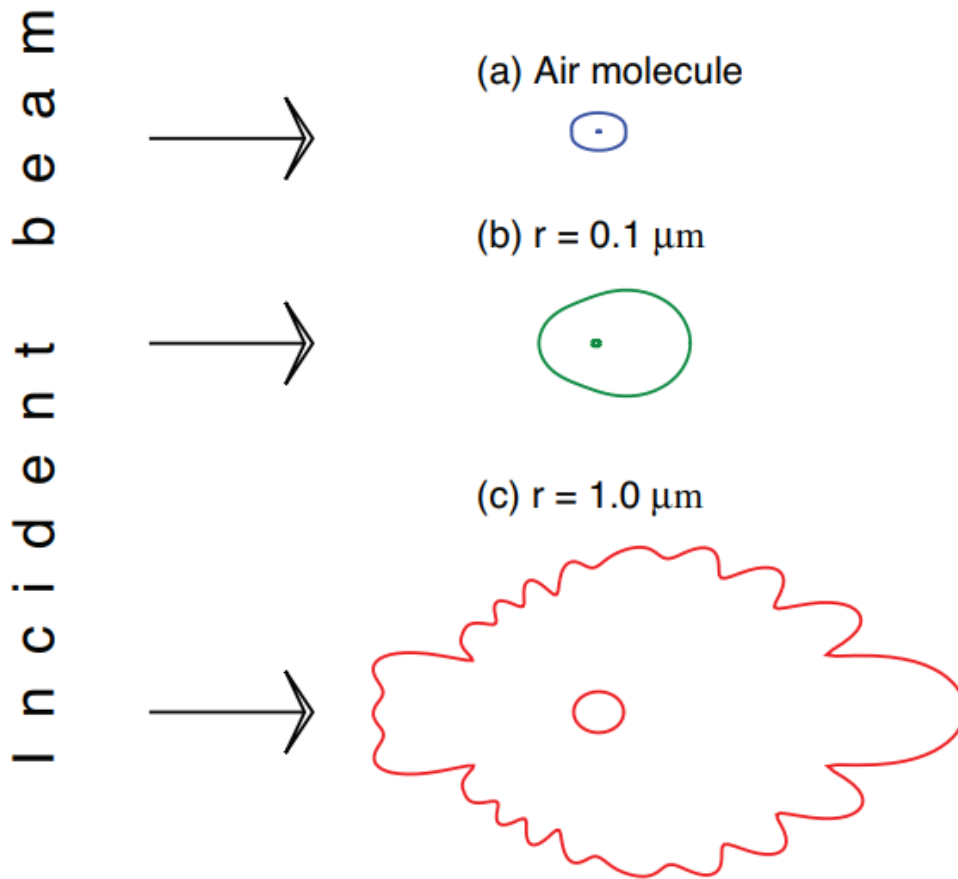


Fig. 1.6. Patrones angulares esquemáticos de intensidades de radiación dispersa para (a) molécula de aire y partículas de aerosol de radio (b)  $0,1 \mu\text{m}$  y (c)  $1,0 \mu\text{m}$ , respectivamente, en  $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$ . (Ramachandran, 2018)

### Distribución lognormal volumétrica de tamaño de las partículas

$$\frac{dV}{d \ln r} = \sum_{i=1}^2 \frac{C_{v,i}}{\sigma_i \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{\left(\ln\left(\frac{r}{r_{v,i}}\right)\right)^2}{2\sigma_i^2}\right) [\mu\text{m}^3 \mu\text{m}^{-2}] \quad (1.5)$$

Donde el índice  $i$  representa cada una de las modas de la distribución (fina o acumulación gruesa) y los parámetros que describe la distribución son:  $C_v$  es la concentración volumétrica,  $r_v$  es el radio medio,  $\sigma_i$  es la desviación lognormal por volumen.

Las relaciones entre las distribuciones volumétricas de la superficie, con la distribución del número de partículas son dadas por las ecuaciones:

$$\frac{dV}{d\ln r} = \frac{4}{3\pi r^3} \frac{dN}{d\ln r} = 4\pi r^2 \frac{dN}{d\ln r} \quad (1.6)$$

Conociéndose la distribución del tamaño, se puede definir otro parámetro único que describe la distribución de partículas que es independiente de modelos y ajustes matemáticos, el radio efectivo (Liou, 2002):

### Radio efectivo

$$r_{\text{ef}} = \frac{\int_{r_1}^{r_2} r \pi r^2 N(r) dr}{\int_{r_1}^{r_2} \pi r^2 N(r) dr} [\mu\text{m}] \quad (1.7)$$

### Propiedades ópticas de las partículas de aerosol

El parámetro función de fase describe la intensidad de la dispersión de radiación en un ángulo dado con relación al eje incidente ( $\theta$ : ángulo de dispersión), normalizada por la integral de dispersión en todas las direcciones, ósea representa la probabilidad de dispersión en cada dirección en relación al incidente (Liou, 2002)

### Función de fase

$$P(\theta, x, m, \lambda) = \frac{F(\theta, x, m, \lambda)}{\int_0^\pi F(\theta, x, m, \lambda) \sin\theta d\theta} [\text{adimensional}] \quad (1.8)$$

La integral de función de fase en una esfera centrada una partícula es  $4\pi$ :

$$\int_0^{2\pi} \int_0^\pi P(\theta, x, m, \lambda) \sin\theta d\theta d\varphi = 4\pi \quad (1.9)$$

Donde  $\varphi$  es ángulo azimutal,  $\theta$  es el ángulo de dispersión, formado entre la dirección de eje emergente con relación al incidente, y definido en función de ángulos cenitales ( $\theta$  y  $\theta_0$ ) respectivamente del eje emergente e incidente de azimutales ( $\varphi$  y  $\varphi_0$ ) respectivamente del eje emergente e incidente dado por:

### Parámetro de asimetría

$$g(x, m) = \frac{\int_0^\pi \cos\theta F(\theta) \sin\theta d\theta}{2 \int_0^\pi F(\theta) \sin\theta d\theta} = \frac{1}{2} \int_0^\pi \cos\theta P(\theta) \sin\theta d\theta [\text{adimensional}] \quad (1.10)$$

$g=1$  dispersión totalmente frontal

$g=0$  dispersión simétrico (dispersión Rayleigh)

$g=-1$  dispersión totalmente trasera

### Albedo Scattering single

$$w_o(\lambda) = \frac{\beta_{\text{esp}}(\lambda)}{\beta_{\text{esp}}(\lambda) + \beta_{\text{abs}}(\lambda)} = \frac{\beta_{\text{esp}}(\lambda)}{\beta_{\text{ext}}(\lambda)} [\text{adimensional}] \quad (1.11)$$

Fuente: (Liou, 2002)

### Ley de Beer-Lambert-Bouguer

$$I_1(\lambda) = I_0(\lambda) * \frac{1}{R^2} \exp(-m(\theta_0) * \tau(\lambda)) [\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}] \quad (1.12)$$

Considerando que la radiancia de la parte superior de la atmósfera  $I_0(\lambda)$  varía a lo largo del año y es dividido entre la distancia de tierra y sol, un factor de  $R^{-2}$ ;  $I_1(\lambda)$  es la radiancia que llega a la superficie terrestre. Asimismo, se considera que en torno a  $\theta_0$  es válido solamente para  $\theta_0 < 80^\circ$  en que la atmósfera puede ser considerada plano-paralela. Para ángulos mayores que  $80^\circ$ , debemos considerar correcciones debido a la refracción de la atmósfera y a la curvatura de la tierra (Yamasoe et al., 1998, 2006) (Fig. 1.7)

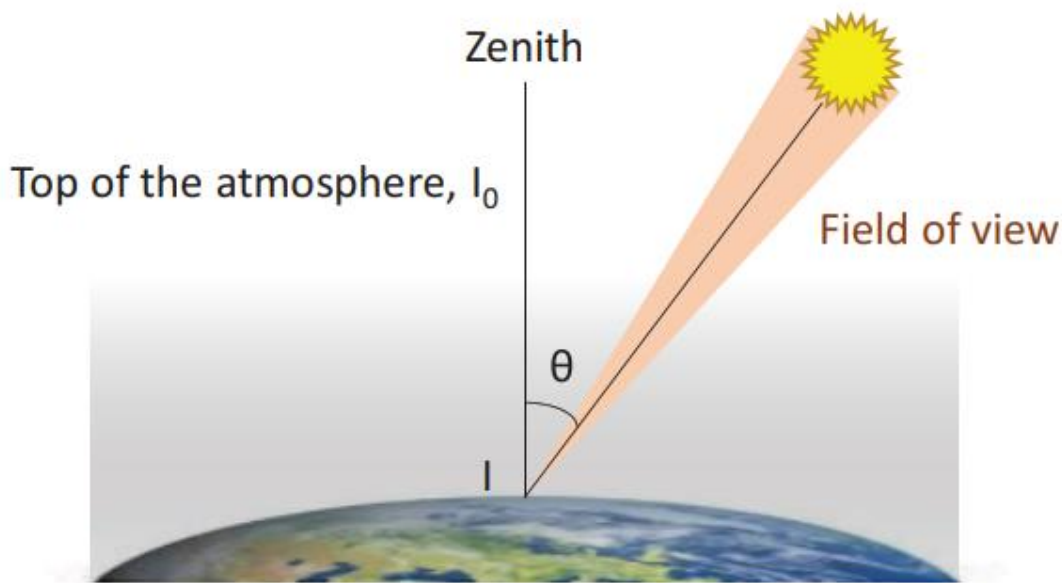


Fig. 1.7. Principio de las mediciones del fotómetro solar utilizado para derivar espesores ópticos de aerosoles (Ramachandran, 2018).

Donde  $m(\theta_0)$  llamado masa óptica, y es dado por el inverso de  $\cos(\theta_0)$  y depende de la distribución vertical de los atenuadores, de las altitudes de que son realizadas las medidas, y del perfil vertical de temperatura (Thomason et al., 1983; Yamasoe et al., 1998).

*La investigación, su esencia y arte.*

Donde:

$$m(\theta_0) = \frac{1}{\cos(\theta_0)} \quad (1.13)$$

### Forzamiento radiativo directo por aerosoles

El forzamiento radiativo directo en la parte superior de la atmósfera (TOA),  $\Delta F$  se estima como sigue (Haywood & Shine, 1995)

$$\Delta F = -DS_0 T_{at}^2 (1 - A_c) \omega \beta \tau \left( (1 - R_s)^2 - \frac{2R_s}{\beta} \left( \frac{1}{\omega} - 1 \right) \right) \quad (1.14)$$

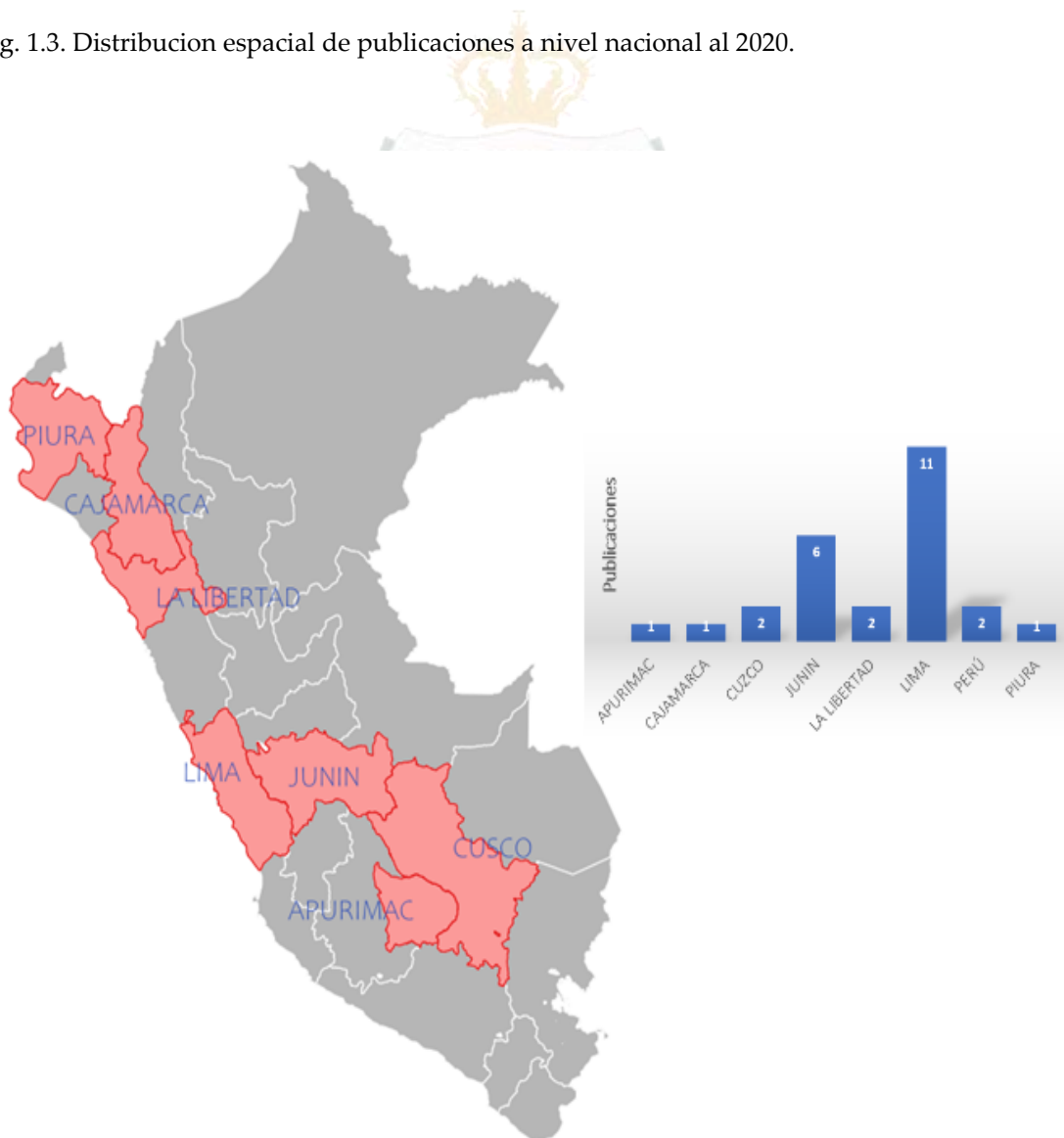
Donde  $D$  es la longitud del día fraccionada,  $S_0$  ( $1370 \text{ Wm}^{-2}$ ) la constante solar,  $T$  la transmisión atmosférica,  $A_c$  la cobertura de nubes fraccionada, y  $R_s$  la reflexión

de superficie, single scattering albedo,  $\omega$ , fracción upscatter,  $\beta$  y el espesor óptico del aerosol,  $\tau$ .

## Investigaciones realizadas a nivel nacional

Se realizó la revisión bibliográfica de 26 artículos científicos publicadas en revistas indexadas en SCOPUS a nivel nacional. Donde los estudios predominan para el departamento de Lima con 11 publicaciones al 2020, y en segundo lugar el departamento Junin con 6 publicaciones. Asimismo, es un claro ejemplo de baja productividad científica respecto a la contaminación del aire o por aerosoles atmosféricos. No obstante, en el cuadro indica el método utilizado y su respectiva importancia al aspecto de salud que puede afectar la contaminación del aire

Fig. 1.3. Distribución espacial de publicaciones a nivel nacional al 2020.





AEROSOLES ATMOSFÉRICOS EN EL CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Año	Autor	Departamento	Pollutants measured or studied							Método				Health effects					
			PM2.5	PM10	VOCS	Phas	Metals	Gases	Hi-VOL	MODIS	REAL TIME	Other	Population	Pregnant	Other				
2012	(Fitzgerald et al., 2012)	CUZCO	X																
2016	(Hernández-Vásquez & Díaz-Seijas, 2017)	LIMA	X																
2015	Moya, et al., 2017	PERÚ		X															
2004 y pronóstico al 2040	(rojas et al., 2019)	Lima	X	X															
2005 y 2010	(astete et al., 2014)	Apurimac		X															
2001-2011	(Gonzales et al., 2014)	LIMA	X																
	(De La Cruz et al., 2019)	JUNIN																	
2016	(Pacsi Valdivia & Llanos Puga, 2017)	LIMA	X																
2017	(Lizarraga-Isla et al., 2019)	JUNIN	X																
2013-2015	(Tapia et al., 2018)	LIMA	X	X															
2016	(Sánchez-Ccoyllo et al., 2018)	LIMA	X	X															



*La investigación, su esencia y arte.*

AEROSOLES ATMOSFÉRICOS EN EL CONTEXTO DE CAMBIO CLIMÁTICO

2016	(Reátegui-Romero et al., 2018)	LIMA	X						MODELO WRF
Agosto 2007, enero, abril y mayo 2008	(suárez-salas et al., 2017)	Junin	X	X			No3, so4		Partisol frm2000
2015	(Ordoñez-Aquino & Sánchez-Ccoyllo, 2017)	LIMA	X				TI, ZN, MG, MN, P, C, CO, CU, PB, BA.		PARTISOL, MICROSCOPIO ELECTRONICO BARRIDO SEMFE QUANTA 200
2010-2015	(Silva et al., 2017)	LIMA	X	X				X	
2010	(Loaiza et al., 2015)	PIURA					PB Y CD		PLOMO: LABS-ITP-P1-007-09 Y CADMIO LABS-ITP-PQ--004-09
2015	(Romero et al., 2020)	LIMA	X				CO, NOX, SO2		MODEL MOVES DE GENERACION DE EMISIONES
2004	(Adetona et al., 2013)	LA LIBERTAD	X	X	X		CO, NO2		CO(PAC II CO MONITOR, DRAEGER SAFETY INC, PITTSBURGH, PA; PM2.5TRIPLEXY CICLONE(BGI, WALTHAM, MA, MODEL SCC1.062, PAHS, METODO SPECTROMETRIA DILUCION ISOTOPO GAS CROMATOGRAFIA



*La investigación, su esencia y arte.*

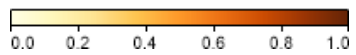
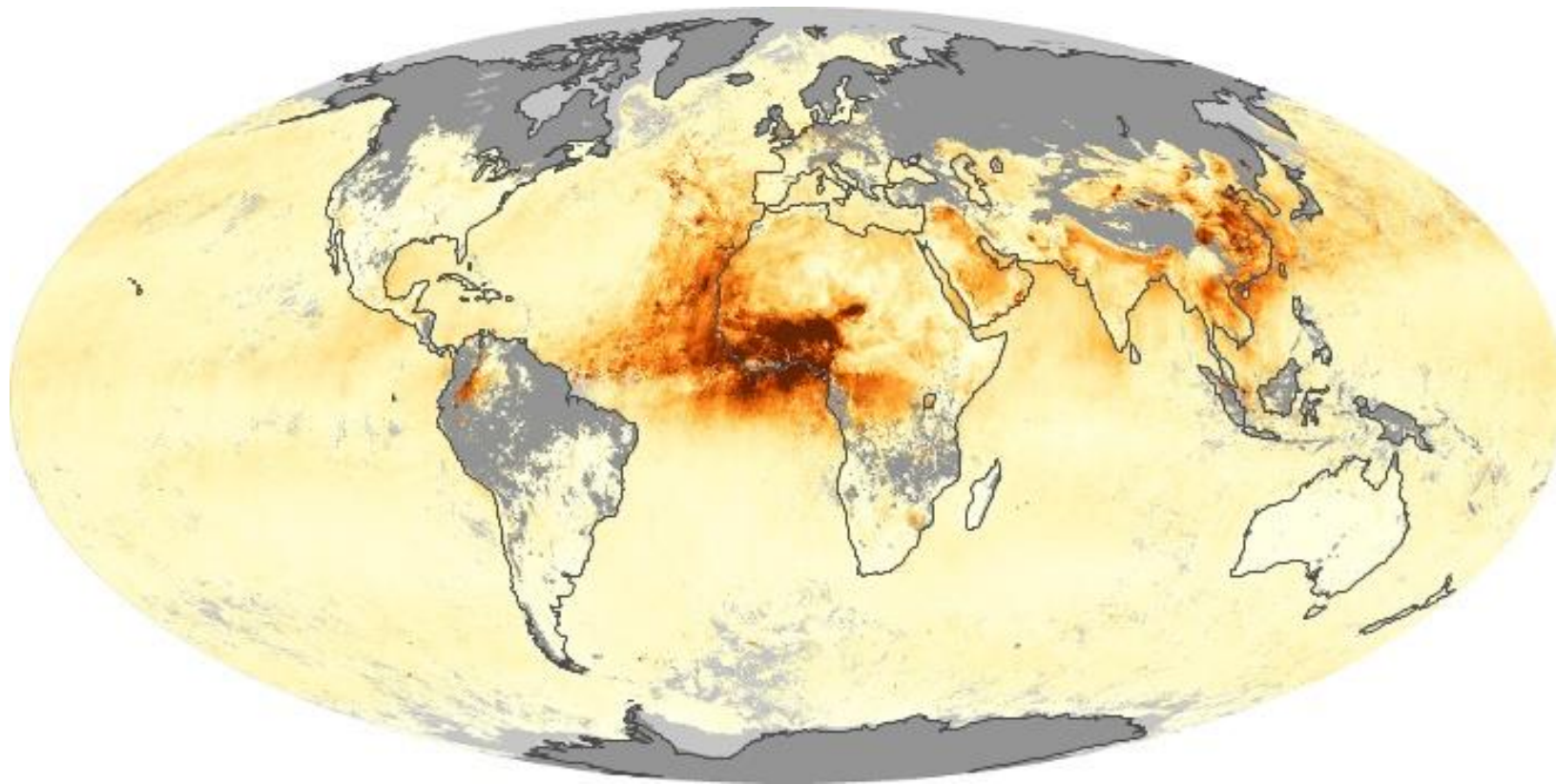
									ALTA RESOLUCION GC HRMS; NO2 SPECTROFOTOMETRI CAMENTE, COVS(PASIVE DIFFUSION STAINLESS TUBES(90MM LARGE, 6.3MM OD Y 5MM ID, PERKIN ELMER, TENAX TA
2009	(Li et al., 2016)	PERÚ		X		CO			CO(PAC II CO MONITOR, DRAEGER SAFETY INC, PITTSBURGH, PA;
2002	(Han et al., 2005)	LA LIBERTAD	X		X	CO			
2009	(Commodore et al., 2013)	CAJAMARCA	X			CO			SIDEPACK AMS10 PM2,5 Y CO DRAGER PAC III SINGLE GAS MONITORS
2010-2016	(Morales-Ancajima et al., 2019)	LIMA	X						USING A RANDOM FOREST (RF) MODEL
2005	(Pearce et al., 2009)	CUZCO	X			CO			CO(LANGAN CO MONITOR, PM2.5 FILTROS 37MM MODEL 224 PCXRSSKC UNIVERSAL PUMPS
2017	(Estevan et al., 2019)	JUNIN							Fotó metro CIME L
2019	(M. J. A. Suazo et al., 2020)	JUNIN							método iqbal
2019	(J. M. A. Suazo et al., 2020)	JUNIN							SP02- L, método o iqbal





Quema de vegetación

Fuente: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/Aerosols>



Espesor óptico de aerosol

Fuente: [https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MODAL2\\_M\\_AER\\_OD/MODAL2\\_M\\_AER\\_RA](https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MODAL2_M_AER_OD/MODAL2_M_AER_RA)

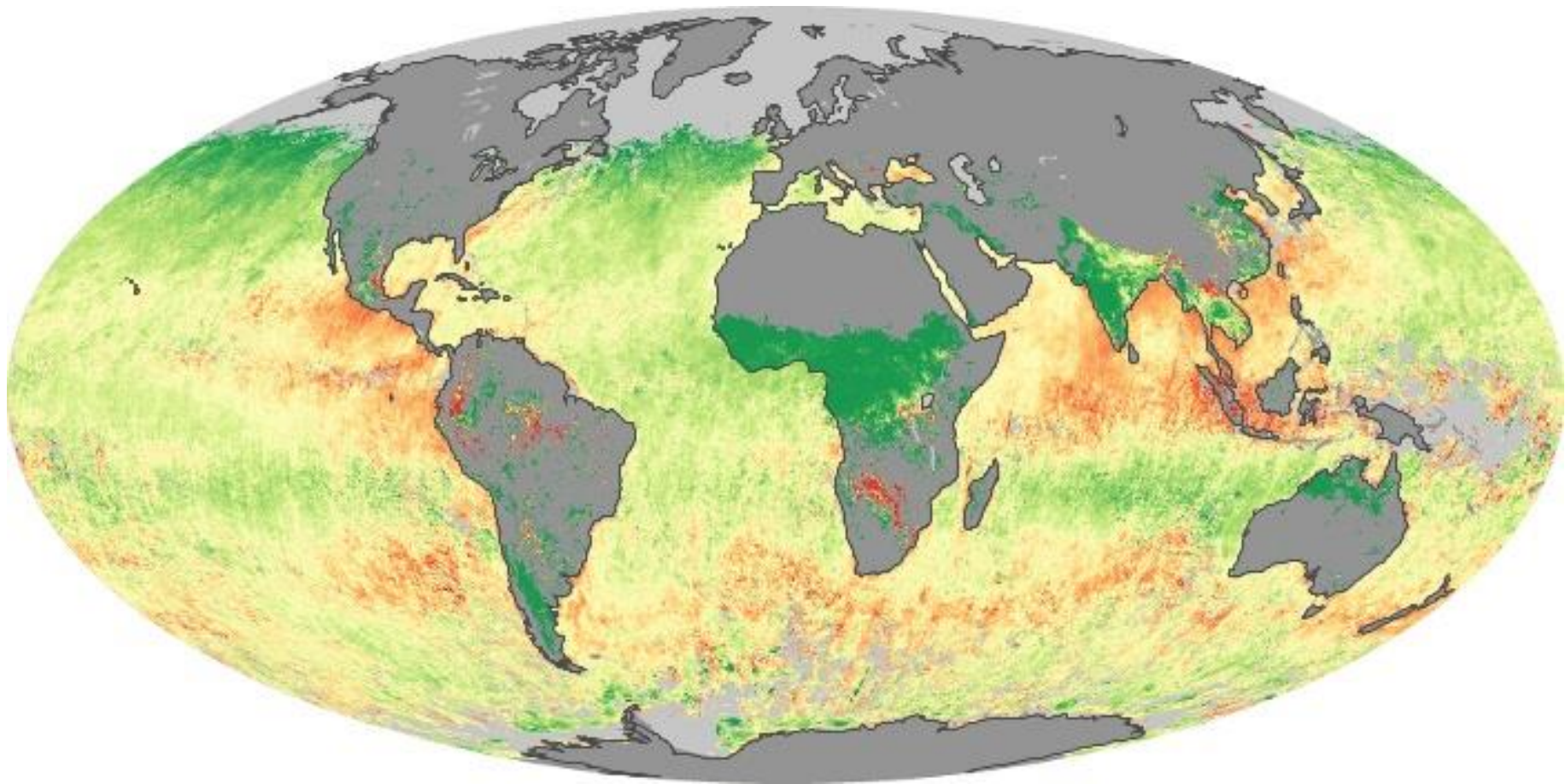
*La investigación, su esencia y arte.*



Aerosoles Atmosféricos

Fuente: [https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image\\_feature\\_2393.html](https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_2393.html)

*La investigación, su esencia y arte.*



Distribución volumétrica de aerosoles atmosféricos

Fuente: [https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MODAL2\\_M\\_AER\\_OD/MODAL2\\_M\\_AER\\_RA](https://earthobservatory.nasa.gov/global-maps/MODAL2_M_AER_OD/MODAL2_M_AER_RA)

## CAPITULO 2

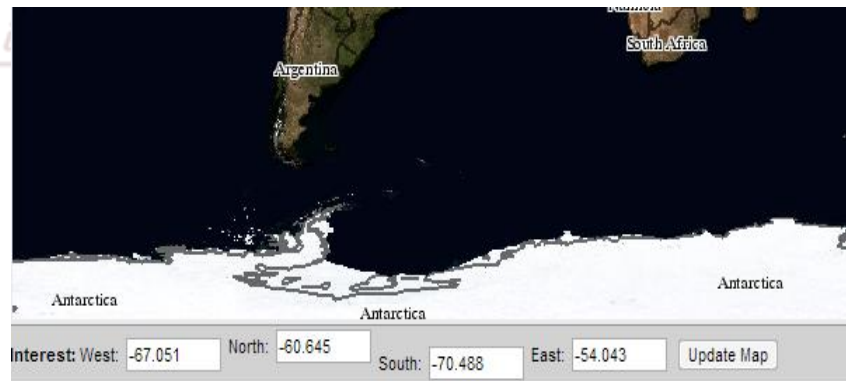
# EFECTO DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOL EN EL FORZAMIENTO RADIATIVO EN LA ESTACION ANTÁRTICA PERUANA MACHU PICCHU

### Materiales y métodos

#### Lugar de estudio

La región de estudio es la región Antártica, la Estación Antártica Peruana Machu Picchu. La región definida para el estudio engloba, los intervalos de coordenadas de latitud  $-60.645^{\circ}$  a  $-70.488^{\circ}$  y longitud de  $-54.043^{\circ}$  a  $-67.051^{\circ}$  indicado en la figura 2.1

Fig. 2.1 imagen del satélite AQUA. En un área delimitada para el estudio a coordenadas de latitud  $-60.645^{\circ}$  a  $-70.488^{\circ}$  y longitud de  $-54.043^{\circ}$  a  $-67.051^{\circ}$



Fuente: MODIS.

#### Fotómetro solar

Para la determinación del espesor óptico de aerosol, se utilizó un fotómetro solar SP02-L (Middleton Inc. Australia) (Middleton Solar, 2004); este instrumento puede ser utilizado para observaciones de aerosol, ozono y vapor de agua. El fotómetro solar SP02-L tiene 4 canales en las longitudes de onda de 412, 500, 675 y 862 correspondientes a la radiación visible. La versión SP02-L tiene un bandpass de 10 nm, y un fieldwiew (vista de campo) de  $2.5^{\circ}$ , las señales de salida



tienen un rango de -0.05 a 4.50 VDC, adicionalmente tiene una salida de temperatura interna (10mV/1°C). La temperatura de operación del fotómetro solar es de -30°C a 70 °C.

Fig. 2.2 fotómetro solar SP02



## Metodología para la obtención del espesor óptico de aerosol

Las mediciones del voltaje incidente mediante el fotómetro solar SP02 se hizo a una latitud 62°05'29" S y con una longitud de 58°28'16" W para la obtención del espesor óptico que fue calculado por la ley de Beer-Lambert-Bouguer conforme a la ecuación presentada 1.12, donde el espesor óptico total es la suma de los espesores ópticos de aerosol, dispersión de rayleigh y la absorción por ozono:

$$\tau(\lambda) = \tau_a(\lambda) + \tau_R(\lambda) + \tau_{O_3}(\lambda) \quad (2.1)$$

$\tau_a(\lambda)$ : Espesor óptico de los aerosoles a una longitud de onda  $\lambda$ .

$\tau_R(\lambda)$ : Espesor óptico Rayleigh a una longitud de onda  $\lambda$ .

$\tau_{O_3}(\lambda)$ : Espesor óptico del ozono a una longitud de onda  $\lambda$  (Liou, 2002).

El espesor óptico de Rayleigh, conocido también como espesor óptico de Rayleigh-scattering, es calculado usando la ecuación 2.2 de (Bodhaine et al., 1999) donde la longitud de onda,  $\lambda$ , está en micrómetros.

$$\tau_R(\lambda)(sea\ level, 45\ N) = 0.002152 * \frac{1.0455996 - 341.29061\lambda^{-2} - 0.90230850\lambda^2}{1 + 0.0027059889\lambda^{-2} - 85.968563\lambda^2} \quad (2.2)$$

El espesor óptico de ozono depende de la concentración de la columna de ozono total ( $\Omega$ ) en unidades Dobson como se señaló en la ecuación 2.3. Este valor se obtiene a través de mediciones de Ozone Monitoring Instrument (OMI) instrumento de satélite Aura (Levelt et al., 2006), y el uso de los coeficientes de absorción de ozono ( $\sigma$ ) para las longitudes de onda de 412, 500, 675 y 862 nm que tienen los siguientes valores 0,000295974375, 0,031997375, 0,0401001875 0,00247309125 respectivamente (proporcionada por J. Michalsky).

$$\tau_{o_3}(\lambda) = \Omega * \sigma / 1000 \quad (2.3)$$

Para la obtención del espesor óptico solamente debido a los aerosoles, se debe conocer una constante en la parte superior de la atmósfera ( $I_{0\lambda}$ ), característica de cada longitud de onda, y así estimar el espesor óptico debido al efecto Rayleigh que produce la dispersión de la radiación debido a las moléculas de gases en la atmósfera y también el espesor óptico debido a la absorción del ozono. La constante ( $I_{0\lambda}$ ) es obtenida en la etapa de medición mediante la curva de Langley (logaritmo de la Intensidad para cada longitud de onda versus masa de aire) para una masa de aire igual a cero para los días 26 de enero, 1 febrero, 2 febrero, 5 febrero, 6 febrero, 8 febrero, 21 de febrero y 22 de febrero.

$$I_\lambda = R^{-2} I_{0\lambda} e^{-m\tau(\lambda)} \quad (2.4)$$

## Coeficiente de Angstrom para la obtención del tipo de aerosol

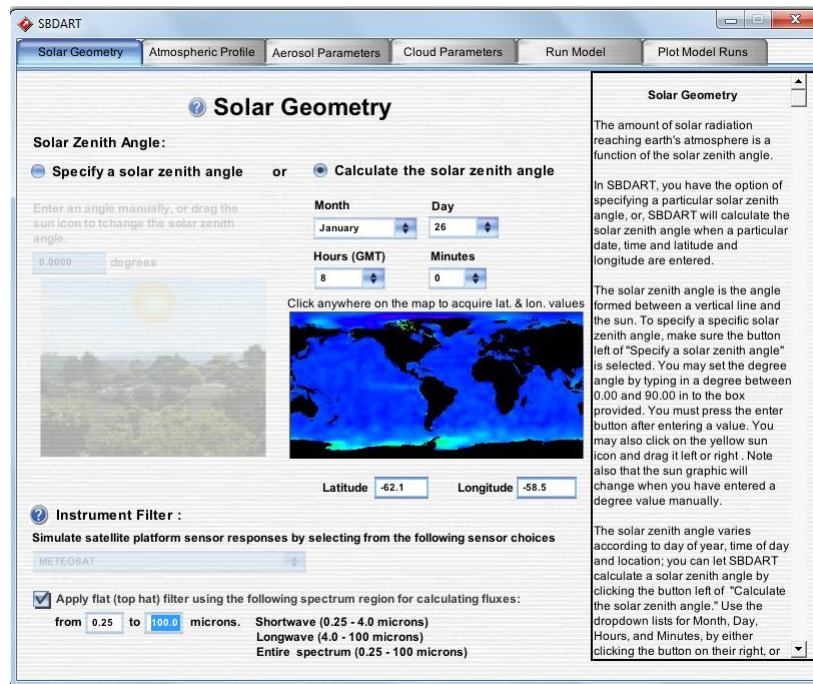
Para poder estudiar el tipo de aerosol, es necesario calcular el exponente ángstrom, este es determinado según la definición de Ångström (Ångström, 1929), por la ecuación 1.1

## SBDART- SANTA BARBARA Disort Radiative Transfer

El SBDART (Santa Barbara DISORT Atmospheric Radiative Transfer) es un software desarrollado para la enseñanza y la investigación de la transferencia radiativa en la atmósfera terrestre. Esta aplicación resuelve la ecuación de transferencia radiativa, considerando una atmósfera plano-paralela con o sin presencia de nubes (Ricchiazzi et al., 1998). Para la solución de las ecuaciones de transferencia radiativa (ETR), el programa se basa en el código DISORT-Discrete Radiative Transfer (Wiscombe, 1980). El programa SBDART posee una biblioteca con propiedades estándar que modelan las características de diferentes

condiciones atmosféricas como: tipo de aerosol, nubes, moléculas de gases y propiedades de superficie terrestre y rueda en un sistema operacional UNIX o también ahora en una nueva versión en Windows como se muestra en la fig. 2.3.

Fig. 2.3 Ventana del programa SBDART



En el cual se introdujo los datos del día medido, latitud, longitud, concentración de CO<sub>2</sub> (360ppm), CH<sub>4</sub> (1.75ppm), N<sub>2</sub>O(0.32ppm) y del espesor óptico de aerosol a 500nm para los días medidos en la Estación Antártica peruana Machu Picchu.

## *La investigación, su esencia y arte.* Cálculo de intensidades iniciales

Para el procesamiento de datos en el cálculo del espesor óptico se realizaron lecturas cada 10 segundos, con cero de cobertura nubosa alrededor del Sol, en un promedio de 1000 lecturas por cada longitud de onda durante el mes de enero y febrero.

En primera parte se obtuvo la intensidad inicial cuando la masa de aire es 0 según Langley-plot donde presenta residuales menores a 0.02 como se muestra en la fig. 2.4; donde se calculó la intensidad o voltaje inicial para cada longitud de onda para una masa de aire igual a cero ( $m=0$ ) en el que se hizo una regresión lineal en el software Matlab 2017 como se muestra en la fig.2.4.

Obteniendo las intensidades iniciales de 3.2143, 2.7661, 2.7570 y 2.6836 Voltios para 412, 500, 675 y 862nm respectivamente.

Fig. 2.4 intensidad inicial mediante langley-plot

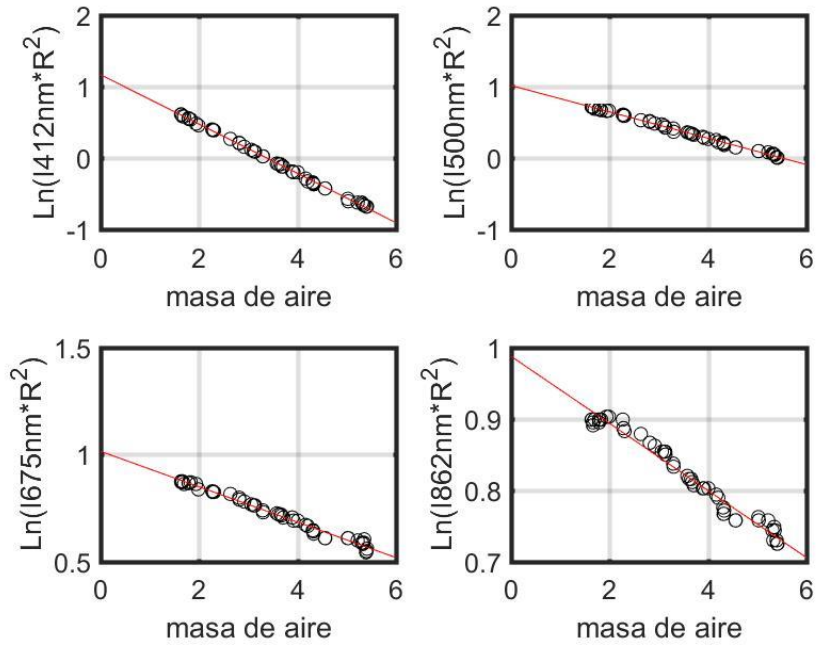
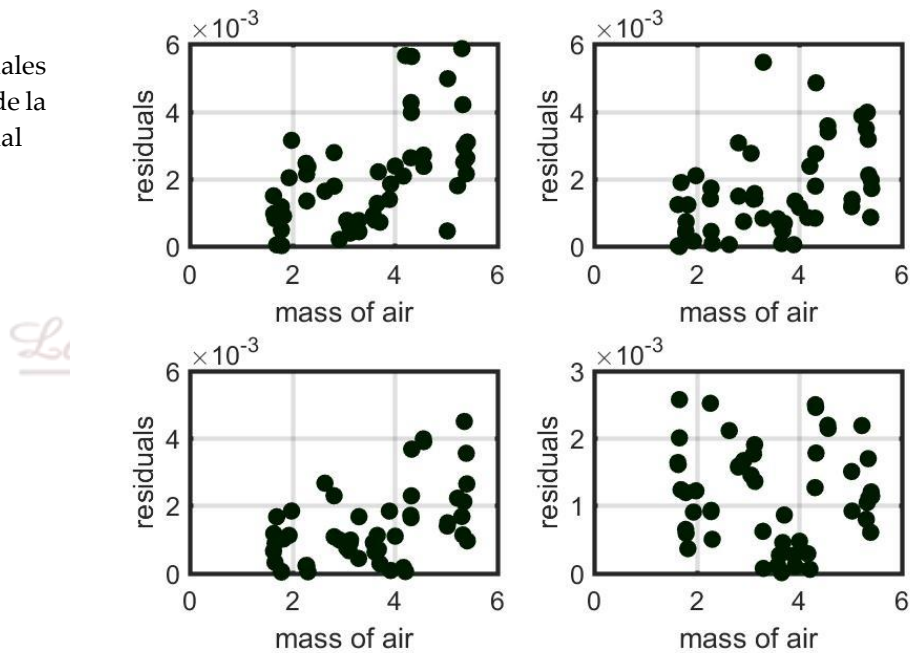


Fig. 2.5 Residuales para el cálculo de la intensidad inicial



## Espesor Óptico de Aerosol, Rayleigh y Ozono

En relación a los espesores ópticos, la tabla 2.1 muestra un resumen de los valores promedio encontrados para cada tipo de espesor óptico, del total de las observaciones realizadas con ángulos cenit solar inferior a  $80^\circ$ . Estos valores son normalmente pequeños en comparación a otras ubicaciones no polares, las condiciones de clima y ubicación de la región Antártica favorecen a que estas propiedades de los aerosoles sean menores.

Tabla 2.1 evaluación de EOA, espesor óptico de Rayleigh y espesor óptico del ozono

	Espesor óptico de aerosol	Espesor óptico de Rayleigh	Espesor óptico de ozono
<b>412nm</b>	0.1149	0.23649	0.00058
<b>500nm</b>	0.0838	0.11529	0.00026
<b>675nm</b>	0.0621	0.03728	0.00007
<b>862nm</b>	0.0447	0.01475	0.00002

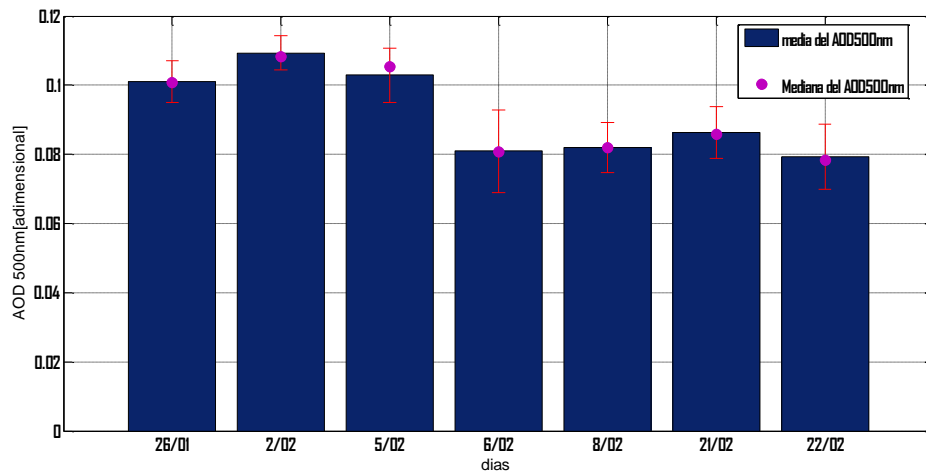
Ciertamente las propiedades de los aerosoles de la atmósfera cambian radicalmente con el tiempo y las condiciones climáticas. La comparación de nuestros resultados con mediciones similares en la región antártica durante el verano austral y en diferentes periodos (años) (R. Stone et al., 2005; R. S. Stone et al., 2007), indican que lo obtenido está dentro del rango de lo naturalmente medido. El espesor óptico de aerosol disminuye con el incremento de la longitud de onda y son de razonable dimensión, al igual que el espesor óptico de Rayleigh, por lo que podemos confiar en nuestras mediciones. Los bajos valores del espesor óptico de ozono demuestran la débil interacción que tienen estas longitudes de onda con la molécula del ozono.

*La investigación, su esencia y arte.*

## Espesor Óptico de Aerosol

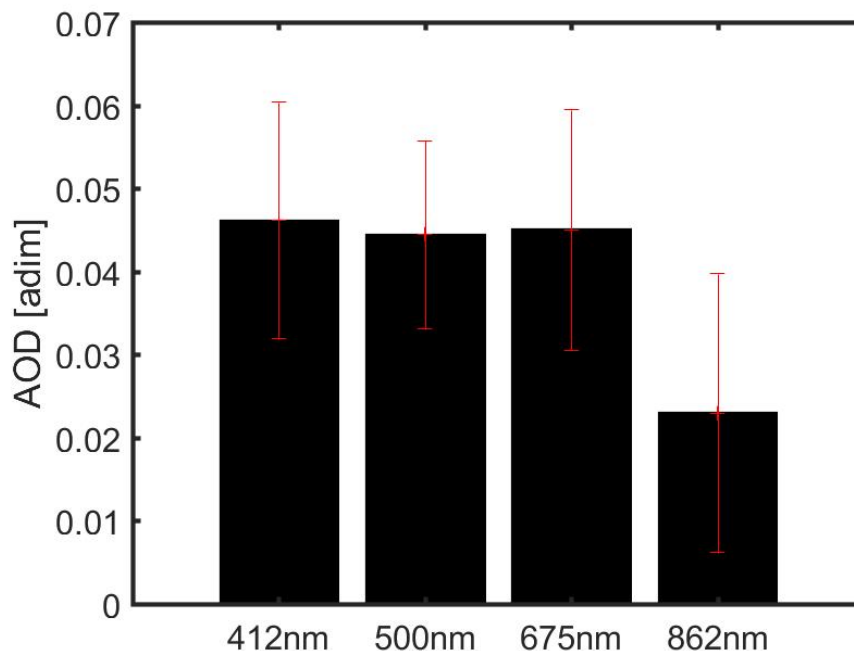
En las figura presentan las medidas diarias realizadas en el año 2013 los días 26 de enero, 2, 5, 6, 8, 21 y 22 de febrero del espesor óptico de aerosol, para 500nm (sirve para determinar el forzamiento radiativo) con cero de cobertura solar durante las horas de la mañana y de la tarde, en la cual es posible observar la atenuación de la radiación por los aerosoles con respecto a una atmósfera limpia presentando una mayor EOA el día 2 de febrero y un menor EOA el día 22 de febrero con 0.1093 y 0.0793 respectivamente para 500nm,

Fig. 2.6  
Variación  
diaria del  
EOA a  
500nm



También se presentan los histogramas del espesor óptico de aerosoles para cada longitud de onda con sus respectivos coeficientes de variación, se puede observar que el espesor óptico de aerosol disminuye a medida que aumenta la longitud de onda mientras que la interacción entre la radiación y los aerosoles se incrementa, siendo la longitud de onda de 862 nm la que tiene mayor variación por efecto de los aerosoles.

Fig.2.7  
Variación de  
EOA para  
412, 500, 675  
y 862nm



Los resultados de EOA mostrados están dentro del rango de los hallados en el Polo Antártico y Ártico por otros grupos (R. Stone et al., 2005; R. S. Stone et al., 2007), pero menores en relación a los encontrados en ciudades urbanas entre 0.25 a 1.7 (Castro et al., 2001) ni para los que pertenecen a los registrados en lugares

de quema de la biomasa donde llegan a valores en el rango de 0.6 a 2.4 para similares longitudes de onda. (Eck et al., 2003).

Para el caso particular de los parámetros de EOA a 500nm y coeficiente de turbiedad ( $\beta$ ) (fig. 2.8), los resultados obtenidos en este estudio presentan que a mayor coeficiente de turbiedad tiende a mayor número de partículas, ya que a mayor longitud de onda siendo la de 862nm tiene mayor interacción con la radiación incidente. En las fig. 2.8 y 2.9 presentan una relación directa de que conforme aumenta el EOA también aumenta el coeficiente de turbiedad, que quiere decir que el número de partículas presentes en la atmósfera de la Antártida da un valor máximo de 0.062 de coeficiente de turbiedad el día 2 de febrero en el que coincide el mismo día que se presentó mayor EOA de 0.1093.

Fig. 2.8  
Variación del coeficiente de turbiedad respecto a la longitud de onda

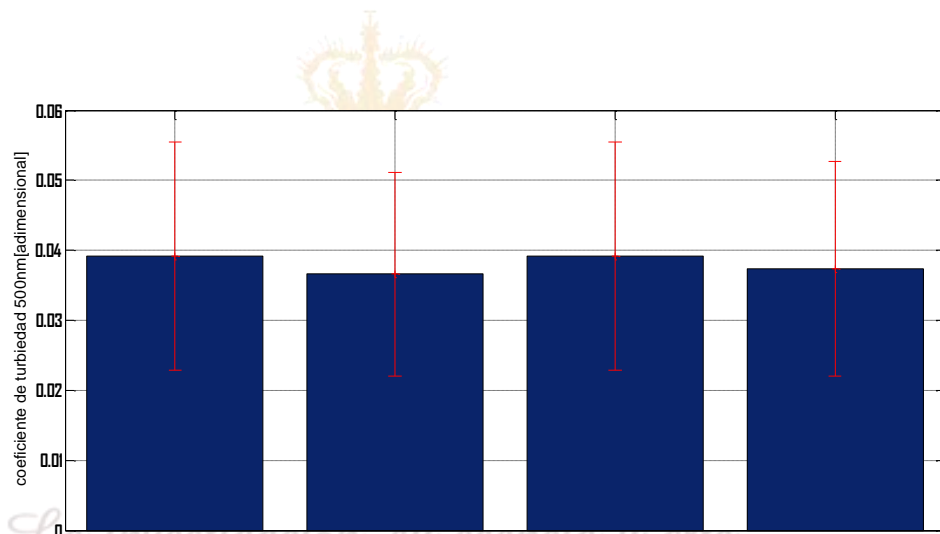
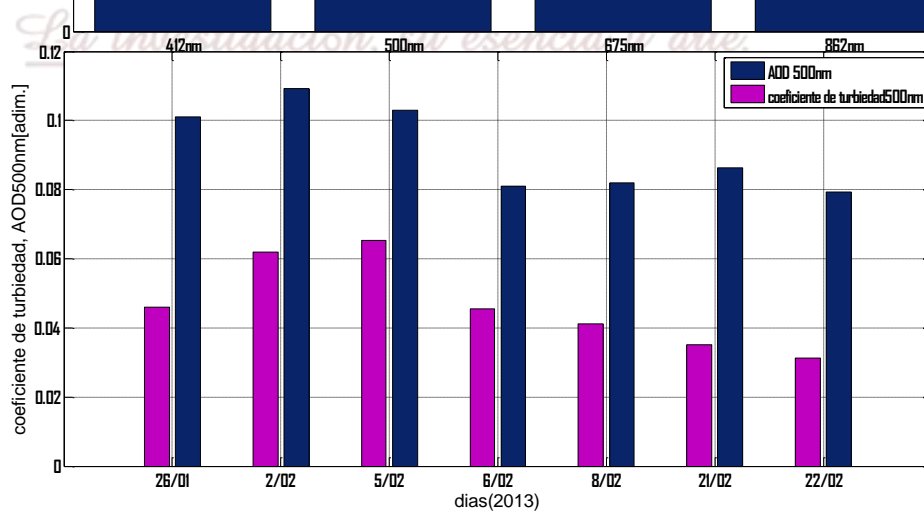


Fig. 2.9  
variación del coeficiente de turbiedad y EOA

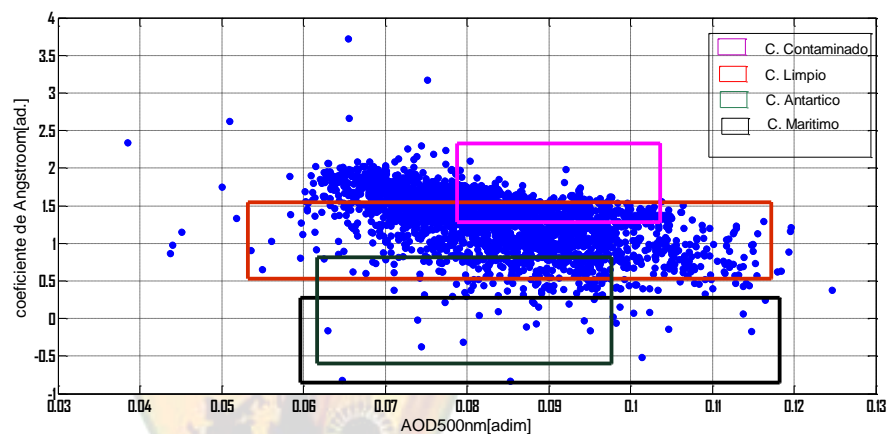


## Tipo de aerosol

El coeficiente de Ångström ( $\alpha$ ), está relacionado con el radio medio de las partículas. Pequeños valores que representan partículas de gran tamaño, por

ejemplo, polvo. En cambio, valores grandes representan partículas más pequeñas como las partículas de humo (Shifrin, 1995). En la fig. 2.10, los valores de  $\alpha$  que están entre 0.12 y 0.4 (L. A. Otero et al., 2004) indican la presencia de partículas de gran tamaño, las mismas que corresponden a los aerosoles de tipo marítimo polucionado y desértico. Mientras que los valores de  $\alpha$  superiores corresponden a partículas finas propios de los aerosoles antárticos. Según las gráficas mostradas para la determinación del tipo de aerosol que se determinaron son: aerosol continental contaminado, continental limpio, antártico como partículas finas, y aerosoles tipo marítimos como partículas gruesas en los días 26 de enero, 1, 2, 5, 6, 8, 21 y 22 de febrero.

Fig. 2.10 Tipo de Aerosol presente en la Estación Antártica Peruana Machu Picchu



## Influencia del espesor óptico de aerosol en la cantidad de radiación solar mediante el SBDART

*La investigación, su esencia y arte.*

En las siguientes figura muestran la influencia de los aerosoles en la cantidad de radiación solar ultravioleta (305, 320nm, 340nm y 380nm) que llega a la superficie terrestre para los días 26 de enero, 2, 5, 6, 8, 21, 22 de febrero del 2013 para cada espesor óptico de aerosol a 500nm en el SBDART y TUV(model tropospherical Ultravioleter) en el cual muestra una influencia ya sea de los aerosoles como del CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, como también la distancia sol-tierra, que conforme va pasando los días y terminando el verano en la Antártida va disminuyendo la radiación incidente al pasar los días obteniéndose una mayor incidencia de radiación incidente a onda corta de 0.0659, 0.355, 0.599, 0.734 W/m<sup>2</sup> y 8 (26 de enero) para 305, 320, 340, 380nm e índice UV respectivamente a un espesor óptico de aerosol de 0.1011 y una menor radiación incidente UV de 0.0334, 0.232, 0.425, 0.548 W/m<sup>2</sup> y 4 (22 de febrero) para 305, 320, 340, 380nm e índice UV respectivamente a un espesor óptico de aerosol de 0.0793 lo que nos indica que no solo el EOA no solo se encarga de dispersar hacia afuera de la atmósfera la radiación incidente para disminuir la radiancia que llega a la superficie terrestre sino que también puede dispersar hacia la superficie terrestre tendiendo a aumentar la radiancia dependiendo de la asimetría de la partícula.



Fig. 2.11 Variación de la radiación Ultravioleta a 305nm respecto a los EOA (500nm)

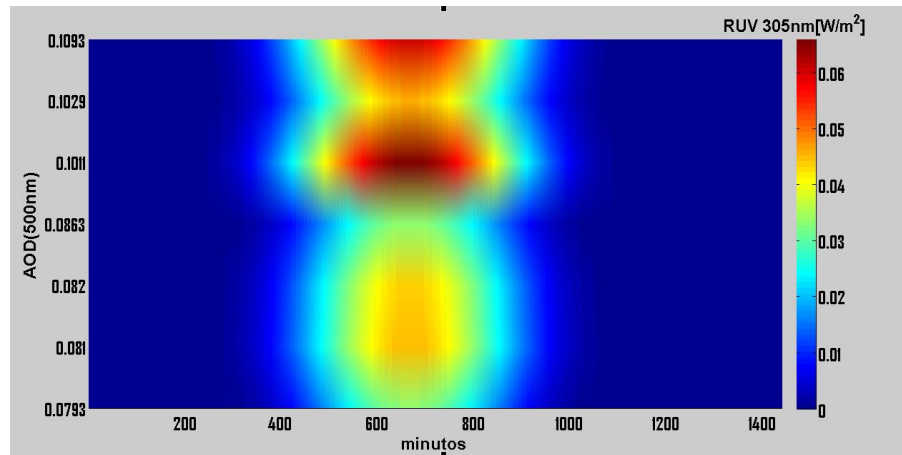


Fig. 2.12 Variación de la radiación Ultravioleta a 320nm respecto a los EOA (500nm)

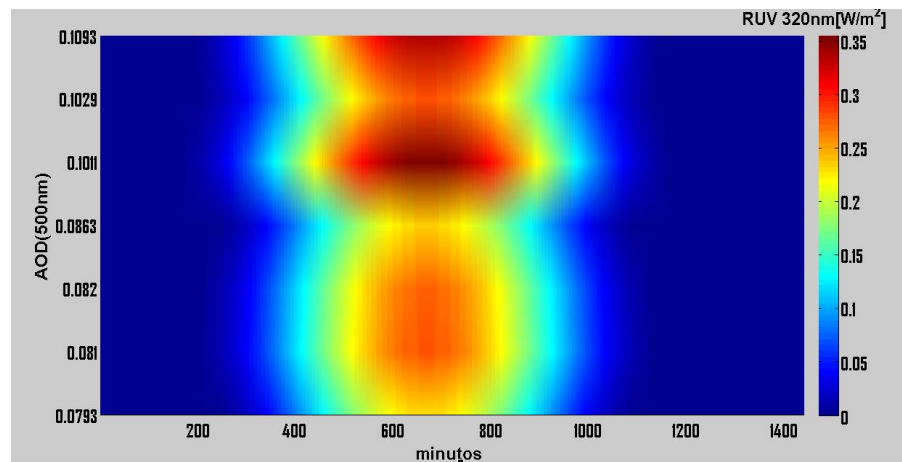


Fig. 2.13 Variación de la radiación Ultravioleta a 340nm respecto a los EOA (500nm)

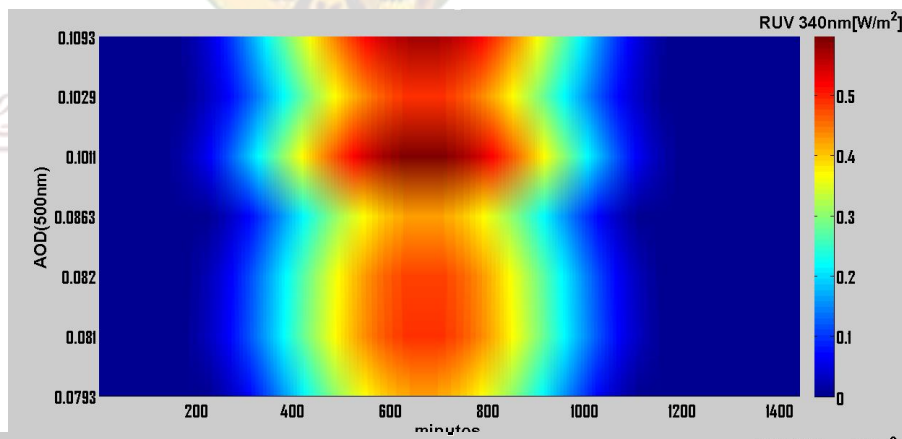


Fig. 2.14 Variación de la radiación Ultravioleta a 380nm respecto a los EOA (500nm)

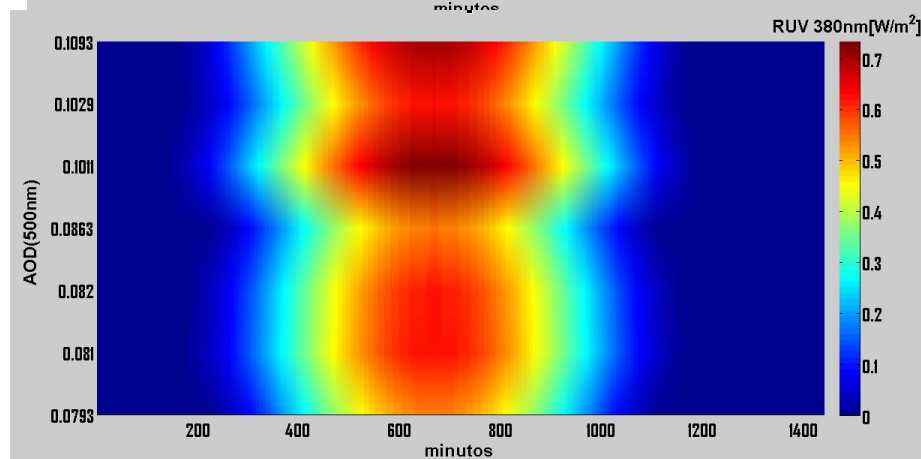
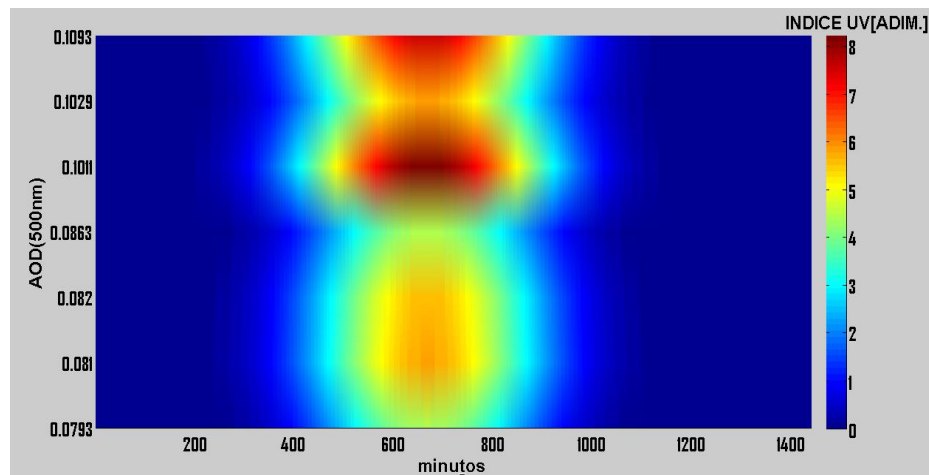


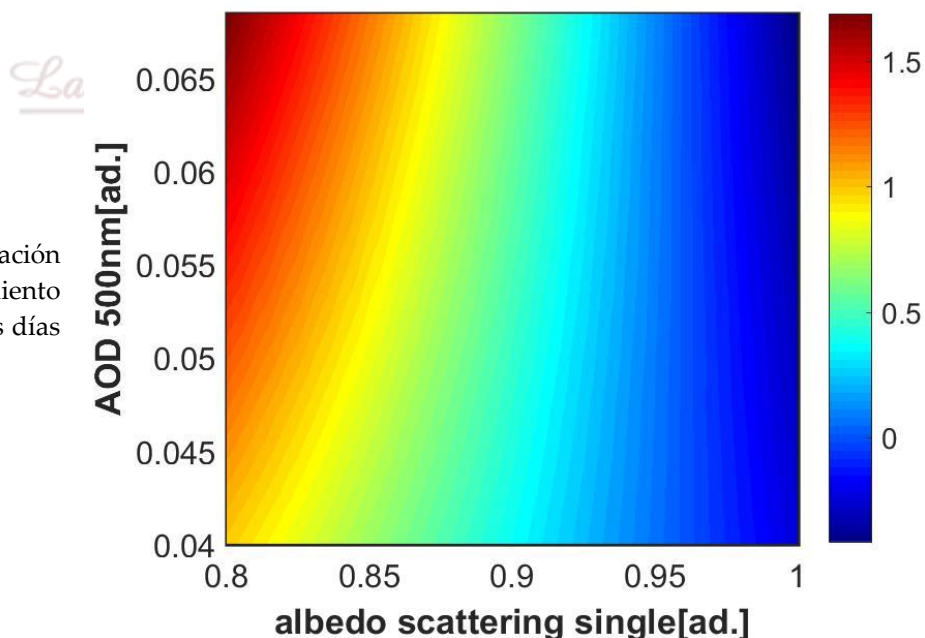
Fig. 2.15  
Variación del índice UV respecto a los EOA (500nm)



### Forzamiento radiativo directo

De acuerdo a la fig. 2.16 se obtuvo un enfriamiento en el sistema terrestre. Se presentó un alto forzamiento radiativo de  $-5 \text{ W/m}^2$  debido al alto valor del albedo scattering single de 1 como del EOA a 500nm de 0.1093. Esto se debe a que el albedo scattering single y al EOA a 500nm son valores máximos, produciendo así un enfriamiento en el sistema climático de la Antártida.

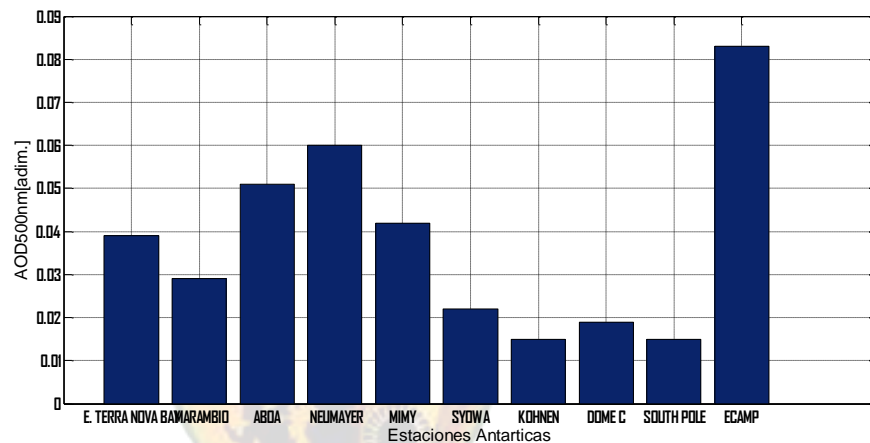
Fig. 2.16 Variación del Forzamiento radiativo en los días medidos



## Comparación del EOA (500nm) con otras Estaciones Antárticas

Comparando con las otras estación Antárticas y Árticas el EOA a 500nm, la estación perteneciente al continente Ártico es la estación de Siberia donde se determinó que disminuyó el EOA (500nm) en -7.6% por año desde 1981-1991, en la estación de Barrow disminuyó el EOA en -1.6% por año desde 1977-2002, en la estación de AWI(Germanya) disminuyó -2.2% por año desde 1991-2006 todas estas estaciones pertenecientes al polo norte de la zona costera (Tomasi et al., 2007). En cambio, en el polo sur se dieron los siguientes datos de EOA a 500nm para cada estación como se muestra en la figura:

Fig. 2.17  
variación del  
AOD a 500nm  
en las estaciones  
Antárticas



Donde se puede observar que en la estación Antártica peruana presenta una alta mediana de EOA de 0.0831 a 500nm como las estaciones de Neumayer y Aboa de 0.06 y 0.0551 respectivamente ya que estas pertenecen a la zona costera donde se da mayor influencia de aerosoles marinos, en cambio los que no pertenecen a la zona costera presentan valores mínimos como la estación de Kohnen y South pole de 0.015 cada una respectivamente (Tomasi et al., 2007)

## CAPÍTULO 3

# PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS AEROSOLAS ATMOSFÉRICOS EN HUANCAYO

### Materialas y Métodos

#### AERONET

La red está compuesta por más de 200 fotómetros solares dispersados por el globo en lugares estratégicos para medir las propiedades físicas, ópticas, radiativas del aerosol integrados en la columna atmosférica, creada inicialmente con el objetivo de validar las medidas de aerosol por sensoramiento remoto con satélites (Pokharel et al., 2019; Sinyuk et al., 2007).

Basado en el fotómetro solar CIMEL, el radiómetro de barrido automático multicanal, AERONET mide AOD en las longitudes de onda de 340, 380, 440, 500, 675, 870 y 1020 nm, y proporciona productos de inversión como SSA, ASY e índice de refracción complejo a 440, 670, 870 y 1020 nm (Oleg Dubovik et al., 2002; Oleg Dubovik & King, 2000).

Estos productos se derivan para tres niveles de calidad de datos: Nivel 1.0 (sin filtrar); Nivel 1.5 (proyectado en la nube); y Nivel 2.0 (Proyectado en la nube y de calidad garantizada).

Las observaciones de AERONET han sido, y siguen siendo, ampliamente utilizado para caracterizar las propiedades ópticas de los aerosoles y sus efectos radiativos (H. Chen et al., 2013; Kim et al., 2007; X. Xia et al., 2016; Xiangao Xia, Chen, et al., 2007; Xiangao Xia, Li, et al., 2007).

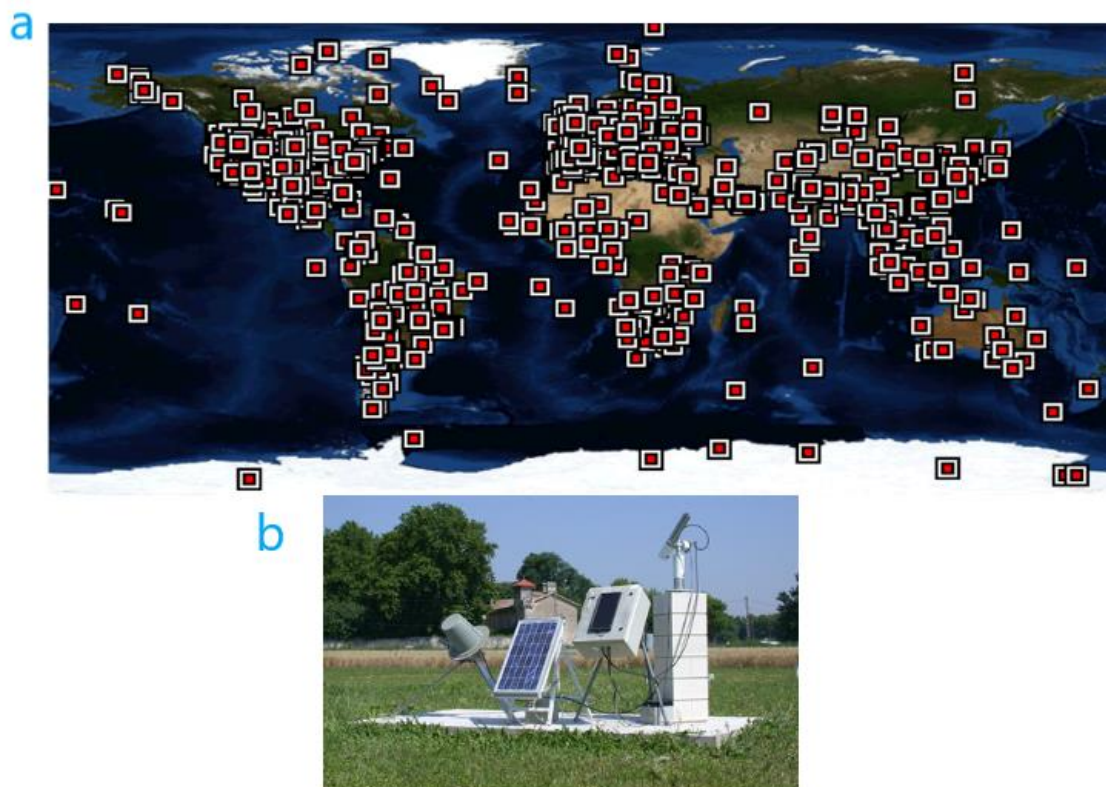


Fig. 3.1 a. Aeronet data, b. fotómetro solar CIMEL. Fuente: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>

## Resultados

### Espesor óptico de aerosol

*La investigación, su esencia y arte.*

El espesor óptico de aerosol ( $\tau$ ) está relacionado con la cantidad de materia ópticamente activa en la columna atmosférica y es importante en la caracterización de la carga de aerosoles de las regiones estudiadas, y en el forzamiento radiativo directo en esta provincia. La fig. 3.2 presenta la serie temporal del espesor óptica del aerosol en  $440\text{ nm}$  obtenida del AERONET, donde indica la dependencia espectral del espesor óptico del aerosol y su relación con el tamaño de la partícula, y puede ser utilizado para la obtención de ( $\tau$ ) en otras longitudes de onda.

Las medidas del AERONET se muestra valores elevados de ( $\tau$ ) para los años 2018 y 2022. Los valores máximos son típicamente de 0 a 7.

Fig. 3.2 Serie temporal del espesor óptico de aerosol en 440 nm obtenida por el AERONET. La línea se refiere a las medias diarias

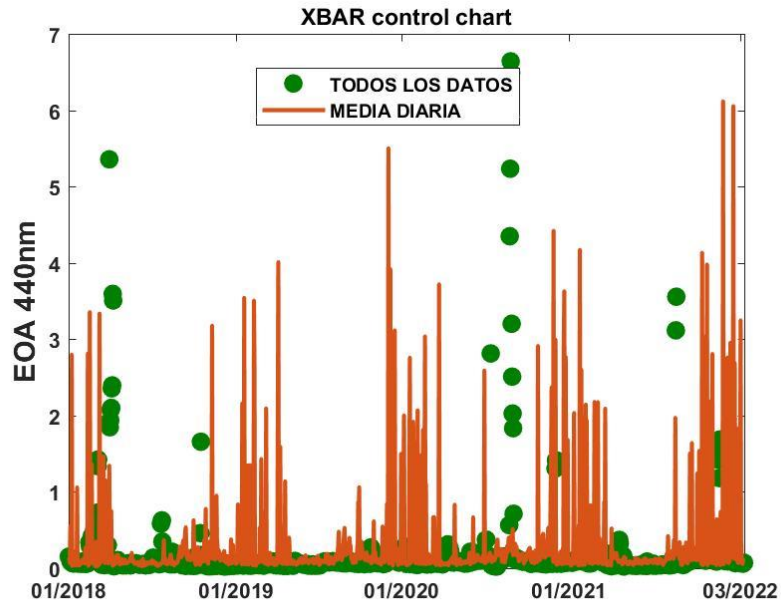
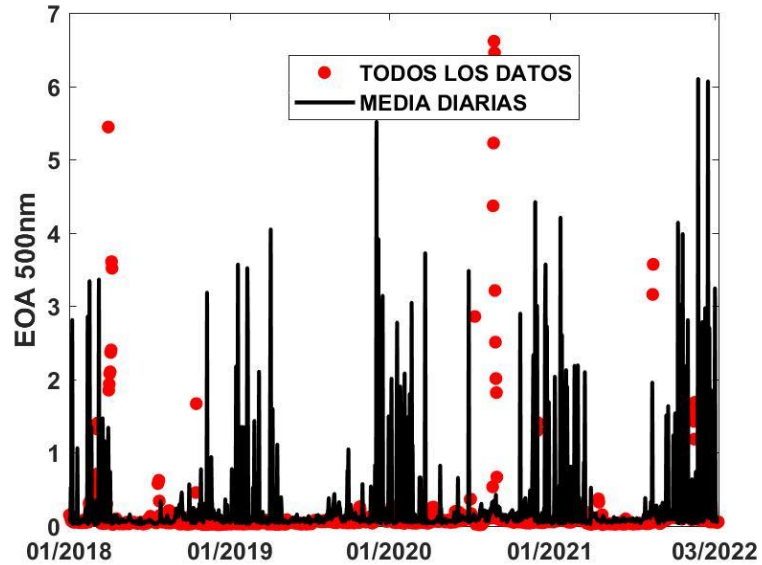


Fig. 3.3 Serie temporal del espesor óptico de aerosol en 500 nm obtenida por el AERONET. La línea se refiere a las medias diarias

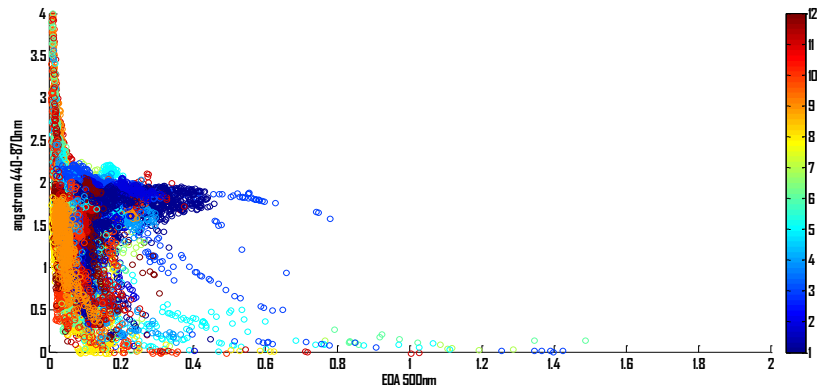


*La i*

### Coeficiente de Angstrom

El coeficiente de angstrom es normalmente usado para caracterizar la dependencia espectral de una determinada región. En este trabajo fue estudiada su relación con el espesor óptico de aerosol para caracterizar la cantidad y fuente de aerosol para las diferentes regiones estudiadas. En la parte superior de la fig. 3.4, se nota que el coeficiente de angstrom llega cerca de 4, y la profundidad óptica de aerosol crece significativamente, indicando un fuerte dominio de aerosoles de la moda fina, probablemente viniendo de emisiones de quemadas.

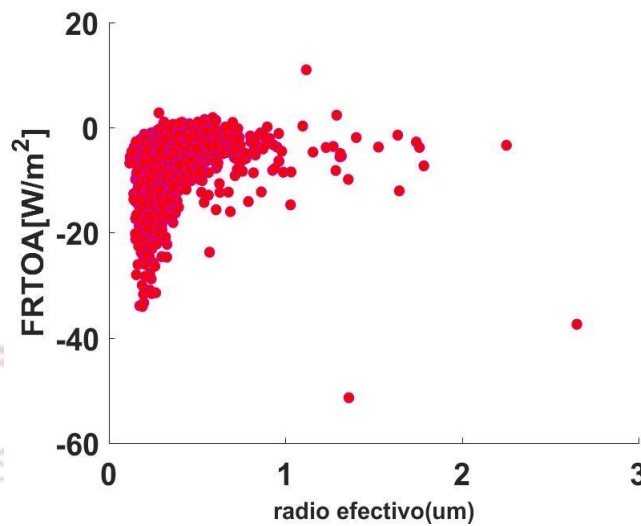
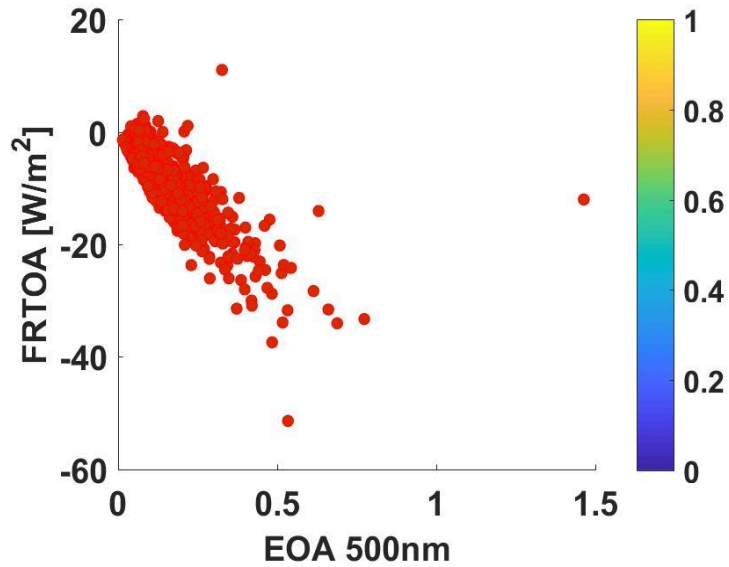
Fig. 3.4 Coeficiente de Angstrom entre las longitudes de onda 870-440 nm versus el espesor óptico de aerosol en 500 nm.



### Forzamiento radiativo directo y eficiencia de forzamiento instantánea del aerosol

La propiedad de forzamiento radiativo directo del aerosol es utilizada para cuantificar el impacto climático de las partículas de aerosol. Valores negativos del forzamiento están relacionado con enfriamiento en la superficie, y valores positivos con el calentamiento. De manera simple, cuanto mayor el número de partículas de aerosol, más radiación solar incidente será reflejada y absorbida. Se observa que el forzamiento radiativo directo en la parte superior de la atmosfera, FRTOA, posee relación con la carga total de aerosol en la atmosfera y con el radio efectivo del aerosol, como se ilustra en la fig. 3.5. El FRTOA llega cerca a  $-42W/m^2$  para el aerosol de radio efectivo menor que  $1.3\mu m$ , correspondiendo a valores de  $\tau_{500}$  mayores que 0.5.

Fig. 3.5 Relación entre el forzamiento radiativo directo instantáneo del aerosol en la parte superior de la atmosfera y el espesor óptico de aerosol a 500 nm. La parte de abajo, el mismo forzamiento radiativo de aerosol versus el radio efectivo del mismo.

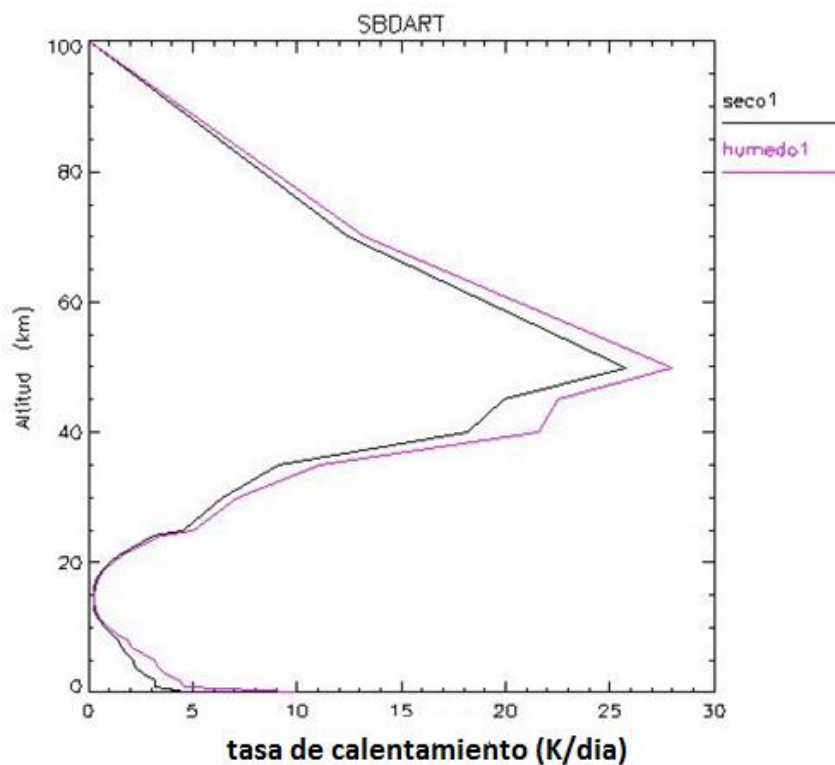


### Influencia del espesor óptico de aerosol sobre la tasa de calentamiento

En la fig.3.6 se muestra una media de la tasa de calentamiento debido a los aerosoles atmosféricos. Asimismo, se muestra una tasa promedio a una altitud de 20km de -1.5 y -2.5 K/día en la estación seca y húmeda respectivamente con una concentración de 0.1 y 0.35 de espesor óptico de aerosol para la estación seca y húmeda respectivamente. Esto demuestra que los aerosoles atmosféricos enfrían el sistema atmosférico de Huancayo tanto para la estación seca y húmeda.



Fig. 3.6 Tasa de calor en la provincia de Huancayo para estación seca y húmeda.



### Agradecimientos



A la Nasa-Red Aeronet, como al Instituto Geofísico del Perú, por la recolección de datos que nos brinda en su portal web.

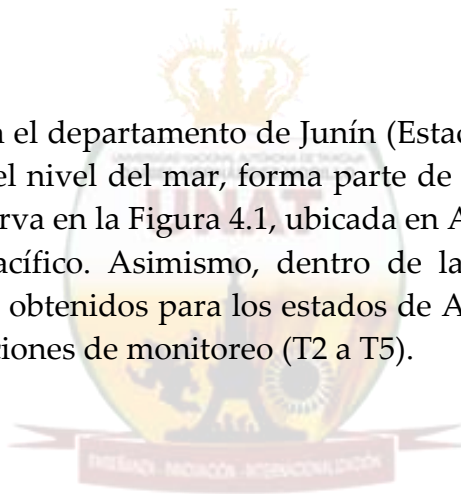
## CAPÍTULO 4

### MATERIAL PARTICULADO Y MODELO HYSPLIT

#### Materiales y métodos

##### Lugar de estudio

El estudio se realizó en el departamento de Junín (Estación T1), con una altitud de 3300 metros sobre el nivel del mar, forma parte de la región andina central del Perú, como se observa en la Figura 4.1, ubicada en América del Sur. Al sur y al este del Océano Pacífico. Asimismo, dentro de la Amazonía peruana se consideraron los datos obtenidos para los estados de Amazonas y Acre, donde se consideraron 6 estaciones de monitoreo (T2 a T5).



*La investigación, su esencia y arte.*

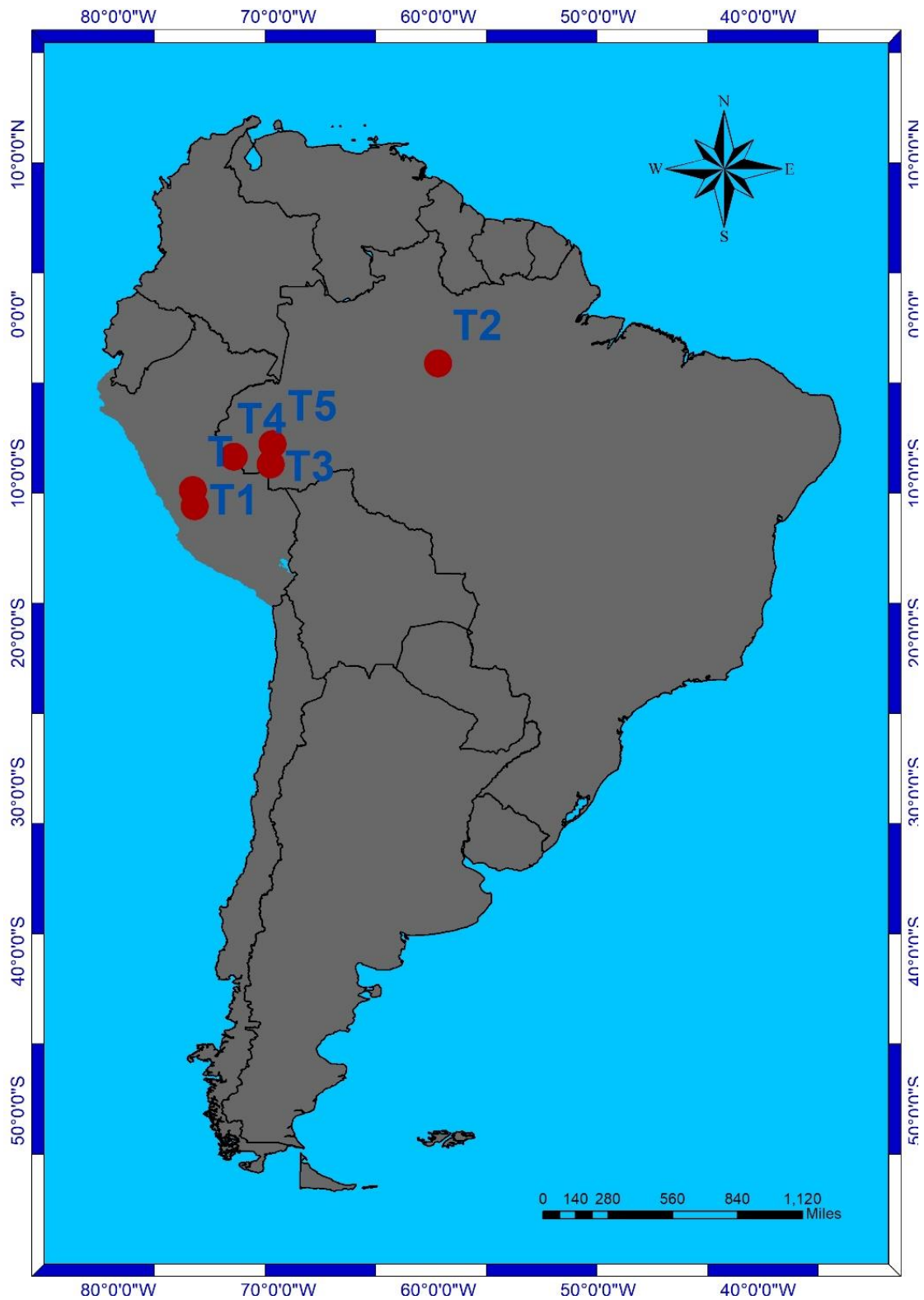


Fig. 4.1 Ubicación de las estaciones de monitoreo

Tabla 4.1. Mediciones de material particulado

Institution	Start date	End date	Nomenclature	Coordinates
Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa	9/09/2021	15/11/2021	T	-11.05;-75.33
Universidad Nacional del Centro del Perú	06/04/2020	15/11/2021	T1	-12.05; -75.22
UEA	05/03/2020- 01/01/2021	17/09/2021 -15/11/2021	T2	-3.09; -60.02
MPAC	01/01/2020	15/11/2021	T3	-9.43; -70.49
	01/01/2020	31/12/2020	T4	-8.94;-72.7
	01/01/2020	15/11/2021	T5	-8.17; -70.35

*La investigación, su esencia y arte.*

## Purple Air PA-II

El sensor PurpleAir (PA-II) (Fig. 4.2) es un contador óptico de partículas en el aire. En él se realizan recuentos para la medición de concentraciones máxicas de PM1.0 PM2.5 y PM10 en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . El monitor PA-II y su versión PA-II-SD (PurpleAir LLC, Draper, UT, EE.UU.) incorporan un par de sensores láser de contador óptico de partículas (OPC) PMS5003 (Plantower Ltd., Pekín, China), junto con un sensor de temperatura, humedad relativa y presión barométrica (BME 280, Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen, Alemania), ambos conectados a un microcontrolador equipado con un módulo de comunicación de red inalámbrica. El dispositivo registra y transmite los datos a través de Wi-Fi a una plataforma basada en la nube, desde donde pueden descargarse con una resolución de 2 min. (Ardon-Dryer et al., 2020; Sayahi et al., 2019)

Fig. 4.2 Sensor purpleair



*La*



## Modelo Hysplit

Hysplit es un servicio de laboratorio de recursos atmosféricos desarrollado por la NOAA, y es uno de los más utilizados para realizar cálculos de trayectoria atmosférica y dispersión de contaminantes en el aire. La Trayectoria Integrada Lagrangiana de Partícula Única Híbrida (HYSPLIT) es un sistema de modelado con amplias capacidades computacionales que van desde trayectorias simples hasta simulaciones complejas de dispersión y deposición usando modelos parametrizados según (B. Chen et al., 2012)

## Sistema de previsión global (GFS)

Además, el GFS es un modelo de previsión meteorológica generado por los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP). El conjunto de datos del GFS contiene diversas variables atmosféricas y del suelo, desde la concentración de ozono atmosférico y la humedad del suelo hasta las precipitaciones, los vientos y las temperaturas (Flores-Rojas et al., 2021)

## Trayectorias de los vientos

En la región andina central (noroeste de Perú), el alto relieve no contribuye a la ocurrencia de patrones de viento que favorezcan el ascenso de los aerosoles. Una región que llama la atención en este sentido es precisamente la que comprende el suroeste de Brasil, que tiene poca elevación y está rodeada de bosque. Las simulaciones con el modelo Hysplit usando la trayectoria inversa, como referencia, indicaron constantemente la región del suroeste de Brasil como la fuente de las masas de aire que fueron transportadas al departamento de Junin (figura 4.3).

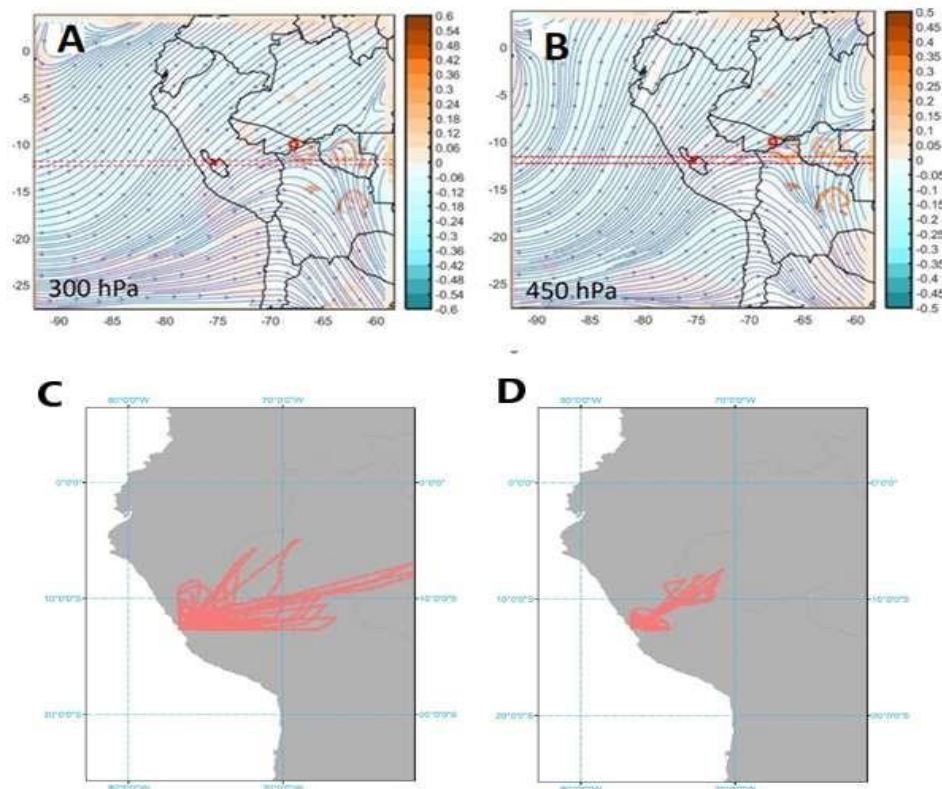


Fig. 4.3 Composiciones de las líneas de corriente del viento (m s<sup>-1</sup>) y de las velocidades verticales medias (Pa s<sup>-1</sup>) para el evento del 17 de enero de 2018 a las 18 UTC (13 LT) para los niveles altos: (A) 300 hPa, niveles medios: (B) 450 hPa (Flores Rojas, 2021). Trayectorias calculadas para 2019. Febrero (C) y junio (D).

En la figura 4.4, se muestra la variación espacial del material particulado, donde se observan valores máximos de PM<sub>1</sub>, PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub> para la época seca

y húmeda en el departamento de Junín, donde se presenta la hipótesis de que uno de los factores es el transporte transfronterizo de material particulado como se observa en la figura 4.3 en los diferentes niveles de altitud.

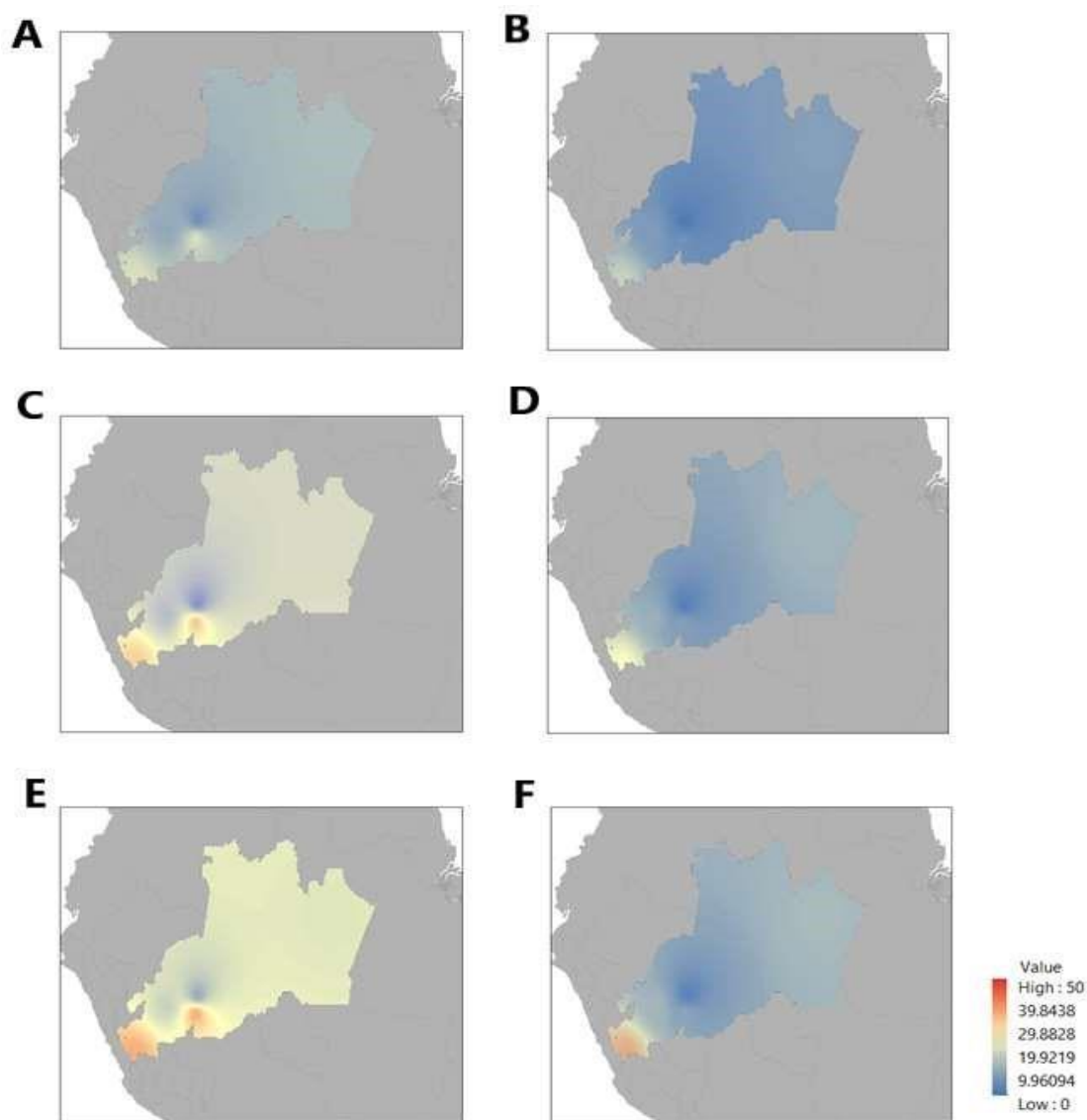


Fig. 4.4. Variación espacial del material particulado a 1 µm en la A. estación seca, B. húmeda; para PM2.5 en la C. estación seca, D. húmeda y para PM10 en la E. estación seca y F. húmeda.

### Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Nacional Intercultural de la Selva Central Juan Santos Atahualpa y al portal de Purpleair por los datos publicados por las instituciones de Brasil y Perú.

## CAPÍTULO 5

# CALIDAD DE AIRE POR MATERIAL PARTICULADO EN HUANCAYO

### Materiales y métodos

#### Purple Air PA-II

El sensor PurpleAir (PA-II) es un contador óptico de partículas de bajo coste para concentraciones máxicas de PM1.0, PM2.5 y PM10 en aire en  $\mu\text{g m}^{-3}$ , que incorpora un par de sensores láser de contador óptico de partículas (OPC) (Plantower Ltd. , Beijing, China), junto con un sensor de temperatura, humedad relativa y presión barométrica, conectado a un microcontrolador equipado con un módulo de comunicación de red inalámbrica. El dispositivo registra y transmite datos a través de Wi-Fi a una plataforma basada en la nube (Ardon-Dryer et al. 2020; Sayahi et al. 2019)

*La investigación, su esencia y arte.*

#### Espectrometro Grimm 1.109

El espectrómetro de aerosoles de polvo y los monitores de polvo modelo 1.109 son dispositivos portátiles compactos que han sido construidos para la medición continua de partículas en el aire, así como para medir la distribución del recuento de partículas. Poseen un filtro gravimétrico integrado en el que se recogen todas las partículas después de la medición óptica y, por lo tanto, quedan disponibles para su posterior análisis. Esta “tecnología dual” es única y está patentada por Grimm Aerosol Technik y realiza mediciones a 15 tamaños de partículas 0.3, 0.4, 0.5, 0.65, 0.8, 1.0, 1.6, 2, 3, 4, 5, 7.5, 10, 15, 20.

#### Índice de calidad de aire

Para estandarizar y simplificar la evaluación de la calidad del aire, el cálculo del índice de calidad del aire (AQI) fue para cada contaminante, según la ecuación 1 (Beringui et al., 2021). Dependiendo del índice obtenido, la puntuación de la calidad del aire puede clasificarse como buena, regular, mala, muy pobre, o terrible.



$$AQI = I_{ini} + \frac{I_{fin} - I_{ini}}{C_{fin} - C_{ini}} * (C - C_{ini}) \quad (5.1)$$

Donde,  $I_{ini}$  es un valor que corresponde a la concentración inicial del rango,  $I_{fin}$  es un valor que corresponde a la concentración final del rango,  $C_{ini}$  es la concentración inicial del rango en el que se mide la concentración,  $C_{fin}$  es la concentración final del rango en el que se encuentra la concentración medida y  $C$  es la concentración de contaminante medida (Beringui et al., 2021, 2022).

Los otros rangos de AQI representan diferentes niveles de efectos en la salud asociados con aumento de la contaminación. Los AQI diarios se calcularon en base a la concentración promedio de 24 horas de material particulado, los rangos de valores AQI relacionados con la calidad del aire se pueden clasificar en cinco clases como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 5.1

Rango del índice de calidad del aire (AQI) y clasificación del aire según los valores indexados

Clases	Rango	Clasificación de aire	Identificación color
I	0-40	Bueno	Verde
II	41-81	Moderado	Amarillo
III	81-120	Malo	Naranja
IV	121-200	Muy malo	Rojo
V	201-400	terrible	morado

## Resultados

### Distribución de tamaños de partículas

La Fig. 5.1 muestra los valores promedio de la distribución del tamaño del volumen de aerosoles de marzo-2024. La distribución tiene un carácter bimodal con ligero predominio de la moda gruesa. La moda fina está centrado, en promedio, en un radio igual a  $2.5 \mu\text{m}$ , mientras que la moda gruesa (partículas grandes) está centrado en un radio de  $3 \mu\text{m}$ .

Los valores promedio mensuales de la distribución volumen-tamaño de los aerosoles se muestran en la Fig. 5.1A. Asimismo en la figura 5.1B, C y D indica la distribución de número, área y volumen de partículas respecto al logaritmo de diámetro de partículas donde muestra valores máximos de 800 partículas/ $\mu\text{m}$ ,  $10000 \text{ cm}^2/\mu\text{m}$ ,  $4700 \text{ cm}^3/\mu\text{m}$  respectivamente

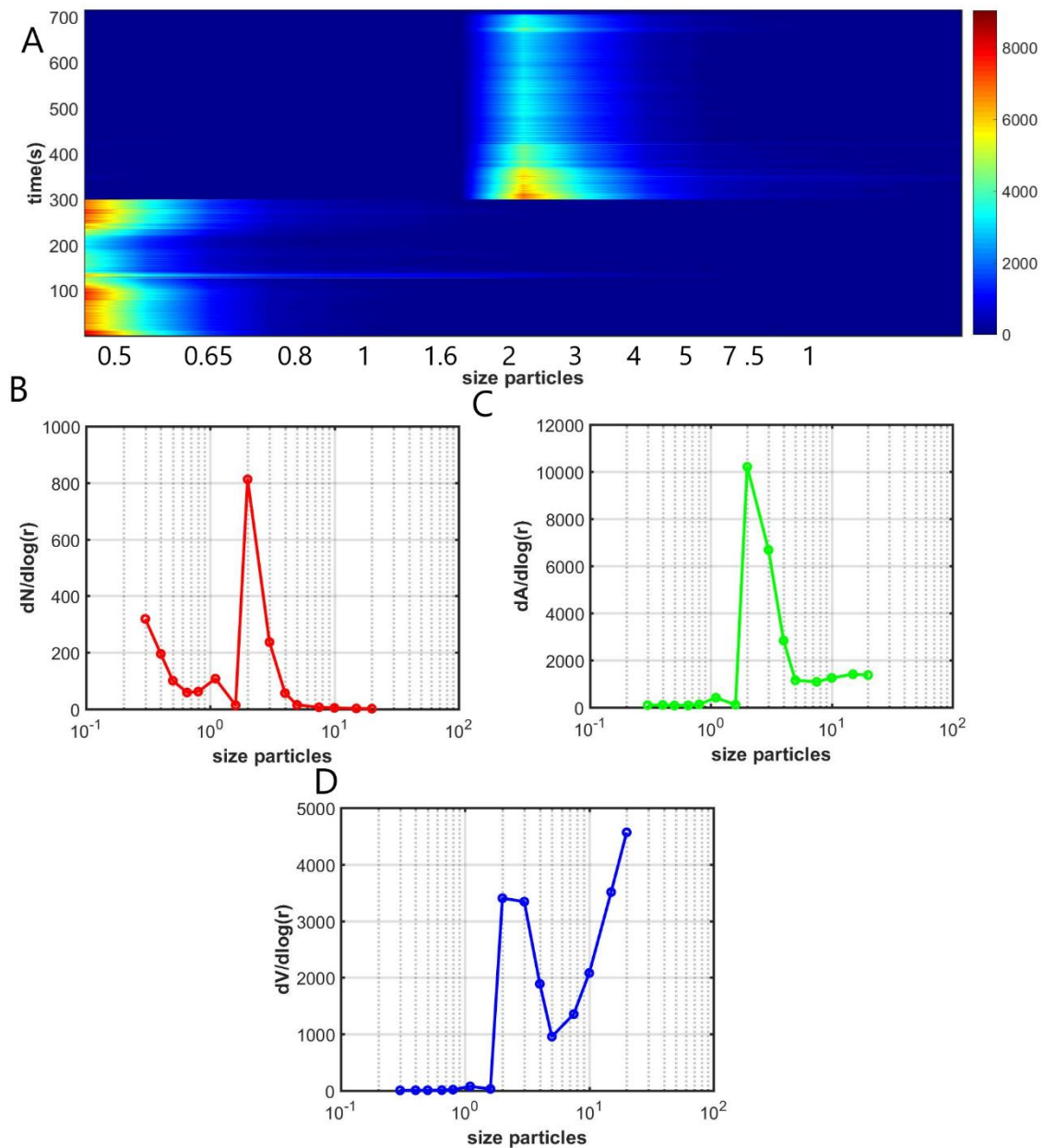


Fig. 5.1 A. Distribucion de cantidad de particulas, B.  $dN/d\log(r)$ , C.  $dA/d\log(r)$ , D.  $dV/d\log(r)$ .

Se calculó el Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM<sub>2.5</sub> y PM<sub>10</sub>, durante febrero-marzo de 2024. El ICA para PM<sub>2.5</sub> presentó valor superior a 40, lo que clasifica como “bueno” al 37% y al 8% muy insalubre del tiempo (Figura 5.2). El ICA a PM<sub>10</sub> también se calificó como “bueno” en la mayoría de los días del período evaluado. En unos pocos días aleatorios, la calidad del aire fue clasificada como “moderada”.

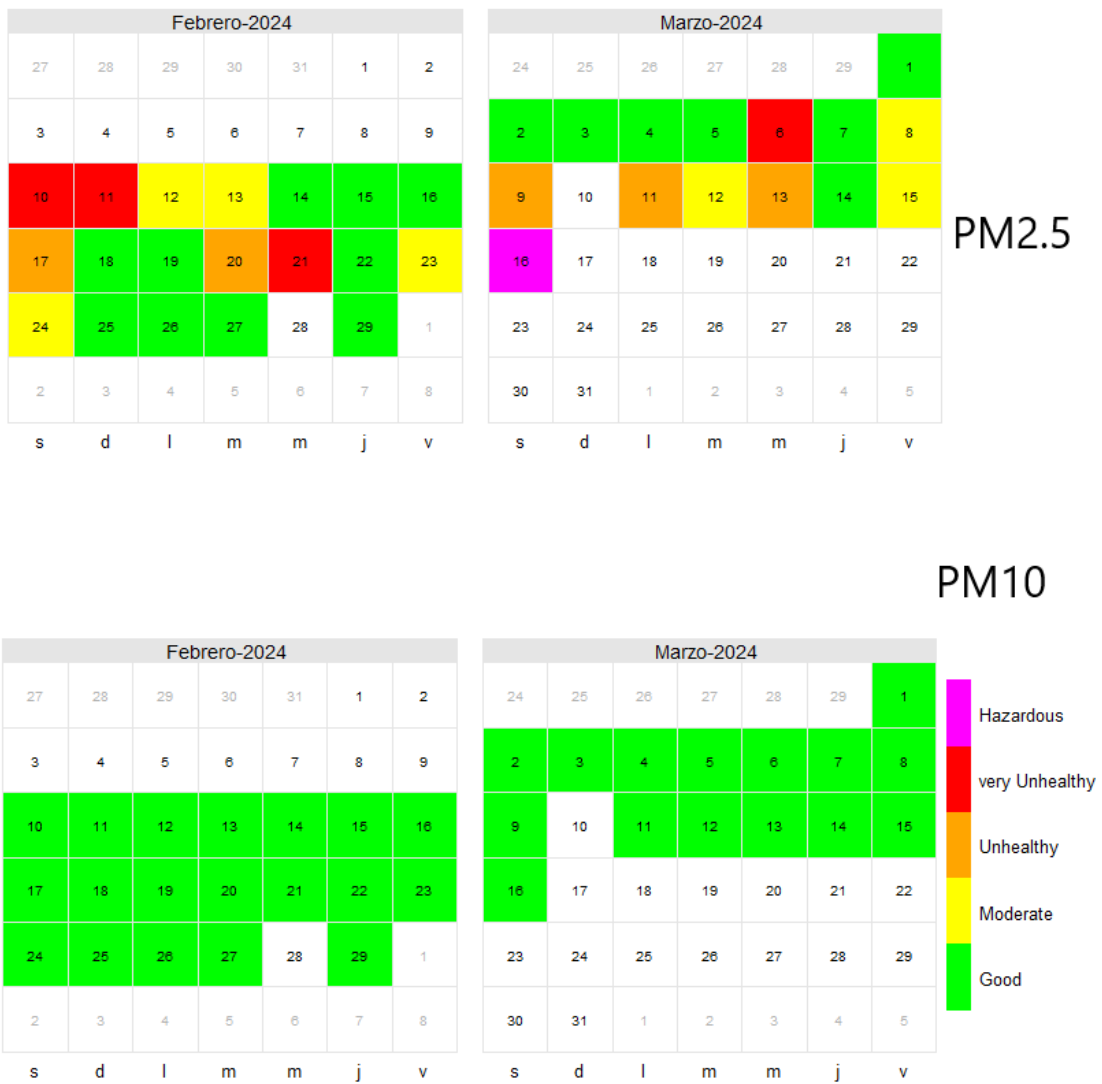


Fig. 5.2 Calidad de aire durante febrero y marzo de 2024

## Referencias

- [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., & (eds.). (2021). IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. In *Cambridge University Press. In Press*.
- Adetona, O., Li, Z., Sjödin, A., Romanoff, L. C., Aguilar-Villalobos, M., Needham, L. L., Hall, D. B., Cassidy, B. E., & Naeher, L. P. (2013). Biomonitoring of polycyclic aromatic hydrocarbon exposure in pregnant women in Trujillo, Peru - Comparison of different fuel types used for cooking. *Environment International*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.11.010>
- Alam, K., Trautmann, T., & Blaschke, T. (2011). Aerosol optical properties and radiative forcing over mega-city Karachi. *Atmospheric Research*, 101(3). <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.05.007>
- Ångström, A. (1929). On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air. *Geografiska Annaler*, 11(2). <https://doi.org/10.1080/20014422.1929.11880498>
- Ardon-Dryer, K., Dryer, Y., Williams, J. N., & Moghimi, N. (2020). Measurements of PM<sub>2.5</sub> with PurpleAir under atmospheric conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*. <https://doi.org/10.5194/amt-13-5441-2020>
- Astete, J., Gastañaga, M. del C., & Pérez, D. (2014). Niveles de metales pesados en el ambiente y su exposición en la población luego de cinco años de exploración minera en Las Bambas, Perú 2010. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 31(4). <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2014.314.120>
- Bodhaine, B. A., Wood, N. B., Dutton, E. G., & Slusser, J. R. (1999). On Rayleigh optical depth calculations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(11 PART 2). [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<1854:orodc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<1854:orodc>2.0.co;2)
- Boiyo, R., Kumar, K. R., Zhao, T., & Guo, J. (2019). A 10-Year Record of Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Over Three Environmentally Distinct AERONET Sites in Kenya, East Africa. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(3). <https://doi.org/10.1029/2018JD029461>
- Bollasina, M. A., Ming, Y., & Ramaswamy, V. (2011). Anthropogenic aerosols and the weakening of the south asian summer monsoon. *Science*, 334(6055). <https://doi.org/10.1126/science.1204994>
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., ... Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(11). <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>

- Castro, T., Madronich, S., Rivale, S., Muhlia, A., & Mar, B. (2001). The influence of aerosols on photochemical smog in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 35(10). [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00449-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00449-0)
- Charlson, R. J., Schwartz, S. E., Hales, J. M., Cess, R. D., Coakley, J. A., Hansen, J. E., & Hofmann, D. J. (1992). Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.255.5043.423>
- Che, H., Qi, B., Zhao, H., Xia, X., Eck, T. F., Goloub, P., Dubovik, O., Estelles, V., Cuevas-Agulló, E., Blarel, L., Wu, Y., Zhu, J., Du, R., Wang, Y., Wang, H., Gui, K., Yu, J., Zheng, Y., Sun, T., ... Zhang, X. (2018). Aerosol optical properties and direct radiative forcing based on measurements from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET) in eastern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.5194/acp-18-405-2018>
- Chen, B., Stein, A. F., Castell, N., de la Rosa, J. D., Sanchez de la Campa, A. M., Gonzalez-Castanedo, Y., & Draxler, R. R. (2012). Modeling and surface observations of arsenic dispersion from a large Cu-smelter in southwestern Europe. *Atmospheric Environment*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.12.014>
- Chen, H., Gu, X., Cheng, T., Yu, T., & Li, Z. (2013). Characteristics of aerosol types over China. *Yaogan Xuebao/Journal of Remote Sensing*, 17(6). <https://doi.org/10.11834/jrs.20133028>
- Chýlek, P., Videen, G., Geldart, D. J. W., Dobbie, J. S., & Tso, H. C. W. (2000). Effective Medium approximations for Heterogeneous Particles. In *Light Scattering by Nonspherical Particles*. <https://doi.org/10.1016/b978-012498660-2/50036-7>
- Commodore, A. A., Hartinger, S. M., Lanata, C. F., Mäusezahl, D., Gil, A. I., Hall, D. B., Aguilar-Villalobos, M., & Naeher, L. P. (2013). A pilot study characterizing real time exposures to particulate matter and carbon monoxide from cookstove related woodsmoke in rural Peru. *Atmospheric Environment*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.047>
- De La Cruz, A. H., Roca, Y. B., Suarez-Salas, L., Pomalaya, J., Tolentino, D. A., & Gioda, A. (2019). Chemical characterization of PM 2.5 at rural and urban sites around the metropolitan area of Huancayo (Central Andes of Peru). *Atmosphere*. <https://doi.org/10.3390/atmos10010021>
- Deep, A., Pandey, C. P., Nandan, H., Singh, N., Yadav, G., Joshi, P. C., Purohit, K. D., & Bhatt, S. C. (2021). Aerosols optical depth and Ångström exponent over different regions in Garhwal Himalaya, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09048-4>
- Dubovik, O., Holben, B. N., Lapyonok, T., Sinyuk, A., Mishchenko, M. I., Yang, P., & Slutsker, I. (2002). Non-spherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids. *Geophysical Research Letters*, 29(10). <https://doi.org/10.1029/2001gl014506>
- Dubovik, O., Smirnov, A., Holben, B. N., King, M. D., Kaufman, Y. J., Eck, T. F., & Slutsker, I. (2000). Accuracy assessments of aerosol optical properties

- retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(D8). <https://doi.org/10.1029/2000JD900040>
- Dubovik, Oleg, Holben, B., Eck, T. F., Smirnov, A., Kaufman, Y. J., King, M. D., Tanré, D., & Slutsker, I. (2002). Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(3). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059%3C0590%3AVOAAOP%3E2.0.C](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059%3C0590%3AVOAAOP%3E2.0.C)
- Dubovik, Oleg, & 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). <https://doi.org/10.1029/2000JD900282>
- Eck, T. F., Holben, B. N., Reid, J. S., Dubovik, O., Smirnov, A., O'Neill, N. T., Slutsker, I., & Kinne, S. (1999). Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(D24). <https://doi.org/10.1029/1999JD900923>
- Eck, T. F., Holben, B. N., Reid, J. S., O'Neill, N. T., Schafer, J. S., Dubovik, O., Smirnov, A., Yamasoe, M. A., & Artaxo, P. (2003). High aerosol optical depth biomass burning events: A comparison of optical properties for different source regions. *Geophysical Research Letters*, 30(20). <https://doi.org/10.1029/2003GL017861>
- Estevan, R., Martínez-Castro, D., Suarez-Salas, L., Moya, A., & Silva, Y. (2019). First two and a half years of aerosol measurements with an AERONET sunphotometer at the Huancayo Observatory, Peru. *Atmospheric Environment: X*. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100037>
- Fitzgerald, C., Aguilar-Villalobos, M., Eppler, A. R., Dorner, S. C., Rathbun, S. L., & Naeher, L. P. (2012). Testing the effectiveness of two improved cookstove interventions in the Santiago de Chuco Province of Peru. *Science of the Total Environment*, 420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.10.059>
- Flores-Rojas, J. L., Moya-Álvarez, A. S., Valdivia-Prado, J. M., Piñas-Laura, M., Kumar, S., Karam, H. A., Villalobos-Puma, E., Martínez-Castro, D., & Silva, Y. (2021). On the dynamic mechanisms of intense rainfall events in the central Andes of Peru, Mantaro valley. *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105188>
- Gadhavi, H., & Jayaraman, A. (2010). Absorbing aerosols: Contribution of biomass burning and implications for radiative forcing. *Annales Geophysicae*, 28(1). <https://doi.org/10.5194/angeo-28-103-2010>
- Giles, D. M., Holben, B. N., Eck, T. F., Sinyuk, A., Smirnov, A., Slutsker, I., Dickerson, R. R., Thompson, A. M., & Schafer, J. S. (2012). An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(17). <https://doi.org/10.1029/2012JD018127>
- Gonzales, G. F., Zevallos, A., Gonzales-Castañeda, C., Nuñez, D., Gastañaga, C.,

- Cabezas, C., Naeher, L., Levy, K., & Steenlan, K. (2014). Contaminación ambiental, variabilidad climática y cambio climático: una revisión del impacto en la salud de la población peruana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 31(3). <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2014.313.94>
- Han, X., Aguilar-Villalobos, M., Allen, J., Carlton, C. S., Robinson, R., Bayer, C., & Naeher, L. P. (2005). Traffic-related occupational exposures to PM<sub>2.5</sub>, CO, and VOCs in Trujillo, Peru. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 11(3). <https://doi.org/10.1179/oeh.2005.11.3.276>
- Haywood, J. M., & Shine, K. P. (1995). The effect of anthropogenic sulfate and soot aerosol on the clear sky planetary radiation budget. *Geophysical Research Letters*, 22(5). <https://doi.org/10.1029/95GL00075>
- Hernández-Vásquez, A., & Díaz-Seijas, D. (2017). Contaminación ambiental y repositorios de datos históricos de contaminantes atmosféricos en Perú. In *Salud Publica de Mexico* (Vol. 59, Issue 5). <https://doi.org/10.21149/8476>
- Hochgatterer, K., Moshhammer, H., & Haluza, D. (2013). Dust is in the air: Effects of occupational exposure to mineral dust on lung function in a 9-year study. *Lung*, 191(3). <https://doi.org/10.1007/s00408-013-9463-7>
- Holben, B. N., Tanré, D., Smirnov, A., Eck, T. F., Slutsker, I., Abuhassan, N., Newcomb, W. W., Schafer, J. S., Chatenet, B., Lavenu, F., Kaufman, Y. J., Vande Castle, J., Setzer, A., Markham, B., Clark, D., Frouin, R., Halthore, R., Karneli, A., O'Neill, N. T., ... Zibordi, G. (2001). An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106(D11). <https://doi.org/10.1029/2001JD900014>
- Jacobson, M. Z. (2000). A physically-based treatment of elemental carbon optics: Implications for global direct forcing of aerosols. *Geophysical Research Letters*, 27(2). <https://doi.org/10.1029/1999GL010968>
- Kim, S. W., Yoon, S. C., Kim, J., & Kim, S. Y. (2007). Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/sky radiometer measurements. *Atmospheric Environment*, 41(8). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.044>
- Kiran Kumar, T., Gadhavi, H., Jayaraman, A., Sai Suman, M. N., & Vijaya Bhaskara Rao, S. (2013). Temporal and spatial variability of aerosol optical depth over South India as inferred from MODIS. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.12.010>
- Levelt, P. F., Hilsenrath, E., Leppelmeier, G. W., Van Den Oord, G. H. J., Bhartia, P. K., Tamminen, J., De Haan, J. F., & Veefkind, J. P. (2006). Science objectives of the ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872336>
- Li, Z., Commodore, A., Hartinger, S., Lewin, M., Sjödin, A., Pittman, E., Trinidad, D., Hubbard, K., Lanata, C. F., Gil, A. I., Mäusezahl, D., & Naeher, L. P.

- (2016). Biomonitoring Human Exposure to Household Air Pollution and Association with Self-reported Health Symptoms – A Stove Intervention Study in Peru. *Environment International*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.09.011>
- Liou, K. N. (2002). An Introduction to Atmospheric Radiation (Google eBook). In *International Geophysics* (Vol. 84).
- Lizarraga-Isla, I. J., Pomalaya-Valdez, J. E., Suarez-Salas, L. F., & Bendezu-Roca, Y. (2019). Dispersion of particulate material 2.5 emitted by roasted chicken restaurants using the aermol model in huancayo metropolitan, peru. *DYNA (Colombia)*, 86(211). <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n211.78812>
- Loaiza, I., Hurtado, D., Miglio, M., Orrego, H., & Mendo, J. (2015). Tissue-specific Cd and Pb accumulation in Peruvian scallop (*Argopecten purpuratus*) transplanted to a suspended and bottom culture at Sechura Bay, Peru. *Marine Pollution Bulletin*, 91(2). <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.09.058>
- Middleton, N., Yiallourous, P., Kleanthous, S., Kolokotroni, O., Schwartz, J., Dockery, D. W., Demokritou, P., & Koutrakis, P. (2008). A 10-year time-series analysis of respiratory and cardiovascular morbidity in Nicosia, Cyprus: The effect of short-term changes in air pollution and dust storms. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 7. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-7-39>
- Morales-Ancajima, V. C., Tapia, V., Vu, B. N., Liu, Y., Alarcón-Yaquetto, D. E., & Gonzales, G. F. (2019). Increased Outdoor PM<sub>2.5</sub> Concentration Is Associated with Moderate/Severe Anemia in Children Aged 6-59 Months in Lima, Peru. *Journal of Environmental and Public Health*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6127845>
- Mukherjee, T., & Vinoj, V. (2020). Atmospheric aerosol optical depth and its variability over an urban location in Eastern India. *Natural Hazards*, 102(2). <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03636-x>
- Ordoñez-Aquino, C., & Sánchez-Ccoyllo, O. (2017). Caracterización química - morfológica del PM<sub>2.5</sub> en Lima Metropolitana mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). *Acta Nova*, 8.
- Otero, L. A., Fochesatto, G. J., Ristori, P. R., Flamant, P. H., Piacentini, R. D., Holben, B., & Quel, E. J. (2004). Simple method to derive aerosol microphysical properties from AERONET multiwavelength direct solar measurements. *Advances in Space Research*, 34(10 SPEC. ISS.). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.07.059>
- 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 Aerosol Optical Thickness at ten AERONET-NASA stations during 2002. In *www.sedoptica.es Opt. Pura Apl* (Vol. 39, Issue 4). [www.sedoptica.es](http://www.sedoptica.es).
- Pacsi Valdivia, S., & Llanos Puga, C. M. (2017). Evaluación de la composición química del material particulado PM<sub>2.5</sub> en la Universidad Nacional Agraria



- La Molina. *Anales Científicos*, 78(2). <https://doi.org/10.21704/ac.v78i2.1058>
- Pearce, J. L., Rathbun, S. L., Aguilar-Villalobos, M., & Naeher, L. P. (2009). Characterizing the spatiotemporal variability of PM<sub>2.5</sub> in Cusco, Peru using kriging with external drift. *Atmospheric Environment*, 43(12). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.060>
- Pokharel, M., Guang, J., Liu, B., Kang, S., Ma, Y., Holben, B. N., Xia, X., Xin, J., Ram, K., Rupakheti, D., Wan, X., Wu, G., Bhattarai, H., Zhao, C., & Cong, Z. (2019). Aerosol Properties Over Tibetan Plateau From a Decade of AERONET Measurements: Baseline, Types, and Influencing Factors. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(23). <https://doi.org/10.1029/2019JD031293>
- Ramachandran, S. (2018). Atmospheric aerosols: Characteristics and radiative effects. In *Atmospheric Aerosols: Characteristics and Radiative Effects*. <https://doi.org/10.1201/9781315152400>
- Reátegui-Romero, W., Sánchez-Ccoyllo, O. R., Andrade, M. de F., & Moya-Alvarez, A. (2018). PM<sub>2.5</sub> Estimation with the WRF/Chem Model, Produced by Vehicular Flow in the Lima Metropolitan Area. *Open Journal of Air Pollution*, 07(03). <https://doi.org/10.4236/ojap.2018.73011>
- Regmi, J., Poudyal, K. N., Pokhrel, A., Gyawali, M., Tripathi, L., Panday, A., Barinelli, A., & Aryal, R. (2020). Investigation of aerosol climatology and long-range transport of aerosols over Pokhara, Nepal. *Atmosphere*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/ATMOS11080874>
- Remer, L. A., & Kaufman, Y. J. (1998). Dynamic aerosol model: Urban/industrial aerosol. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 103(D12). <https://doi.org/10.1029/98JD00994>
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C., & Sowle, D. (1998). SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10). [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<2101:SARATS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2101:SARATS>2.0.CO;2)
- Rojas, F. J., Pacsi, S., Sánchez-Ccoyllo, O. R., & Perales, M. M. (2019). Pronóstico de Reducción de Emisiones, de Enfermos y de Gastos Asociados al incluir el Gas Natural dentro de la Matriz Energética en Perú. *Información Tecnológica*, 30(3). <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000300117>
- Romero, Y., Chicchon, N., Duarte, F., Noel, J., Ratti, C., & Nyhan, M. (2020). Quantifying and spatial disaggregation of air pollution emissions from ground transportation in a developing country context: Case study for the Lima Metropolitan Area in Peru. *Science of the Total Environment*, 698. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134313>
- Russell, P. B., Bergstrom, R. W., Shinozuka, Y., Clarke, A. D., Decarlo, P. F., Jimenez, J. L., Livingston, J. M., Redemann, J., Dubovik, O., & Strawa, A. (2010). Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(3). <https://doi.org/10.5194/acp-10-1155-2010>

- Sánchez-Ccoyllo, O. R., Ordoñez-Aquino, C. G., Muñoz, Á. G., Llacza, A., Andrade, M. F., Liu, Y., Reátegui-Romero, W., & Brasseur, G. (2018). Modeling Study of the Particulate Matter in Lima with the WRF-Chem Model: Case Study of April 2016. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(11). <https://doi.org/10.37622/ijaer/13.11.2018.10129-10141>
- Sayahi, T., Kaufman, D., Becnel, T., Kaur, K., Butterfield, A. E., Collingwood, S., Zhang, Y., Gaillardon, P. E., & Kelly, K. E. (2019). Development of a calibration chamber to evaluate the performance of low-cost particulate matter sensors. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113131>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). *Atmospheric Chemistry and Physics. Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(1).
- Shifrin, K. S. (1995). Simple relationships for the Ångström parameter of disperse systems. *Applied Optics*, 34(21). <https://doi.org/10.1364/ao.34.004480>
- Shin, S. K., Tesche, M., Noh, Y., & Müller, D. (2019). Aerosol-type classification based on AERONET version 3 inversion products. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(7). <https://doi.org/10.5194/amt-12-3789-2019>
- Silva, J., Rojas, J., Norabuena, M., Molina, C., Toro, R. A., & Leiva-Guzmán, M. A. (2017). Particulate matter levels in a South American megacity: the metropolitan area of Lima-Callao, Peru. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6327-2>
- Sinyuk, A., Dubovik, O., Holben, B., Eck, T. F., Breon, F. M., Martonchik, J., Kahn, R., Diner, D. J., Vermote, E. F., Roger, J. C., Lapyonok, T., & Slutsker, I. (2007). Simultaneous retrieval of aerosol and surface properties from a combination of AERONET and satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 107(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.022>
- Srivastava, A. K., Singh, S., Tiwari, S., & Bisht, D. S. (2012). Contribution of anthropogenic aerosols in direct radiative forcing and atmospheric heating rate over Delhi in the Indo-Gangetic Basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(4). <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0633-y>
- Stone, R., Anderson, G., Andrews, E., Dutton, E., Harris, J., Shettle, E., & Berk, A. (2005). Asian dust signatures at Barrow: Observed and simulated. Incursions and impact of Asian dust over Northern Alaska. *2005 IEEE Workshop on Remote Sensing of Atmospheric Aerosols*. <https://doi.org/10.1109/AERSOL.2005.1494152>
- Stone, R. S., Anderson, G. P., Andrews, E., Dutton, E. G., Shettle, E. P., & Berk, A. (2007). Incursions and radiative impact of Asian dust in northern Alaska. *Geophysical Research Letters*, 34(14). <https://doi.org/10.1029/2007GL029878>
- Suárez-Salas, L., Álvarez Tolentino, D., Bendejú, Y., & Pomalaya, J. (2017). CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO DEL CENTRO URBANO DE HUANCAYO, PERÚ. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v83i2.197>
- Suazo, J. M. A., Salas, L. S., Cruz, A. R. H. D. La, Vasquez, R. A., Aylas, G. R.,

- Condor, A. R., Rojas, E. R., Ccuro, F. M., Rojas, J. L. F., & Karam, H. A. (2020). Direct radiative forcing due to aerosol properties at the peruvian antarctic station and metropolitan huancayo area. *Anuario Do Instituto de Geociencias*. [https://doi.org/10.11137/2020\\_4\\_404\\_412](https://doi.org/10.11137/2020_4_404_412)
- Suazo, M. J. A., Condor, A. G. R., Aylas, G. Y. R., Rojas, L. J. F., Vasquez, R. A., Suazo, N. A., & Karam, H. A. (2020). Estimación de la Turbidez Atmosférica Usando el Modelo IQC en el Área Metropolitana de Huancayo – Perú. *Anuario Do Instituto de Geociencias*, 43(3), 72–83. [https://doi.org/10.11137/2020\\_3\\_72\\_83](https://doi.org/10.11137/2020_3_72_83)
- Tapia, V., Carbajal, L., Vásquez, V., Espinoza, R., Vásquez-Velásquez, C., Steenland, K., & Gonzales, G. F. (2018). Reordenamiento vehicular y contaminación ambiental por material particulado (2,5 y 10), dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en Lima Metropolitana, Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2). <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3250>
- Thomason, L. W., Herman, B. M., & Reagan, J. A. (1983). The effect of atmospheric attenuators with structured vertical distributions on air mass determinations and Langley plot analyses. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(7). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040<1851:TEOAAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<1851:TEOAAW>2.0.CO;2)
- Tohidi, R., Sajadi, B., & Ahmadi, G. (2020). The effect of nasal airway obstruction on the dispersion and deposition of inhaled volatile droplets in the human nasal cavity: A numerical study. *Journal of Aerosol Science*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105650>
- Tomasi, C., Vitale, V., Lupi, A., Di Carmine, C., Campanelli, M., Herber, A., Treffeisen, R., Stone, R. S., Andrews, E., Sharma, S., Radionov, V., von Hoyningen-Huene, W., Stebel, K., Hansen, G. H., Myhre, C. L., Wehrli, C., Aaltonen, V., Lihavainen, H., Virkkula, A., ... Yamanouchi, T. (2007). Aerosols in polar regions: A historical overview based on optical depth and in situ observations. In *Journal of Geophysical Research Atmospheres* (Vol. 112, Issue 16). <https://doi.org/10.1029/2007JD008432>
- Wang, H. Bin, Zhang, Z. W., Zhang, L., Wu, H., Zhou, L. Y., & Zu, F. (2015). Identify the size of aerosol particles and analyze its characteristic at three AERONET sites in China. *Zhongguo Huanjing Kexue/China Environmental Science*, 35(4).
- Wang, Y., Fan, S., & Feng, X. (2007). Retrieval of the aerosol particle size distribution function by incorporating a priori information. *Journal of Aerosol Science*, 38(8). <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.06.005>
- Whitby, K. T. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmospheric Environment* (1967), 12(1–3). [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(78\)90196-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(78)90196-8)
- Wiscombe, W. J. (1980). Improved Mie scattering algorithms. *Applied Optics*, 19(9). <https://doi.org/10.1364/ao.19.001505>
- Wu, H., Wang, T., Wang, Q., Cao, Y., Qu, Y., & Nie, D. (2021). Radiative effects and chemical compositions of fine particles modulating urban heat island in

- Nanjing, China. *Atmospheric Environment*.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118201>
- Xia, X., Che, H., Zhu, J., Chen, H., Cong, Z., Deng, X., Fan, X., Fu, Y., Goloub, P., Jiang, H., Liu, Q., Mai, B., Wang, P., Wu, Y., Zhang, J., Zhang, R., & Zhang, X. (2016). Ground-based remote sensing of aerosol climatology in China: Aerosol optical properties, direct radiative effect and its parameterization. *Atmospheric Environment*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.071>
- Xia, Xiangao, Chen, H., Goloub, P., Zhang, W., Chatenet, B., & Wang, P. (2007). A compilation of aerosol optical properties and calculation of direct radiative forcing over an urban region in northern China. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(12). <https://doi.org/10.1029/2006JD008119>
- Xia, Xiangao, Li, Z., Holben, B., Wang, P., Eck, T., Chen, H., Cribb, M., & Zhao, Y. (2007). Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze Delta region of China. *Journal of Geophysical Research*, 112(D22). <https://doi.org/10.1029/2007jd008859>
- Yamasoe, M. A., Kaufman, Y. J., Dubovik, O., Remer, L. A., Holben, B. N., & Artaxo, P. (1998). Retrieval of the real part of the refractive index of smoke particles from Sun/sky measurements during SCAR-B. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 103(D24). <https://doi.org/10.1029/98JD01211>
- Yamasoe, M. A., Von Randow, C., Manzi, A. O., Schafer, J. S., Eck, T. F., & Holben, B. N. (2006). Effect of smoke and clouds on the transmissivity of photosynthetically active radiation inside the canopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.5194/acp-6-1645-2006>
- Yang, Y., Zhao, C., Wang, Y., Zhao, X., Sun, W., Yang, J., Ma, Z., & Fan, H. (2021). Multi-Source Data Based Investigation of Aerosol-Cloud Interaction Over the North China Plain and North of the Yangtze Plain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(19). <https://doi.org/10.1029/2021JD035609>
- Zhao, C., Qiu, Y., Dong, X., Wang, Z., Peng, Y., Li, B., Wu, Z., & Wang, Y. (2018). Negative Aerosol-Cloud re Relationship From Aircraft Observations Over Hebei, China. *Earth and Space Science*, 5(1). <https://doi.org/10.1002/2017EA000346>
- [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., Caud, N., Chen, Y., Goldfarb, L., Gomis, M. I., Huang, M., Leitzell, K., Lonnoy, E., Matthews, J. B. R., Maycock, T. K., Waterfield, T., Yelekçi, O., Yu, R., Zhou, B., & (eds.). (2021). IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. In *Cambridge University Press. In Press*.
- Adetona, O., Li, Z., Sjödin, A., Romanoff, L. C., Aguilar-Villalobos, M., Needham, L. L., Hall, D. B., Cassidy, B. E., & Naeher, L. P. (2013). Biomonitoring of polycyclic aromatic hydrocarbon exposure in pregnant women in Trujillo, Peru - Comparison of different fuel types used for cooking. *Environment International*, 53. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2012.11.010>
- Alam, K., Trautmann, T., & Blaschke, T. (2011). Aerosol optical properties and

- radiative forcing over mega-city Karachi. *Atmospheric Research*, 101(3).  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.05.007>
- Ångström, A. (1929). On the Atmospheric Transmission of Sun Radiation and on Dust in the Air. *Geografiska Annaler*, 11(2).  
<https://doi.org/10.1080/20014422.1929.11880498>
- Ardon-Dryer, K., Dryer, Y., Williams, J. N., & Moghimi, N. (2020). Measurements of PM<sub>2.5</sub> with PurpleAir under atmospheric conditions. *Atmospheric Measurement Techniques*. <https://doi.org/10.5194/amt-13-5441-2020>
- Astete, J., Gastañaga, M. del C., & Pérez, D. (2014). Niveles de metales pesados en el ambiente y su exposición en la población luego de cinco años de exploración minera en Las Bambas, Perú 2010. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 31(4).  
<https://doi.org/10.17843/rpmesp.2014.314.120>
- Bodhaine, B. A., Wood, N. B., Dutton, E. G., & Slusser, J. R. (1999). On Rayleigh optical depth calculations. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(11 PART 2). [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1999\)016<1854:orodc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1999)016<1854:orodc>2.0.co;2)
- Boiyo, R., Kumar, K. R., Zhao, T., & Guo, J. (2019). A 10-Year Record of Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing Over Three Environmentally Distinct AERONET Sites in Kenya, East Africa. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(3). <https://doi.org/10.1029/2018JD029461>
- Bollasina, M. A., Ming, Y., & Ramaswamy, V. (2011). Anthropogenic aerosols and the weakening of the south asian summer monsoon. *Science*, 334(6055).  
<https://doi.org/10.1126/science.1204994>
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., ... Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 118(11). <https://doi.org/10.1002/jgrd.50171>
- Castro, T., Madronich, S., Rivale, S., Muhlia, A., & Mar, B. (2001). The influence of aerosols on photochemical smog in Mexico City. *Atmospheric Environment*, 35(10). [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00449-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00449-0)
- Charlson, R. J., Schwartz, S. E., Hales, J. M., Cess, R. D., Coakley, J. A., Hansen, J. E., & Hofmann, D. J. (1992). Climate forcing by anthropogenic aerosols. *Science*. <https://doi.org/10.1126/science.255.5043.423>
- Che, H., Qi, B., Zhao, H., Xia, X., Eck, T. F., Goloub, P., Dubovik, O., Estelles, V., Cuevas-Agulló, E., Blarel, L., Wu, Y., Zhu, J., Du, R., Wang, Y., Wang, H., Gui, K., Yu, J., Zheng, Y., Sun, T., ... Zhang, X. (2018). Aerosol optical properties and direct radiative forcing based on measurements from the China Aerosol Remote Sensing Network (CARSNET) in eastern China. *Atmospheric Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.5194/acp-18-405-2018>
- Chen, B., Stein, A. F., Castell, N., de la Rosa, J. D., Sanchez de la Campa, A. M.,

- Gonzalez-Castanedo, Y., & Draxler, R. R. (2012). Modeling and surface observations of arsenic dispersion from a large Cu-smelter in southwestern Europe. *Atmospheric Environment*, 49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.12.014>
- Chen, H., Gu, X., Cheng, T., Yu, T., & Li, Z. (2013). Characteristics of aerosol types over China. *Yaogan Xuebao/Journal of Remote Sensing*, 17(6). <https://doi.org/10.11834/jrs.20133028>
- Chýlek, P., Videen, G., Geldart, D. J. W., Dobbie, J. S., & Tso, H. C. W. (2000). Effective Medium approximations for Heterogeneous Particles. In *Light Scattering by Nonspherical Particles*. <https://doi.org/10.1016/b978-012498660-2/50036-7>
- Commodore, A. A., Hartinger, S. M., Lanata, C. F., Mäusezahl, D., Gil, A. I., Hall, D. B., Aguilar-Villalobos, M., & Naeher, L. P. (2013). A pilot study characterizing real time exposures to particulate matter and carbon monoxide from cookstove related woodsmoke in rural Peru. *Atmospheric Environment*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.06.047>
- De La Cruz, A. H., Roca, Y. B., Suarez-Salas, L., Pomalaya, J., Tolentino, D. A., & Gioda, A. (2019). Chemical characterization of PM 2.5 at rural and urban sites around the metropolitan area of Huancayo (Central Andes of Peru). *Atmosphere*. <https://doi.org/10.3390/atmos10010021>
- Deep, A., Pandey, C. P., Nandan, H., Singh, N., Yadav, G., Joshi, P. C., Purohit, K. D., & Bhatt, S. C. (2021). Aerosols optical depth and Ångström exponent over different regions in Garhwal Himalaya, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(6). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09048-4>
- Dubovik, O., Holben, B. N., Lapyonok, T., Sinyuk, A., Mishchenko, M. I., Yang, P., & Slutsker, I. (2002). Non-spherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids. *Geophysical Research Letters*, 29(10). <https://doi.org/10.1029/2001gl014506>
- Dubovik, O., Smirnov, A., Holben, B. N., King, M. D., Kaufman, Y. J., Eck, T. F., & Slutsker, I. (2000). Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from Aerosol Robotic Network (AERONET) Sun and sky radiance measurements. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(D8). <https://doi.org/10.1029/2000JD900040>
- Dubovik, Oleg, Holben, B., Eck, T. F., Smirnov, A., Kaufman, Y. J., King, M. D., Tanré, D., & Slutsker, I. (2002). Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 59(3). [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2002\)059%3C0590%3AVOAAOP%3E2.0.C](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2002)059%3C0590%3AVOAAOP%3E2.0.C)
- Dubovik, Oleg, & 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). <https://doi.org/10.1029/2000JD900282>
- Eck, T. F., Holben, B. N., Reid, J. S., Dubovik, O., Smirnov, A., O'Neill, N. T.,

- Slutsker, I., & Kinne, S. (1999). Wavelength dependence of the optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 104(D24). <https://doi.org/10.1029/1999JD900923>
- Eck, T. F., Holben, B. N., Reid, J. S., O'Neill, N. T., Schafer, J. S., Dubovik, O., Smirnov, A., Yamasoe, M. A., & Artaxo, P. (2003). High aerosol optical depth biomass burning events: A comparison of optical properties for different source regions. *Geophysical Research Letters*, 30(20). <https://doi.org/10.1029/2003GL017861>
- Estevan, R., Martínez-Castro, D., Suarez-Salas, L., Moya, A., & Silva, Y. (2019). First two and a half years of aerosol measurements with an AERONET sunphotometer at the Huancayo Observatory, Peru. *Atmospheric Environment: X*. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100037>
- Fitzgerald, C., Aguilar-Villalobos, M., Eppler, A. R., Dorner, S. C., Rathbun, S. L., & Naeher, L. P. (2012). Testing the effectiveness of two improved cookstove interventions in the Santiago de Chuco Province of Peru. *Science of the Total Environment*, 420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.10.059>
- Flores-Rojas, J. L., Moya-Álvarez, A. S., Valdivia-Prado, J. M., Piñas-Laura, M., Kumar, S., Karam, H. A., Villalobos-Puma, E., Martínez-Castro, D., & Silva, Y. (2021). On the dynamic mechanisms of intense rainfall events in the central Andes of Peru, Mantaro valley. *Atmospheric Research*. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105188>
- Gadhavi, H., & Jayaraman, A. (2010). Absorbing aerosols: Contribution of biomass burning and implications for radiative forcing. *Annales Geophysicae*, 28(1). <https://doi.org/10.5194/angeo-28-103-2010>
- Giles, D. M., Holben, B. N., Eck, T. F., Sinyuk, A., Smirnov, A., Slutsker, I., Dickerson, R. R., Thompson, A. M., & Schafer, J. S. (2012). An analysis of AERONET aerosol absorption properties and classifications representative of aerosol source regions. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 117(17). <https://doi.org/10.1029/2012JD018127>
- Gonzales, G. F., Zevallos, A., Gonzales-Castañeda, C., Nuñez, D., Gastañaga, C., Cabezas, C., Naeher, L., Levy, K., & Steenlan, K. (2014). Contaminación ambiental, variabilidad climática y cambio climático: una revisión del impacto en la salud de la población peruana. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 31(3). <https://doi.org/10.17843/rpmesp.2014.313.94>
- Han, X., Aguilar-Villalobos, M., Allen, J., Carlton, C. S., Robinson, R., Bayer, C., & Naeher, L. P. (2005). Traffic-related occupational exposures to PM<sub>2.5</sub>, CO, and VOCs in Trujillo, Peru. *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 11(3). <https://doi.org/10.1179/oeh.2005.11.3.276>
- Haywood, J. M., & Shine, K. P. (1995). The effect of anthropogenic sulfate and soot aerosol on the clear sky planetary radiation budget. *Geophysical Research Letters*, 22(5). <https://doi.org/10.1029/95GL00075>
- Hernández-Vásquez, A., & Díaz-Seijas, D. (2017). Contaminación ambiental y

- repositorios de datos históricos de contaminantes atmosféricos en Perú. In *Salud Publica de Mexico* (Vol. 59, Issue 5). <https://doi.org/10.21149/8476>
- Hochgatterer, K., Moshhammer, H., & Haluza, D. (2013). Dust is in the air: Effects of occupational exposure to mineral dust on lung function in a 9-year study. *Lung*, 191(3). <https://doi.org/10.1007/s00408-013-9463-7>
- Holben, B. N., Tanré, D., Smirnov, A., Eck, T. F., Slutsker, I., Abuhassan, N., Newcomb, W. W., Schafer, J. S., Chatenet, B., Lavenu, F., Kaufman, Y. J., Vande Castle, J., Setzer, A., Markham, B., Clark, D., Frouin, R., Halthore, R., Karneli, A., O'Neill, N. T., ... Zibordi, G. (2001). An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol optical depth from AERONET. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 106(D11). <https://doi.org/10.1029/2001JD900014>
- Jacobson, M. Z. (2000). A physically-based treatment of elemental carbon optics: Implications for global direct forcing of aerosols. *Geophysical Research Letters*, 27(2). <https://doi.org/10.1029/1999GL010968>
- Kim, S. W., Yoon, S. C., Kim, J., & Kim, S. Y. (2007). Seasonal and monthly variations of columnar aerosol optical properties over east Asia determined from multi-year MODIS, LIDAR, and AERONET Sun/sky radiometer measurements. *Atmospheric Environment*, 41(8). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.10.044>
- Kiran Kumar, T., Gadhavi, H., Jayaraman, A., Sai Suman, M. N., & Vijaya Bhaskara Rao, S. (2013). Temporal and spatial variability of aerosol optical depth over South India as inferred from MODIS. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 94. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2012.12.010>
- Levelt, P. F., Hilsenrath, E., Leppelmeier, G. W., Van Den Oord, G. H. J., Bhartia, P. K., Tamminen, J., De Haan, J. F., & Veefkind, J. P. (2006). Science objectives of the ozone monitoring instrument. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.872336>
- Li, Z., Commodore, A., Hartinger, S., Lewin, M., Sjödin, A., Pittman, E., Trinidad, D., Hubbard, K., Lanata, C. F., Gil, A. I., Mäusezahl, D., & Naeher, L. P. (2016). Biomonitoring Human Exposure to Household Air Pollution and Association with Self-reported Health Symptoms – A Stove Intervention Study in Peru. *Environment International*, 97. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.09.011>
- Liou, K. N. (2002). An Introduction to Atmospheric Radiation (Google eBook). In *International Geophysics* (Vol. 84).
- Lizarraga-Isla, I. J., Pomalaya-Valdez, J. E., Suarez-Salas, L. F., & Bendezu-Roca, Y. (2019). Dispersion of particulate material 2.5 emitted by roasted chicken restaurants using the aermod model in huancayo metropolitan, peru. *DYNA (Colombia)*, 86(211). <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n211.78812>
- Loaiza, I., Hurtado, D., Miglio, M., Orrego, H., & Mendo, J. (2015). Tissue-specific Cd and Pb accumulation in Peruvian scallop (*Argopecten purpuratus*) transplanted to a suspended and bottom culture at Sechura Bay, Peru.



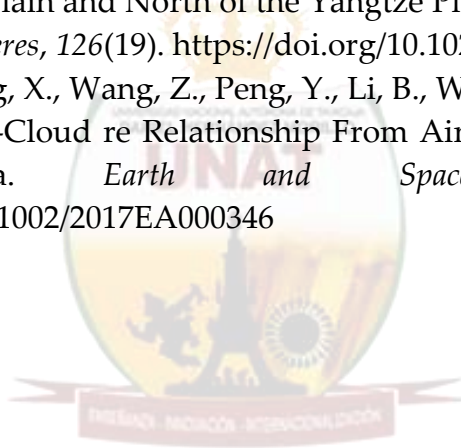
- Marine Pollution Bulletin*, 91(2).  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.09.058>
- Middleton, N., Yiallourous, P., Kleanthous, S., Kolokotroni, O., Schwartz, J., Dockery, D. W., Demokritou, P., & Koutrakis, P. (2008). A 10-year time-series analysis of respiratory and cardiovascular morbidity in Nicosia, Cyprus: The effect of short-term changes in air pollution and dust storms. *Environmental Health: A Global Access Science Source*, 7. <https://doi.org/10.1186/1476-069X-7-39>
- Morales-Ancajima, V. C., Tapia, V., Vu, B. N., Liu, Y., Alarcón-Yaquetto, D. E., & Gonzales, G. F. (2019). Increased Outdoor PM<sub>2.5</sub> Concentration Is Associated with Moderate/Severe Anemia in Children Aged 6-59 Months in Lima, Peru. *Journal of Environmental and Public Health*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6127845>
- Mukherjee, T., & Vinoj, V. (2020). Atmospheric aerosol optical depth and its variability over an urban location in Eastern India. *Natural Hazards*, 102(2). <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03636-x>
- Ordoñez-Aquino, C., & Sánchez-Ccoyllo, O. (2017). Caracterización química - morfológica del PM<sub>2.5</sub> en Lima Metropolitana mediante microscopía electrónica de barrido (MEB). *Acta Nova*, 8.
- Otero, L. A., Fochesatto, G. J., Ristori, P. R., Flamant, P. H., Piacentini, R. D., Holben, B., & Quel, E. J. (2004). Simple method to derive aerosol microphysical properties from AERONET multiwavelength direct solar measurements. *Advances in Space Research*, 34(10 SPEC. ISS.). <https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.07.059>
- 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 Aerosol Optical Thickness at ten AERONET-NASA stations during 2002. In *www.sedoptica.es Opt. Pura Apl* (Vol. 39, Issue 4). [www.sedoptica.es](http://www.sedoptica.es)
- Pacsi Valdivia, S., & Llanos Puga, C. M. (2017). Evaluación de la composición química del material particulado PM<sub>2.5</sub> en la Universidad Nacional Agraria La Molina. *Anales Científicos*, 78(2). <https://doi.org/10.21704/ac.v78i2.1058>
- Pearce, J. L., Rathbun, S. L., Aguilar-Villalobos, M., & Naeher, L. P. (2009). Characterizing the spatiotemporal variability of PM<sub>2.5</sub> in Cusco, Peru using kriging with external drift. *Atmospheric Environment*, 43(12). <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.10.060>
- Pokharel, M., Guang, J., Liu, B., Kang, S., Ma, Y., Holben, B. N., Xia, X., Xin, J., Ram, K., Rupakheti, D., Wan, X., Wu, G., Bhattarai, H., Zhao, C., & Cong, Z. (2019). Aerosol Properties Over Tibetan Plateau From a Decade of AERONET Measurements: Baseline, Types, and Influencing Factors. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(23). <https://doi.org/10.1029/2019JD031293>
- Ramachandran, S. (2018). Atmospheric aerosols: Characteristics and radiative effects. In *Atmospheric Aerosols: Characteristics and Radiative Effects*.

- <https://doi.org/10.1201/9781315152400>
- Reátegui-Romero, W., Sánchez-Ccoyllo, O. R., Andrade, M. de F., & Moya-Alvarez, A. (2018). PM<sub>2.5</sub> Estimation with the WRF/Chem Model, Produced by Vehicular Flow in the Lima Metropolitan Area. *Open Journal of Air Pollution*, 07(03). <https://doi.org/10.4236/ojap.2018.73011>
- Regmi, J., Poudyal, K. N., Pokhrel, A., Gyawali, M., Tripathee, L., Panday, A., Barinelli, A., & Aryal, R. (2020). Investigation of aerosol climatology and long-range transport of aerosols over Pokhara, Nepal. *Atmosphere*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/ATMOS11080874>
- Remer, L. A., & Kaufman, Y. J. (1998). Dynamic aerosol model: Urban/industrial aerosol. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 103(D12). <https://doi.org/10.1029/98JD00994>
- Ricchiazzi, P., Yang, S., Gautier, C., & Sowle, D. (1998). SBDART: A Research and Teaching Software Tool for Plane-Parallel Radiative Transfer in the Earth's Atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(10). [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1998\)079<2101:SARATS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1998)079<2101:SARATS>2.0.CO;2)
- Rojas, F. J., Pacsi, S., Sánchez-Ccoyllo, O. R., & Perales, M. M. (2019). Pronóstico de Reducción de Emisiones, de Enfermos y de Gastos Asociados al incluir el Gas Natural dentro de la Matriz Energética en Perú. *Información Tecnológica*, 30(3). <https://doi.org/10.4067/s0718-07642019000300117>
- Romero, Y., Chicchon, N., Duarte, F., Noel, J., Ratti, C., & Nyhan, M. (2020). Quantifying and spatial disaggregation of air pollution emissions from ground transportation in a developing country context: Case study for the Lima Metropolitan Area in Peru. *Science of the Total Environment*, 698. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134313>
- Russell, P. B., Bergstrom, R. W., Shinozuka, Y., Clarke, A. D., Decarlo, P. F., Jimenez, J. L., Livingston, J. M., Redemann, J., Dubovik, O., & Strawa, A. (2010). Absorption Angstrom Exponent in AERONET and related data as an indicator of aerosol composition. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(3). <https://doi.org/10.5194/acp-10-1155-2010>
- Sánchez-Ccoyllo, O. R., Ordoñez-Aquino, C. G., Muñoz, Á. G., Llacza, A., Andrade, M. F., Liu, Y., Reátegui-Romero, W., & Basseur, G. (2018). Modeling Study of the Particulate Matter in Lima with the WRF-Chem Model: Case Study of April 2016. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(11). <https://doi.org/10.37622/ijaer/13.11.2018.10129-10141>
- Sayahi, T., Kaufman, D., Becnel, T., Kaur, K., Butterfield, A. E., Collingwood, S., Zhang, Y., Gaillardon, P. E., & Kelly, K. E. (2019). Development of a calibration chamber to evaluate the performance of low-cost particulate matter sensors. *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113131>
- Seinfeld, J. H., & Pandis, S. N. (2006). Atmospheric Chemistry and Physics. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5(1).
- Shifrin, K. S. (1995). Simple relationships for the Ångström parameter of disperse

- systems. *Applied Optics*, 34(21). <https://doi.org/10.1364/ao.34.004480>
- Shin, S. K., Tesche, M., Noh, Y., & Müller, D. (2019). Aerosol-type classification based on AERONET version 3 inversion products. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(7). <https://doi.org/10.5194/amt-12-3789-2019>
- Silva, J., Rojas, J., Norabuena, M., Molina, C., Toro, R. A., & Leiva-Guzmán, M. A. (2017). Particulate matter levels in a South American megacity: the metropolitan area of Lima-Callao, Peru. *Environmental Monitoring and Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6327-2>
- Sinyuk, A., Dubovik, O., Holben, B., Eck, T. F., Breon, F. M., Martonchik, J., Kahn, R., Diner, D. J., Vermote, E. F., Roger, J. C., Lapyonok, T., & Slutsker, I. (2007). Simultaneous retrieval of aerosol and surface properties from a combination of AERONET and satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 107(1–2). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.07.022>
- Srivastava, A. K., Singh, S., Tiwari, S., & Bisht, D. S. (2012). Contribution of anthropogenic aerosols in direct radiative forcing and atmospheric heating rate over Delhi in the Indo-Gangetic Basin. *Environmental Science and Pollution Research*, 19(4). <https://doi.org/10.1007/s11356-011-0633-y>
- Stone, R., Anderson, G., Andrews, E., Dutton, E., Harris, J., Shettle, E., & Berk, A. (2005). Asian dust signatures at Barrow: Observed and simulated. Incursions and impact of Asian dust over Northern Alaska. *2005 IEEE Workshop on Remote Sensing of Atmospheric Aerosols*. <https://doi.org/10.1109/AERSOL.2005.1494152>
- Stone, R. S., Anderson, G. P., Andrews, E., Dutton, E. G., Shettle, E. P., & Berk, A. (2007). Incursions and radiative impact of Asian dust in northern Alaska. *Geophysical Research Letters*, 34(14). <https://doi.org/10.1029/2007GL029878>
- Suárez-Salas, L., Álvarez Tolentino, D., Bendejú, Y., & Pomalaya, J. (2017). CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL PARTICULADO ATMOSFÉRICO DEL CENTRO URBANO DE HUANCAYO, PERÚ. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*. <https://doi.org/10.37761/rsqp.v83i2.197>
- Suazo, J. M. A., Salas, L. S., Cruz, A. R. H. D. La, Vasquez, R. A., Aylas, G. R., Condor, A. R., Rojas, E. R., Ccuro, F. M., Rojas, J. L. F., & Karam, H. A. (2020). Direct radiative forcing due to aerosol properties at the peruvian antarctic station and metropolitan huancayo area. *Anuario Do Instituto de Geociencias*. [https://doi.org/10.11137/2020\\_4\\_404\\_412](https://doi.org/10.11137/2020_4_404_412)
- Suazo, M. J. A., Condor, A. G. R., Aylas, G. Y. R., Rojas, L. J. F., Vasquez, R. A., Suazo, N. A., & Karam, H. A. (2020). Estimación de la Turbidez Atmosférica Usando el Modelo IQC en el Área Metropolitana de Huancayo – Perú. *Anuario Do Instituto de Geociencias*, 43(3), 72–83. [https://doi.org/10.11137/2020\\_3\\_72\\_83](https://doi.org/10.11137/2020_3_72_83)
- Tapia, V., Carbajal, L., Vásquez, V., Espinoza, R., Vásquez-Velásquez, C., Steenland, K., & Gonzales, G. F. (2018). Reordenamiento vehicular y contaminación ambiental por material particulado (2,5 y 10), dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en Lima Metropolitana, Perú. *Revista Peruana*

- de Medicina Experimental y Salud Pública*, 35(2).  
<https://doi.org/10.17843/rpmesp.2018.352.3250>
- Thomason, L. W., Herman, B. M., & Reagan, J. A. (1983). The effect of atmospheric attenuators with structured vertical distributions on air mass determinations and Langley plot analyses. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 40(7).  
[https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1983\)040<1851:TEOAAW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1983)040<1851:TEOAAW>2.0.CO;2)
- Tohidi, R., Sajadi, B., & Ahmadi, G. (2020). The effect of nasal airway obstruction on the dispersion and deposition of inhaled volatile droplets in the human nasal cavity: A numerical study. *Journal of Aerosol Science*, 150.  
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105650>
- Tomasi, C., Vitale, V., Lupi, A., Di Carmine, C., Campanelli, M., Herber, A., Treffeisen, R., Stone, R. S., Andrews, E., Sharma, S., Radionov, V., von Hoyningen-Huene, W., Stebel, K., Hansen, G. H., Myhre, C. L., Wehrli, C., Aaltonen, V., Lihavainen, H., Virkkula, A., ... Yamanouchi, T. (2007). Aerosols in polar regions: A historical overview based on optical depth and in situ observations. In *Journal of Geophysical Research Atmospheres* (Vol. 112, Issue 16).  
<https://doi.org/10.1029/2007JD008432>
- Wang, H. Bin, Zhang, Z. W., Zhang, L., Wu, H., Zhou, L. Y., & Zu, F. (2015). Identify the size of aerosol particles and analyze its characteristic at three AERONET sites in China. *Zhongguo Huanjing Kexue/China Environmental Science*, 35(4).
- Wang, Y., Fan, S., & Feng, X. (2007). Retrieval of the aerosol particle size distribution function by incorporating a priori information. *Journal of Aerosol Science*, 38(8).  
<https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2007.06.005>
- Whitby, K. T. (1978). The physical characteristics of sulfur aerosols. *Atmospheric Environment* (1967), 12(1-3).  
[https://doi.org/10.1016/0004-6981\(78\)90196-8](https://doi.org/10.1016/0004-6981(78)90196-8)
- Wiscombe, W. J. (1980). Improved Mie scattering algorithms. *Applied Optics*, 19(9).  
<https://doi.org/10.1364/ao.19.001505>
- Wu, H., Wang, T., Wang, Q., Cao, Y., Qu, Y., & Nie, D. (2021). Radiative effects and chemical compositions of fine particles modulating urban heat island in Nanjing, China. *Atmospheric Environment*.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118201>
- Xia, X., Che, H., Zhu, J., Chen, H., Cong, Z., Deng, X., Fan, X., Fu, Y., Goloub, P., Jiang, H., Liu, Q., Mai, B., Wang, P., Wu, Y., Zhang, J., Zhang, R., & Zhang, X. (2016). Ground-based remote sensing of aerosol climatology in China: Aerosol optical properties, direct radiative effect and its parameterization. *Atmospheric Environment*, 124.  
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.071>
- Xia, Xiangao, Chen, H., Goloub, P., Zhang, W., Chatenet, B., & Wang, P. (2007). A compilation of aerosol optical properties and calculation of direct radiative forcing over an urban region in northern China. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 112(12).  
<https://doi.org/10.1029/2006JD008119>
- Xia, Xiangao, Li, Z., Holben, B., Wang, P., Eck, T., Chen, H., Cribb, M., & Zhao,

- Y. (2007). Aerosol optical properties and radiative effects in the Yangtze Delta region of China. *Journal of Geophysical Research*, 112(D22). <https://doi.org/10.1029/2007jd008859>
- Yamasoe, M. A., Kaufman, Y. J., Dubovik, O., Remer, L. A., Holben, B. N., & Artaxo, P. (1998). Retrieval of the real part of the refractive index of smoke particles from Sun/sky measurements during SCAR-B. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 103(D24). <https://doi.org/10.1029/98JD01211>
- Yamasoe, M. A., Von Randow, C., Manzi, A. O., Schafer, J. S., Eck, T. F., & Holben, B. N. (2006). Effect of smoke and clouds on the transmissivity of photosynthetically active radiation inside the canopy. *Atmospheric Chemistry and Physics*. <https://doi.org/10.5194/acp-6-1645-2006>
- Yang, Y., Zhao, C., Wang, Y., Zhao, X., Sun, W., Yang, J., Ma, Z., & Fan, H. (2021). Multi-Source Data Based Investigation of Aerosol-Cloud Interaction Over the North China Plain and North of the Yangtze Plain. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126(19). <https://doi.org/10.1029/2021JD035609>
- Zhao, C., Qiu, Y., Dong, X., Wang, Z., Peng, Y., Li, B., Wu, Z., & Wang, Y. (2018). Negative Aerosol-Cloud re Relationship From Aircraft Observations Over Hebei, China. *Earth and Space Science*, 5(1). <https://doi.org/10.1002/2017EA000346>



*La investigación, su esencia y arte.*

**AEROSOLES ATMOSFÉRICOS EN EL  
CONTEXTO DE  
CAMBIO CLIMÁTICO**

Roberto Angeles Vasquez

Julio Angeles Suazo

Carmencita Lavado Meza

Gloria Maria Lopez Yupanqui

Luis Suarez Salas

**Hugo Abi Karam**

**Fondo Editorial - UNAT**