



Universidad  
Continental

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de  
Ingeniería Ambiental

**Influencia del transporte de concentración  
de Pm10 en el espesor óptico de aerosoles  
de la ciudad de Huancayo en el año  
2015-2016**

**Patricia Evelin, Calderón Mateo**

Huancayo, 2018

Tesis para optar el Título Profesional de  
Ingeniera Ambiental



Repositorio Institucional Continental  
Tesis digital



Obra protegida bajo la licencia de [Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Perú](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/peru/)

**ASESOR**

Ing. Adam Ramos Cadillo

## **AGRADECIMIENTO**

Con deferencia a CONCYTEC, por el financiamiento del Proyecto “Estudio de la Variación de las Propiedades Ópticas de Aerosoles debido a las Quemadas de Vegetación para Evaluar su Influencia en el Forzamiento Radiativo Terrestre”; así mismo, al Centro de Investigación de la Universidad Continental, por la oportunidad de permitirme ser parte de este Proyecto de Investigación. De igual manera, agradezco a los investigadores y personal encargados de establecer y mantener el Fotómetro Solar CIMEL CE 318T AERONET (NASA) ubicado en el "Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR), Observatorio de Huancayo del Instituto Geofísico del Perú", cuyos datos fueron utilizados en esta investigación.

Mis caras consideraciones a los Doctores Rene Estevan Arredondo y Aldo Moya, profesionales a cargo del Proyecto, y por compartir sus conocimientos adquiridos a través de las investigaciones a lo largo de su carrera profesional. Así mismo, mi cara consideración a la Ing. Adam Yanina Ramos Cadillo, en su condición de Asesora del presente Trabajo de Investigación; por su preocupación y consejos brindados en el fin propuesto.

A mi familia, por apoyarme en cada etapa de mi vida y por ser fuente de motivación e inspiración para alcanzar mis metas. También a las personas que me apoyaron, motivaron y aconsejaron para poder realizar el presente trabajo de investigación.

## **DEDICATORIA**

A mis padres Evelin y Manuel, por el apoyo incondicional al educarme, no sólo profesionalmente, sino también con valores y virtudes que permanecerán a lo largo de mi vida.

A mi abuela Rubila, por ser la persona que me enseñó a ser quien soy, por alentarme, por confiar en mí y en lo que puedo lograr, por todo el amor y cariño brindado desde mi primer día en este mundo, hasta el último del suyo.

A mi abuelo Braulio, por estar siempre a mi lado dándome consejos en base a su experiencia.

A mi pequeña hermana Ilanit, por ser mi alegría y mi compañera en todo momento.

## ÍNDICE

PORTADA .....	i
ASESOR.....	ii
AGRADECIMIENTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
ÍNDICE .....	v
LISTA DE TABLAS.....	vii
LISTA DE ILUSTRACIONES .....	viii
LISTA DE CUADROS .....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT .....	xi
INTRODUCCIÓN.....	xii
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema .....	1
1.1.1. Planteamiento del problema.....	1
1.1.2. Formulación del problema.....	4
1.2. Objetivos.....	5
1.2.1. Objetivo general .....	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. Justificación e importancia .....	5
1.3.1. Justificación práctica .....	5
1.3.2. Justificación metodológica.....	5
1.3.3. Justificación técnica.....	6
1.4. Hipótesis y descripción de variables .....	6
1.4.1. Hipótesis .....	6
1.4.2. Variables.....	7
1.4.3. Operacionalización de variables .....	7
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Antecedentes.....	9
2.1.1. Artículos científicos.....	9
2.1.2. Tesis .....	11
2.1.3. Artículos de divulgación.....	11
2.2. Bases teóricas .....	12
2.2.1. Fundamentos teóricos .....	12
2.2.2. Fundamentos metodológicos .....	27
2.2.3. Modelo teórico de la investigación .....	36
2.3. Definición de términos básicos.....	36
CAPÍTULO III.....	39

3.1.	Método, tipo y nivel de la investigación.....	39
3.1.1.	Método general de la investigación.....	39
3.1.2.	Método específico .....	39
3.1.3.	Alcance de la investigación .....	40
3.2.	Diseño de la investigación.....	41
3.2.1.	Tipo de diseño de la investigación .....	41
3.3.	Población y muestra .....	41
3.3.1.	Población.....	41
3.3.2.	Muestra.....	42
3.4.	Técnicas de recolección y tratamiento de datos .....	42
3.4.1.	Técnicas de recolección de datos .....	42
3.4.2.	Instrumentos utilizados en la recolección de datos.....	42
3.5.	Área de estudio .....	43
3.6.	Técnicas de procesamiento de datos.....	44
3.6.1.	Procesamiento de focos de incendio mediante ACRESP.....	44
3.6.2.	Procesamiento de datos de AERONET .....	44
3.6.3.	Programa de tratamiento estadístico .....	45
3.6.4.	Modelamiento con WRF-CHEM .....	45
CAPÍTULO IV RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....		49
4.1.	Resultados.....	49
4.1.1.	Focos de quema de vegetación que generan concentración de PM10.....	49
4.1.2.	Determinar el comportamiento del espesor óptico de aerosoles del mes que registra mayor y menor emisión de PM10. ....	51
4.1.3.	Analizar la influencia del transporte de concentración de PM10 en el espesor óptico de aerosoles de la ciudad de Huancayo en el año 2015 – 2016. ....	55
4.2.	Discusión de resultados .....	62
CONCLUSIONES.....		64
RECOMENDACIONES .....		66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		67
ANEXOS.....		71

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Operacionalización de variables .....	7
Tabla 2. Términos utilizados para describir el aerosol atmosférico .....	22
Tabla 3. Clasificación de aerosoles según espesor óptico y coeficiente de Angstrom .....	24
Tabla 4 . Técnicas e instrumentos de recolección de datos. ....	42
Tabla 5. Validación de instrumentos y datos utilizados en la investigación. ....	43
Tabla 6. Principales características del dominio y datos iniciales y de frontera .....	46
Tabla 7. Esquemas de parametrización empleados .....	47
Tabla 8: Datos de AOD del mes de julio de 2015. ....	82
Tabla 10. Datos de AOD del mes de agosto de 2015 .....	83
Tabla 11. Datos de AOD del mes de agosto de 2015.....	84



## LISTA DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Erupción del volcán Pinatubo .....	2
Figura 2. Incendios forestales en Perú .....	3
Figura 3. Área afectada de la Selva Central .....	3
Figura 4. Incendio forestal en el distrito de Huancayo .....	4
Figura 5. Estaciones de AERONET en el mundo .....	28
Figura 6. Modelo teórico de la investigación .....	36
Figura 7. Delimitación espacial de focos de incendio .....	44
Figura 8. Diagrama de flujo para el sistema de modelado WRF-CHEM. ....	48
Figura 9. Focos de incendio registrados en la región de estudio. a) julio de 2015, b) agosto de 2015.....	50
Figura 10. Focos de incendios registrados en la región de estudio para el mes de enero de 2016. ....	51
Figura 11. Comportamiento de AOD en el mes de julio de 2015. ....	52
Figura 12. Comportamiento de AOD en el mes de agosto de 2015. ....	52
Figura 13. Comportamiento de AOD en el mes de enero de 2016.....	53
Figura 14. Comparación del comportamiento de espesor óptico de aerosoles de los meses julio y agosto de 2015 y enero de 2016.....	54
Figura 15. Comportamiento del AOD en un año calendario. ....	54
Figura 16. Campos de altura geopotencial medios entre los 1000 y los 850 hPa (tropósfera baja) para el período 1979 – 2013. a) julio de 2015 y b) agosto de 2015 .....	55
Figura 17. Concentraciones de PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) obtenidas con el modelo WRF-CHEM, iniciado el 24 de agosto de 2015 (plazo 54 horas de pronóstico). a) incluye emisiones producidas en Perú y fuera de este, b) incluye emisiones producidas solamente en Brasil y Bolivia, c) incluye emisiones producidas solamente en Brasil. ....	56
Figura 18. Distribución de las concentraciones medias mensuales de PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), calculadas a partir de las salidas del modelo WRF-CHEM. a) julio de 2015 y b) agosto de 2015.....	57
Figura 19. Distribución de la concentración media mensual de PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), calculadas a partir de las salidas del modelo WRF – CHEM para el mes de enero de 2016.....	58
Figura 20. Porcentaje de las clasificaciones de los diferentes tipos de aerosoles registrados por el fotómetro solar ubicado en el observatorio de Huancayo. a) julio de 2015 y b) agosto de 2015. ....	59
Figura 21. Curvas normalizadas del espesor óptico de aerosoles (línea azul) y de concentraciones de PM10 obtenidas con el modelo (línea roja) para los meses de julio de 2015 y agosto de 2015.....	60
Figura 22. Correlación entre concentración de PM10 y espesor óptico de aerosoles .....	61

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1: Descripción de la física del modelo .....	85
Cuadro 2: Configuración geográfica del área de trabajo .....	89

## RESUMEN

La investigación se centra en destacar cual es el transporte de las emisiones de PM10 generados por la quema de vegetación en el Perú y países vecinos tales como Brasil y Bolivia principalmente; y cómo influyen estas partículas en el espesor óptico de aerosoles (AOD, por sus siglas en inglés) obtenido por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo. Para ello se eligió el mes de agosto de 2015 que es un período caracterizado por ser no lluvioso, y el mes de enero de 2016, período caracterizado por ser lluvioso. De manera que, se pueda hacer una comparación entre el número de focos de incendios, emisiones producidas por los incendios y cómo afecta en el AOD obtenido por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo; en cada una de estas en los meses referidos líneas arriba. Para determinar el transporte de PM10, se realizó el modelamiento con ayuda del modelo WRF–CHEM, cuya finalidad fue la de obtener datos de concentración PM10. Con los valores obtenidos, se realizó una prueba de correlación con los datos de espesor óptico de aerosoles proporcionados por el fotómetro solar CIMEL CE – 318T ubicado en el Observatorio de Huancayo, ubicado en Huayao – distrito de Huachac, provincia de Chupaca; para verificar la calidad de los resultados obtenidos con el modelo empleado, y establecer cuan representativo son los valores proporcionados. Como resultado se obtuvo que el número de focos de incendio en el período no lluvioso (agosto de 2015) fue significativamente mayor que el número de focos del período lluvioso (enero de 2016); en consecuencia las concentraciones de PM10 del mes de agosto fueron mayores al del mes de enero. Se comprobó que nuestro territorio es afectado tanto por partículas generadas en el propio país, como por partículas provenientes de países vecinos como Brasil y Bolivia. Se demostró además que el AOD obtenido por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo es afectado por estas partículas, viéndose ello reflejado en el coeficiente de correlación de 76.8% para el mes de agosto de 2015 entre los datos de PM10 obtenidos con el modelo y los datos de AOD obtenidos por el fotómetro solar.

**Palabras clave:** aerosoles, espesor óptico de aerosoles, WRF–CHEM.

## ABSTRACT

The project of investigation is focused in highlight, which is the transport of the emissions of PM10 generated, by the biomass burning in Peru and neighboring countries such as Brazil and Bolivia principally; and how affects these particles in the aerosol optical depth (AOD, for its acronyms in English) obtained for the solar photometer of Huancayo Observatory. For this, it chose the month of August of 2015 that is a period characterized by be not rainy and, the month of January of 2016 period characterized by be rainy. So that, can do a comparison between the number of fire sources, emissions produced for fires and how affect in the aerosol optical depth at Valley of Mantaro; each one of these on the months referencing up lines. To determinate the transport of PM10, is made the modeling with help of model WRF-CHEM, which purpose was have concentration's date of PM10. With the values obtained, was a test of correlation with the values of AOD provided by the solar photometer CIMEL CE – 318T located in Huayao – district of Huachac, province of Chupaca; for verify the quality of the results obtained with the model employee, and establish, how representative are the values provided. As a result, the number of fire sources on the period not rainy (August 2015) was significantly higher than the number of fire sources in the rain season (January 2016); consequently, the concentrations of PM10 of the month of August were greater than the month of January. It was found that Peru is affected both by particles generated in the country itself, and by particles from neighboring countries such as Brazil and Bolivia. It was also demonstrated that aerosol optical depth obtained for the solar photometer of Huancayo Observatory is affected by these particles, which is reflected in the correlation coefficient of 76.8% for the month of August 2015 between PM 10 data obtained with the model and AOD data obtained by solar photometer.

**Key words:** aerosol, aerosol optical depth, WRF–CHEM.

## INTRODUCCIÓN

La quema de vegetación trae consecuencias negativas, tales como la pérdida de vegetación, pérdida de fauna, hidrofobicidad en el suelo, problemas en la salud y emisiones de gases y partículas a la atmósfera; estos últimos son la mayor fuente de contaminación atmosférica a escala continental (1). Además, generan cambios en el ciclo hidrológico, ya que uno de los efectos de los aerosoles es actuar como núcleo de condensación de nubes, este efecto se multiplica y provoca la formación de mayor cantidad de gotas más pequeñas y las nubes formadas son menos eficientes en la liberación de la precipitación, esto produce una disminución de la radiación solar que llega a la superficie y un calentamiento de la atmósfera; estos cambios inhiben la precipitación lo que conlleva a una menor eficiencia de remoción de contaminantes (2). Otro efecto de la presencia de aerosoles es la influencia que tienen en el forzamiento radiativo terrestre, pues los aerosoles tienen la capacidad de absorber o dispersar la radiación solar.

Países como Perú, Brasil y Bolivia contribuyen en gran medida a la emisión de aerosoles por la quema de biomasa que se genera en estos países. Es el caso de Brasil que cuatro de sus estados registran la mayor cantidad de focos de incendio de Sudamérica y la emisión que estos generan contribuyen a la contaminación atmosférica de países vecinos como Paraguay, Bolivia y Perú, esta afirmación nace a partir de un estudio realizado por el Instituto Nacional de investigaciones Espaciales (INPE) de Brasil (3). De igual manera, el Instituto Nacional de investigaciones Espaciales (INPE) de Brasil menciona que en la región trinacional "MAP" hubo un incremento de número de focos de incendio en el 2016 respecto de años anteriores (4).

Por los motivos expuestos, el presente trabajo se centra en investigar si la emisión de PM10 como producto de la quema de vegetación en el Perú y países vecinos es transportado hacia nuestra ciudad y de qué manera influye en el AOD obtenido por el fotómetro solar CIMEL CE-318T ubicado en el Observatorio de Huancayo. El transporte de las partículas de PM10 se realiza con ayuda del modelo WRF-CHEM, el cual realiza una modelación meteorológica y química simultáneamente lo cual representa una ventaja. Los datos de AOD se obtienen a través del fotómetro solar, instrumento que está dentro de la red AERONET el cual cuenta con más de 450 estaciones en todo el mundo con la finalidad de realizar mediciones de aerosol en superficie. Con los datos obtenidos con el modelo WRF-CHEM y el fotómetro solar se determina la correlación que existe entre ambos datos para poder arribar a las conclusiones de la investigación.

El capítulo I describe el planteamiento del problema, la formulación del problema, el cual es: ¿Qué efecto tiene la presencia de partículas PM10 provenientes de la quema de vegetación en Perú y en países vecinos, sobre el espesor óptico de aerosoles obtenido por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo? Seguido de los problemas específicos que abordan las dimensiones del problema general. También se presenta el objetivo general y objetivos específicos, la justificación, las hipótesis y descripción de las variables que incluye la operacionalización de las mismas.

El Capítulo II engloba el marco teórico de la investigación, el cual describe artículos científicos, tesis y artículos de divulgación que respaldan la presente investigación. También se describen las bases teóricas que se dividen en fundamentos teóricos de la investigación, fundamentos metodológicos y fundamentos técnicos que ayudan a comprender mejor el tema en estudio.

En el Capítulo III se describe el método y alcance de la investigación, puntualizando que el método de la investigación es deductivo-analítico. También se describe el tipo, nivel y diseño de la investigación y se detalla las técnicas de recolección de datos que incluye los instrumentos utilizados para la recolección de los mismos, así también cuál es el proceso de obtención de datos y el tratamiento de los mismos.

El Capítulo IV comprende la descripción de los resultados obtenidos después de realizar las pruebas necesarias, detallando el número de focos de incendio en el área y período de estudio, los resultados de la modelación con el WRF-CHEM, el comportamiento del AOD obtenido por el fotómetro solar del observatorio de Huancayo; también el análisis que aporta mayor información sobre el tema en estudio. Así mismo se incluye la discusión de los resultados respecto a otros trabajos.

En el Capítulo V y último se brindan las conclusiones y recomendaciones a las cuales se arribaron tras el trabajo de investigación.

# **CAPÍTULO I**

## **PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1. PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA**

#### **1.1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

A nivel mundial, las emisiones de sustancias contaminantes hacia la atmósfera se han ido incrementando con el transcurso del tiempo, por causas sociales o naturales tal es así que en la actualidad es un problema de gran importancia y preocupación por los efectos negativos que estas producen. Como el caso de la erupción del volcán Pinatubo el 15 de junio de 1991 el cual tuvo consecuencias negativas como la muerte de personas, daño a cultivos aledaños, los aerosoles de ceniza se extendieron por todo el mundo durante 12 meses, la temperatura global descendió 0.5°C en 1992 debido al efecto de absorción de radiación solar de los aerosoles en la estratósfera (5).

**Figura 1. Erupción del volcán Pinatubo**



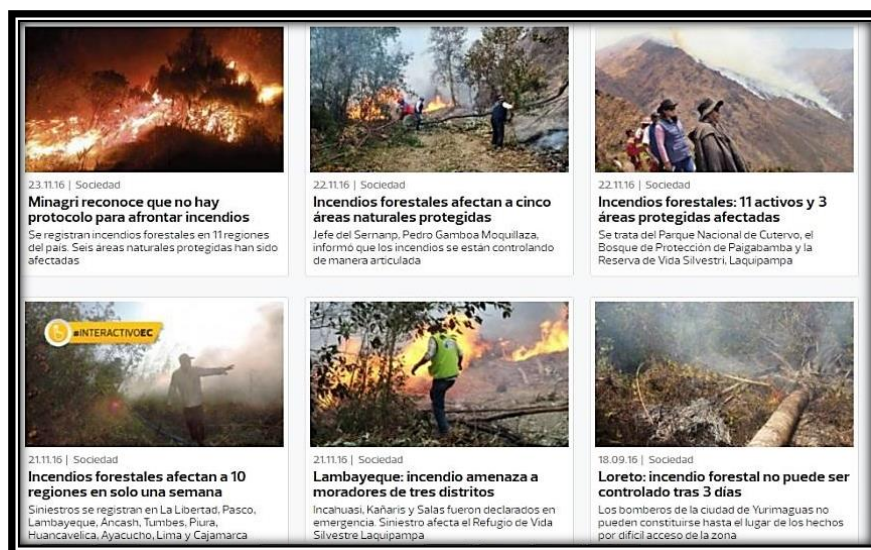
**Fuente. VolcanoDiscovery**

En el continente Sudamericano, los países que tienen mayor incidencia de incendios forestales son Perú, Bolivia y Brasil, esto se evidencia en la carta abierta realizada por los Servicios de Comunicación Intercultural de fecha 17 de setiembre de 2016, en la que menciona, entre los meses de enero y julio de 2015 se registraron 894 focos de calor en la región trinacional “MAP”, donde confluyen los departamentos de Madre de Dios en Perú, Acre en Brasil y Pando en Bolivia; por lo que se invocó a las autoridades de los tres países decretar alertas climáticas y protocolos de vigilancia de quemas agropecuarias.

En nuestro país, se registran incendios forestales en varias regiones como Cajamarca, Áncash, Lambayeque, Tumbes, Piura, La Libertad, Cerro de Pasco, entre otros; sólo algunas de éstas se muestran en la Figura 3.



Figura 2. Incendios forestales en Perú



Fuente. El Comercio

Hablando de la región Junín se tiene el caso ocurrido en el mes de setiembre de 2016 en el que el fuego se extendió casi 50 Km<sup>2</sup> en dos días afectando alrededor de 20000 ha, poniendo en riesgo la vida de los habitantes de las comunidades aledañas, destrucción de 50 hectáreas de cultivos de cacao y comprometiendo la Reserva Comunal Asháninka y el Parque Nacional de Otishi (6).

Figura 3. Área afectada de la Selva Central



Fuente. Municipalidad distrital de Río Tambo

La provincia de Huancayo no está exenta de este tipo de situaciones, el 8 de setiembre de 2016 se produjo un incendio forestal en el Anexo de Acopalca, distrito de Huancayo, el cual ocasionó la pérdida de áreas de cobertura natural (7).

Figura 4. Incendio forestal en el distrito de Huancayo



Fuente. INDECI

## 1.1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1.2.1. Problema general

¿Cuál es la influencia del transporte de concentración de PM10 en el espesor óptico de aerosoles de la ciudad de Huancayo en el año 2015 – 2016?

### 1.1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son los focos de quema de vegetación que generan mayor concentración de PM10?
- ¿Cuál es el comportamiento del espesor óptico de aerosoles del mes que registra mayor y menor emisión de PM10?

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar la influencia del transporte de concentración de PM10 en el espesor óptico de aerosoles de la ciudad de Huancayo en el año 2015 – 2016.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar los focos de quema de vegetación que generan concentración de PM10.
- Determinar el comportamiento del espesor óptico de aerosoles del mes que registra mayor y menor emisión de PM10.

## **1.3. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA**

### **1.3.1. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA**

Dentro de la composición de la atmósfera encontramos gases y aerosoles. Los aerosoles tienen la capacidad de influir en el forzamiento radiativo terrestre; es decir, influyen en el cambio de la radiación entrante y saliente del sistema climático (8). Es por ello que actualmente se han incrementado los estudios sobre los aerosoles.

No siendo ajeno a esta problemática, esta investigación pretende dar a conocer cuáles son los focos de quema de vegetación en Perú y países vecinos durante el mes de agosto de 2015 y el mes de enero de 2016, cuáles son las concentraciones de PM10 en los meses mencionados; así como un modelamiento del transporte de PM10 generado por la quema de vegetación en el área y período referido.

### **1.3.2. JUSTIFICACIÓN METODOLÓGICA**

La presente investigación pretende aportar información sobre el problema que se está investigando, de manera que pueda servir como base de guía metodológica para futuras investigaciones y así generar conocimiento.

### 1.3.3. JUSTIFICACIÓN TÉCNICA

En la atmósfera terrestre se encuentran dos componentes, uno de ellos son los gases (que conforman el aire), cuyos componentes mayoritarios: el nitrógeno y el oxígeno, son bastante constantes. El otro componente, son los aerosoles considerados como un “sistema coloidal en que partículas sólidas o líquidas, se hallan dispersos en un gas” (9).

Los aerosoles de origen continental o marino son aquellos que tienen mayor presencia en la atmósfera. Sin embargo, en los meses donde existe mayor cantidad de focos de incendio, los aerosoles de origen de quema de biomasa son los que más predominan y es el período donde los valores mayores de AOD se registran; siendo Perú, uno de los países de Sudamérica que registra mayor número de focos de calor (3), los incendios forestales generan impactos negativos en la salud, en la sociedad, en el ambiente y en la economía principalmente.

Para el caso de la presente investigación, se consideró el mes de agosto de 2015 como período en el cual se registra mayor número de focos de incendio y, el mes de enero de 2016, período en el cual se registra menor número de focos de incendio.

## 1.4. HIPÓTESIS Y DESCRIPCIÓN DE VARIABLES

### 1.4.1. HIPÓTESIS

#### 1.4.1.1. Hipótesis General

**Ho:** No existe influencia del transporte de concentración de PM10 en el espesor óptico de aerosoles de la ciudad de Huancayo en el año 2015 – 2016.

**Ha:** La influencia del transporte de concentración de PM10 es directa en el espesor óptico de aerosoles de la ciudad de Huancayo en el año 2015 – 2016.

#### 1.4.1.2. Hipótesis Específica

**Ho:** Los focos de quema de vegetación que generan mayor concentración de PM10 se ubican en Perú.

**Ha:** Los focos de quema de vegetación que generan mayor concentración de PM10 no se ubican sólo en Perú.

**Ho:** El comportamiento del espesor óptico de aerosoles es constante en el mes que registra mayor y menor emisión de PM10.

**Ha:** Los valores de espesor óptico de aerosoles del mes que registra mayor emisión de PM10 son mayores a los valores de espesor óptico de aerosoles del mes que registra menor emisión de PM10.

#### 1.4.2. VARIABLES

##### 1.4.2.1. Variable independiente

Concentración de PM10.

##### 1.4.2.2. Variable dependiente

Espesor óptico de aerosoles.

#### 1.4.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla 1. Operacionalización de variables

VARIABLE	TIPO DE VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADOR
Concentración de PM10.	N: Cuantitativa C: Simple F: Independiente	Cantidad de partículas de hasta 10 $\mu\text{m}$ de diámetro presentes en la atmósfera.	Emisión de PM 10	Focos de quema de vegetación.

Espesor óptico de aerosoles.	N: Cuantitativa C: Simple F: Dependiente	Magnitud adimensional que representa la carga total de aerosoles en la columna atmosférica.	Adimensional.	440 nm
------------------------------	--	---	---------------	--------

Fuente. Elaboración propia.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. ANTECEDENTES**

##### **2.1.1. ARTÍCULOS CIENTÍFICOS**

En el artículo científico titulado “Validação de poluentes fotoquímicos e inclusão do inventário de emissões no modelo de qualidade do ar WRF/CHEM, para a Região Metropolitana de São Paulo”, cuyo objetivo de esta investigación fue evaluar la eficiencia del modelo WRF-CHEM en la simulación de contaminantes fotoquímicos para la Región Metropolitana de Sao Paulo, utilizando las concentraciones de monóxido de carbono (CO) y ozono troposférico (O<sub>3</sub>). Presenta como resultado la descripción de las condiciones meteorológicas para los casos de estudio, la simulación con el modelo WRF-CHEM y la validación de las simulaciones en superficie; las simulaciones realizadas con el modelo WRF-CHEM consiguieron representar la variabilidad temporal y espacial de las variables monitoreadas en las estaciones de monitoreo automático CETESB. Este antecedente respalda a la presente investigación en la eficiencia de la utilización del modelo WRF-CHEM reflejado en los resultados de este (10).

El artículo científico denominado “Modelado Regional de la calidad de aire utilizando el modelo WRF-CHEM: Implementación de datos globales y locales para Mendoza”, cuyo objetivo fue mostrar los resultados obtenidos por el modelo WRF-CHEM de la calidad de aire regional. El modelo WRF-CHEM fue implementado exitosamente con la intención de estudiar la química y la meteorología a escala regional, también permitió obtener una resolución espacio-

temporal de las emisiones antropogénicas. Este estudio también respalda las simulaciones realizadas con el WRF-CHEM (11).

El artículo científico titulado “Estudio de la variación estacional de ozono troposférico y aerosoles del Perú relacionado a las quemas de vegetación en la Amazonía”, cuyo objetivo fue el de evaluar la variación estacional de ozono troposférico y aerosoles, evidenciando el transporte transfronterizo de contaminantes del aire hacia Perú desde Brasil. El desarrollo de este trabajo se basó en el uso de mediciones satelitales como el AVHRR para la determinación de los focos de incendios en la región de Brasil, para el análisis de ozono troposférico se utilizaron los datos obtenidos por el sensor TOMS y para la evaluación de aerosoles se utilizó el sensor TOMS y MODIS. Los resultados establecieron la significancia estadística del efecto de las quemas de vegetación en los niveles de ozono troposférico registrados para Huancayo, lo que indica el transporte de contaminantes a lo largo de la Amazonía del Perú para luego seguir camino hasta la región andina. Las técnicas de detección de aerosoles mostraron valores máximos en los meses de agosto a noviembre, estos incrementos no son ocasionados solo por la quema local, sino que tendría influencia del transporte de contaminantes del lado de la región de Brasil. El trabajo aporta respaldo y evidencia del transporte transfronterizo de aerosoles provenientes de Brasil, así como la influencia de la quema de vegetación en los niveles de aerosol. (12).

El artículo científico titulado “Quema de biomasa en Sudamérica: Impactos regionales y globales”, cuyo objetivo fue el de analizar los incendios detectados satelitalmente en Brasil, Bolivia, Paraguay y Argentina entre enero de 2001 y julio de 2006, su ciclo estacional y distribución geográfica. Los resultados de esta investigación fueron que, en Sudamérica la principal fuente de aerosoles se debe a la quema de biomasa y los meses de agosto a octubre son los que presentan mayor quema, esta genera impactos negativos en la calidad de aire y el clima como la emisión de aerosoles y su influencia en el balance radiativo, en el ciclo hidrológico y la química de la atmósfera influyen en la atmósfera y el clima global; los aerosoles cubren durante días y a veces semanas grandes regiones de Sudamérica. Este trabajo respalda a la presente investigación en describir los meses picos los que presenta mayor cantidad de incendios forestales y los lugares los que mayor incidencia presenta (13).



### **2.1.2. TESIS**

En la tesis titulada “Estudio de la dinámica del espesor óptico de los aerosoles producido por las fuentes naturales y antropogénicas a partir de las imágenes del sensor MODIS a bordo del satélite TERRA y AQUA en el período 2000-2012” en la Revista de Investigación de Física de la facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Mayor de San Marcos. El objetivo del trabajo realizado fue estudiar la dinámica de los aerosoles en el Perú y América del Sur entre las latitudes 4°N-24°S y las longitudes 83°W-33°W, a partir de las imágenes de los promedios mensuales del espesor óptico de los aerosoles, en la longitud de onda de 550 nm. Medidos por el sensor MODIS, a bordo de los satélites TERRA y AQUA, para un período de catorce años, del 2000 al 2013. Se han usado los datos de AOD de 6 estaciones AERONET de América del Sur que incluye 4 de Brasil, una de Chile y una de Bolivia. Además, se incorporaron 166 datos e imágenes de AOD de MODIS-TERRA de los productos mensuales obtenidos para el año 2000 hasta el año 2013 y 138 datos e imágenes de AOD de MODIS-AQUA de los productos mensuales obtenidos para un período del año 2002 al año 2013 estimados a partir de herramientas de visualización. Las conclusiones de este trabajo fueron que las imágenes de AOD procedentes de los sensores MODIS (Terra y Aqua) muestran un aumento de la concentración de los espesores ópticos de los aerosoles en la cuenca Amazónica en el período de agosto – noviembre que es la temporada seca y, una disminución de concentración en los meses de enero – abril. Esta máxima concentración de aerosoles coincide con el inicio de los incendios provocados por los agricultores en la región amazónica, que también coincide con la menor capacidad para eliminar los contaminantes a través de las precipitaciones, las cuales alcanzan sus valores mínimos, por lo que existe una mayor posibilidad de que los contaminantes se difundan y alcancen mayores distancias (14).

### **2.1.3. ARTÍCULOS DE DIVULGACIÓN**

En la publicación de (3) menciona que tras los estudios realizados por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) de Brasil, los estados Brasileños de Pará, Rondonia, Amazonas y Acre son los que mayor número de focos de incendios presentan en Sudamérica y han aportado emisiones producidas por la quema de biomasa hacia Bolivia, Perú y Paraguay, produciendo grandes plumas

de humo que llegan a afectar hasta 5 millones de kilómetros cuadrados y que por la circulación predominante entre julio y noviembre las plumas de humo se canalizan en dirección a los países mencionados líneas arriba. Esto también genera alta concentración de partículas de diámetro de 2.5  $\mu\text{g}$  por encima de los límites establecidos por la OMS, llegando a ser un impacto a la salud de las personas que viven alrededor de la zona. Este antecedente asegura el transporte de emisiones producidas en Brasil hacia Perú, dando mayor respaldo a la presente investigación.

## **2.2. BASES TEÓRICAS**

### **2.2.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

#### **2.2.1.1. Patrones sinópticos**

Los patrones sinópticos son las configuraciones del campo de presión en superficie y en la altura, que determinan la circulación del aire y prácticamente, el transporte y dispersión de gases y partículas suspendidas en la atmósfera. Los patrones sinópticos guardan relación, tanto con el movimiento horizontal del aire, como con el movimiento vertical.

#### **2.2.1.2. Vientos**

El viento es la variable de estado que representa el movimiento del aire. Se denomina “viento” o “advección” a la corriente de aire que se desplaza en sentido horizontal y se denomina “corriente de convección” para los movimientos en sentido vertical del aire.

El viento es causado por las diferencias de temperatura al producirse un desigual calentamiento de las diversas zonas de la Tierra y de la atmósfera. La masa de aire más caliente tiende a ascender, y su lugar es ocupado por masas de aire más frío.

La dirección del viento depende de la distribución y evolución de los centros isobáricos; se desplazan de los centros de alta presión (anticiclones) hacia los de baja presión (depresiones). El movimiento de aire se ve alterado por factores como el relieve y la aceleración de

Coriolis, este último influye tanto en las masas de aire como las de agua, debido a que la rotación provoca una fuerza que hace que en el Hemisferio Sur las masas de agua y aire se desvíen hacia la izquierda y en el Hemisferio Norte hacia la derecha (15).

### **2.2.1.3. Presión atmosférica**

La presión atmosférica se define como la fuerza que ejerce la atmósfera sobre cualquier parte de la superficie de la Tierra (16).

### **2.2.1.4. Inversión térmica**

La temperatura tiene la tendencia normal de decrecer con la altura. No obstante, en un determinado estrato atmosférico, la temperatura puede aumentar con la altura en ciertas capas de la atmósfera. Cuando esto sucede se dice que es una inversión de temperatura o una inversión térmica.

La inversión térmica es un fenómeno natural que no representa ningún riesgo para la salud humana; solo se vuelve peligrosa cuando en la capa atmosférica se encuentran altas concentraciones de contaminantes, pues la inversión térmica no permite la dispersión de los mencionados contaminantes mientras esta dure.

Una inversión térmica deja de existir cuando el aire frío que tiene en la base, poco a poco va calentándose hasta que se elimina la diferencia de temperatura entre la base y el tope. Pues durante el día los rayos solares calientan la superficie y a su vez las capas de aire adyacentes a la misma, haciendo que se genere el proceso antes mencionado (17).

### **2.2.1.5. Transporte de masas de aire**

#### **2.2.1.5.1. Patrones generales de circulación atmosférica**

La circulación atmosférica distribuye la energía calorífica y la humedad por todo el planeta.

La energía solar que llega a la Tierra no llega por igual a todos los puntos del planeta debido a la forma que esta tiene y también al eje terrestre que está aproximadamente inclinado unos  $23.5^\circ$ , pues los rayos solares calientan mucho más la zona del Ecuador, ya que los rayos caen perpendicularmente; por ende, es allí donde se calienta más el aire. De igual manera, la energía que se emite al espacio no es la misma en todos los puntos del planeta. Es por ello que existe una tendencia de uniformizar estas diferencias que existen, por lo que se establece un flujo de energía desde las latitudes bajas hacia los polos, lo que constituye un componente general de la circulación general atmosférica. Esta circulación se describe en la célula de Handley, célula de Ferrel y la célula Polar, estas tres células para cada hemisferio. Se puede decir que su situación determina los centros de acción, zonas de altas o bajas presiones, los sistemas de vientos y, en parte, también las corrientes oceánicas; esta última se considera, ya que participan en el transporte de energía en la colaboración con las células atmosféricas (18).

#### **2.2.1.5.2. Patrones de circulación atmosférica en Sudamérica y Perú**

Las principales características de circulación en Sudamérica se ilustra en la referencia bibliográfica (19) citado por (20), siendo las más resaltantes las siguientes:

##### **A. ZCIT**

La Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) es uno de los sistemas meteorológicos más importantes que opera en las zonas tropicales.

En esta región es donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte con los del hemisferio sur. Las zonas sobre la que influye la ZCIT se caracterizan por las lluvias fuertes y por las tormentas eléctricas; es por ello que este sistema

determina las diferentes condiciones meteorológicas y el clima en diferentes áreas de la Región Tropical. También tiene influencia en la precipitación en los continentes americano, asiático y africano (21).

### **B. Vientos alisios**

Son vientos característicos de la periferia ecuatorial de los anticiclones subtropicales, que convergen en las inmediaciones del Ecuador. Los vientos Alisios fluyen todo el año. En el océano Atlántico norte soplan del este - nordeste, mientras en el sur lo hacen del este - sudeste. Los vientos en niveles bajos en las latitudes medias fluyen, preferiblemente en la dirección oeste (22).

### **C. Alta subtropical**

La Alta Subtropical, también llamada la Alta de Bolivia, es un sistema de altas presiones en altura, situado cerca de los paralelos 30°, en ambos hemisferios. En el hemisferio sur se forma gracias a la selva amazónica que entrega calor y humedad a la atmósfera, dando lugar a la formación de una pequeña masa de aire diferente a la que la rodea. Esta masa de aire, empieza a desplazarse hacia el Oeste y comienza su transformación. El calor es entregado al aire y comienza a formarse una depresión (en altura, no en superficie) y comienza a girar en sentido anti horario.

Una de las características de la Alta Subtropical es que es migratoria y su velocidad es relativamente baja, hasta incluso, parece estacionarse (23).

### **D. ZCAS**

La Zona de Convergencia del Atlántico Sur es un sistema que conduce toda la humedad atmosférica en su dirección, generando precipitaciones torrenciales, por períodos prolongados, sobre el sureste de Brasil. En el sur pueden ocurrir períodos en los que la masa Tropical Continental que, a pesar de estar caliente, presenta baja humedad y por

consecuencia inhibe el avance de los sistemas productores de lluvias. Este proceso tiene lugar cuando un frente frío se estaciona sobre el Océano Atlántico, a la altura del sureste brasileño, quedando ligado a una franja de nubes que se extiende desde el sur de la Amazonia, orientada en el sentido noroeste-sureste, la cual está asociada a un flujo convergente de la baja tropósfera (24).

#### **2.2.1.6. Movimientos verticales del aire**

Se llaman procesos adiabáticos a aquellos que tienen lugar en la atmósfera y en los cuales no existe intercambio calórico con el exterior del sistema. Toda compresión adiabática trae aparejado un calentamiento y por su parte, toda expansión en las mismas condiciones tiene como consecuencia el enfriamiento.

Se considera que la atmósfera se encuentra en estado estable cuando existe una resistencia a que en ella se desarrollen movimientos verticales ascendentes, por lo que si una parte del aire, llamada “burbuja”, se desplaza de su posición de equilibrio esta tiende a recuperarlo. Se considera inestabilidad cuando ocurre el proceso contrario.

En la mayoría de los casos las masas de aire cálido tienen origen tropical y describen un movimiento hacia latitudes más altas. En estos casos ocurre una lenta transferencia de calor desde la masa de aire hacia la superficie subyacente, con la consecuente estratificación dentro de la masa de aire, con ausencia de movimientos verticales o turbulencias.

Las masas de aire frío son consecuencia del movimiento de masas de aire polar hacia latitudes más bajas (25).

##### **2.2.1.6.1. Estabilidad e inestabilidad atmosférica**

Se habla de estabilidad atmosférica cuando existe resistencia a que en ella se desarrollen movimientos verticales, por

ejemplo, cuando comienza la formación de una nube pero esta queda poco desarrollada y no continúa creciendo. En cambio, si el ascenso no se detiene, la nube puede llegar a convertirse en un cúmulo grande, entonces decimos que la atmósfera es inestable. La inestabilidad será la condición indispensable para que las nubes tengan suficiente desarrollo vertical y puedan dar lugar a la precipitación.

Entonces si la burbuja al ascender y enfriarse encuentra una atmósfera más caliente que ella, bajará y volverá al nivel de partida (estabilidad). Si el aire de alrededor es más frío que ella, proseguirá su ascenso (inestabilidad) (25) (26).

### 2.2.1.7. Espesor óptico de aerosoles

El espesor óptico es una magnitud adimensional, que representa la carga total de aerosoles en la columna atmosférica. En otras palabras, el espesor óptico de aerosoles se refiere a las propiedades de las partículas de aerosol de atenuar la radiación solar a una cierta longitud de onda mediante los procesos de dispersión o absorción de la radiación solar (27).

El espesor óptico de aerosol, como se aprecia en la ecuación 1, se estima a partir del espesor óptico total ( $\tau$ ), el cual es la suma de los espesores ópticos del aire (referido como dispersión Rayleigh, ( $\tau_{\text{Rayleigh}}$ ), ozono ( $\tau_{\text{ozono}}$ ) y aerosoles (28) citado por (29).

$$EOA = \tau - \tau_{\text{Rayleigh}} - \tau_{\text{ozono}} \quad (1)$$

La determinación del espesor óptico total ésta basada en la Ley de Lambert-Beer (ecuación 2), que explica la atenuación de la radiación solar a su paso por la atmósfera (30) citado por (29).

$$\tau = \frac{\ln\left(\frac{I_{0\lambda}}{I_{\lambda}}\right)}{m} \quad (2)$$

Donde:

R: factor de corrección distancia sol – tierra;

$I\lambda$ : intensidad de radiación observada a una longitud de onda ( $\lambda$ ), a nivel de la superficie del suelo;

$IO\lambda$ : intensidad de radiación en el tope de la atmósfera, obtenido gráficamente por el método de Langley (31), para una  $\lambda$  en particular;

m: es la masa del aire determinado por la secante del ángulo cenital solar.

El método de Langley está basado en el principio de extinción espectral de la radiación solar y la Ley de Lambert - Beer – Bouguer. Para este método las observaciones de radiación solar se plotean en función de la masa de aire y la pendiente de la regresión lineal resultante es (total) por su parte la radiación correspondiente a  $m = 0$  es la  $IO\lambda$ .

El espesor óptico del aire (Rayleigh), es calculado utilizando la ecuación 3, (32) citado por (29).

$$\tau_R(\lambda) = (a + b H \lambda^{-(c+d\lambda+\frac{e}{\lambda})}) \frac{P}{P_s} \quad (3)$$

El espesor óptico de ozono se encuentra en función de la concentración de la columna total de ozono ( $\Omega$ , en unidades Dobson) y el coeficiente de absorción de ozono ( $\sigma$ ) según la ecuación 4, (33) citado por (29).

$$\tau_{O_3} = \frac{\Omega \times \sigma}{1000} \quad (4)$$

### 2.2.1.8. Aerosoles atmosféricos

Los aerosoles atmosféricos son un conjunto de partículas sólidas o líquidas suspendidos en el aire (34); según su origen, evolución y



procesos atmosféricos involucrados. El rango de tamaño comprende desde los  $0.001\mu\text{m}$  hasta  $100\ \mu\text{m}$  (35). Los aerosoles que se encuentran en la atmósfera pueden proceder de fuentes naturales como: erosión, erupciones volcánicas, incendios forestales, espumas marinas o rompimiento de olas, y de fuentes antropogénicas como: quema de combustibles fósiles, procedimientos industriales y cambio de uso de suelo. Existen dos tipos de aerosoles, aerosoles primarios que son aquellos emitidos directamente a la atmósfera y aerosoles secundarios que son los que se forman en la atmósfera por procesos químicos (36).

Los aerosoles pueden influir en el clima directamente, dispersando (ejercen un forzamiento radiativo negativo) y absorbiendo radiación (ejercen un forzamiento radiativo positivo), o indirectamente, actuando como núcleos de condensación de las nubes o modificando las propiedades ópticas y el período de vida de estas (36).

#### **2.2.1.8.1. Propiedades de los aerosoles**

##### **A. Caracterización física de los aerosoles**

- **Distribución global**

La distribución de aerosoles en la tropósfera es heterogénea debido al tiempo de residencia y la diversidad de fuentes, siendo las concentraciones máximas cerca de las zonas de emisión.

Muchos aerosoles se originan a partir de un proceso de transformación físico-química de otros aerosoles. Su origen puede estar asociado también a la modificación de sustancias que se encuentran suspendidas en la atmósfera, surgiendo nuevas partículas a partir de las ya existentes. Este proceso es conocido como conversión gas a partícula, cuyo origen se debe a especies gaseosas condensables y a la evaporación de las gotas de las nubes y otros elementos que dejan tras de sí, nuevas partículas de aerosoles.

Durante el tiempo que los aerosoles se encuentran en la atmósfera, estos experimentan cambios físicos y químicos, sobre todo dentro de las nubes, y son eliminados en gran medida y relativamente rápido por las precipitaciones.

En cuanto a los sumideros de estos componentes atmosféricos se hace referencia principalmente a los procesos de deposición seca, sin intervención del agua, de modo que el tiempo de residencia de las partículas depende de su tamaño, pues cuanto más pequeña sea menor es la velocidad de deposición, y la deposición húmeda donde las partículas actúan como núcleos de condensación y son eliminados mediante la precipitación (35) (26) .

- **Tiempo de vida**

El tiempo de vida media de los aerosoles en la atmósfera depende principalmente de su tamaño y del carácter higroscópico de los mismos.

De un estudio experimental sobre el tiempo que una partícula puede estar suspendida en la atmósfera, se ha elaborado una ecuación que relaciona dicho tiempo de permanencia con el radio de las mismas (37) citado por (35).

Dicha ecuación empírica toma la forma:

$$\frac{1}{t_{res}} = \frac{1}{C_F} \left(\frac{r}{R}\right)^2 + \frac{1}{C_D} \left(\frac{r}{R}\right)^{-2} + \frac{1}{t_{hum}}$$

Donde  $t_{res}$  es el tiempo de residencia,  $r$  el radio de la partícula,  $C_F$  y  $C_D$  constantes y  $t_{hum}$  el tiempo límite de

permanencia en la atmósfera debido a los procesos de deposición húmeda.

A partir de dicha ecuación se tiene, por tanto, que partículas pequeñas,  $< 0.1 \mu\text{m}$ , poseen un tiempo de residencia relativamente corto, debido principalmente a los procesos de coalescencia con otras partículas. Asimismo, son las partículas grandes ( $0.1 - 10 \mu\text{m}$ ) las que poseen un mayor tiempo de vida, donde los procesos de extracción húmeda son los principales mecanismos de reducción de éstas. Finalmente, las partículas gigantes, sedimentan rápidamente dado a su peso, con lo que nuevamente se obtiene tiempos de residencia cortos (35).

- **Distribución de tamaños**

La distribución de tamaños de los aerosoles atmosféricos es importante tanto por la interacción de estas con la radiación solar, como por su tiempo de residencia en la atmósfera (35). Las partículas con un radio mayor a  $0.5 \mu\text{m}$ , no tienen forma esférica, pues presentan formas variadas, es así que, las dimensiones que van desde  $0.001\mu\text{m}$  y  $100 \mu\text{m}$  dan lugar a grupos con propiedades ópticas y químicas variadas, de modo que se pueden agrupar en partículas tipo fino y de tipo grueso, dependiendo del diámetro. Entonces se tiene que las partículas de tipo grueso son menos activas ópticamente y provienen del polvo, de cenizas, sales marinas y algunas de naturaleza biológicas y son eliminadas por deposición tanto húmeda como seca. Las partículas con diámetros mayores a  $10 \mu\text{m}$  tienen un periodo de vida reducido (27).

Se han establecido términos para describir los aerosoles atmosféricos, los cuales según (38) son:

**Tabla 2. Términos utilizados para describir el aerosol atmosférico**

Partículas Aitken	De radio menor que 0.1 $\mu\text{m}$ .
Partículas grandes	De radio comprendido entre 0.1 y 1 $\mu\text{m}$ .
Partículas gigantes	De radio mayor que 1 $\mu\text{m}$ .
Polvo	Partículas procedentes de la fractura de materiales sólidos y dispersas por corriente de aire.
Niebla	Partículas de sólidos o líquidos constituidas por condensación en fase vapor.
Humo	Niebla formada en un proceso de combustión.

Fuente. D.J. Spedding

- **Distribución vertical**

La distribución vertical de los aerosoles atmosféricos depende principalmente de su tamaño. Diversos trabajos manifiestan que por encima de la tropopausa las partículas con radios menores de 0.1  $\mu\text{m}$  decrecen rápidamente hasta valores de 1 a 10 partículas por  $\text{cm}^3$  a los 28 – 30 km.

En contraste con las partículas más pequeñas, las grandes entre 0.1 y 1  $\mu\text{m}$ , decrecen en la tropósfera hasta un valor mínimo que fluctúa entre 10 y 20 partículas/ $\text{dm}^3$ . Mientras en la baja estratósfera estas partículas empiezan a crecer con la altura hasta alcanzar el máximo entre los 15 y los 25 km, con valores de concentración de partículas que varían entre las 50 y 200 partículas/ $\text{dm}^3$ . Esta capa de aerosoles se presenta a nivel global y recibe el nombre de capa de aerosoles de Junge (35).

### 2.2.1.8.2. Tipos de partículas atmosféricas

Como se mencionó anteriormente, los aerosoles pueden ser primarios o secundarios. Se conoce que los aerosoles secundarios se forman a partir de reacciones químicas que pueden consistir en la interacción entre gases de la atmósfera para formar una nueva partícula o entre un gas y una partícula atmosférica para dar lugar a un nuevo aerosol (39).

Estas partículas pueden ser clasificadas como:

- **Partículas**

Cualquier material particulado que existe en estado sólido o líquido en la atmósfera.

- **Polvo**

Partículas sólidas de un tamaño mayor que el coloidal, capaces de permanecer en suspensión durante algún tiempo en el aire. Sus diámetros oscilan entre 0.25  $\mu\text{m}$  y 500  $\mu\text{m}$  y son producidas por la desintegración de material particulado de mayor tamaño. Tienen su origen en actividades tanto antropogénicas como naturales.

- **Ceniza fina**

Partículas finamente divididas arrastradas por gases de combustión y pueden contener combustible no quemado.

- **Niebla**

Aerosol visible, líquidos atomizados y/o condensados en suspensión con diámetros inferiores a 2  $\mu\text{m}$ . Se originan de las actividades tales como el roseado, el plateado o labores de mezcla o limpieza.

- **Neblina**

Dispersión de pequeñas gotas de líquido de suficiente tamaño como para caer desde el aire.

- **Humo**

Partículas pequeñas con diámetros inferiores a 2  $\mu\text{m}$ , arrastradas por gases resultantes de la combustión. Surgen de la evaporación a altas temperaturas de material, que luego es condensado para formar partículas extremadamente pequeñas. Son generadas por actividades industriales.

- **Hollín**

Una aglomeración de partículas carbonáceas. (27)

Si se habla de una caracterización de aerosoles, teniendo en cuenta las características ópticas de los aerosoles como coeficiente de Angstrom y AOD se tiene la siguiente clasificación realizada teniendo en cuenta los criterios de (40), (41) y (42). Esta clasificación es la que mejor se ajusta a las condiciones del lugar de estudio del presente trabajo.

**Tabla 3. Clasificación de aerosoles según espesor óptico y coeficiente de Angstrom**

<b>Clasificación</b>	<b>AOD 440 nm</b>	<b><math>\alpha</math></b>
Marino	0 – 0.153	0 – 1.2
Continental	0 – 0.153	> 1.2
Polvo	>0.153	0 – 1.02
Mezcla	> 0.153	1.02 – 1.5
Contaminado	0.153 – 0.38	> 1.5
Biomasa	> 0.38	> 1.5

Fuente. Hess et al., Holben et al., Dubovik et al.

### **2.2.1.8.3. Caracterización óptica de los aerosoles**

Las propiedades ópticas de los aerosoles según (43) citado por (44) son:

### **Coeficiente de dispersión**

Se refiere a la fracción de luz incidente que es dispersada por las partículas por unidad de longitud recorrida por el haz de luz.

La eficiencia de dispersión es una propiedad óptica importante de los aerosoles, denominada también eficiencia de dispersión de la masa. Esta magnitud se obtiene a partir de la división entre el coeficiente de dispersión y la concentración en masa de material particulado (44).

### **Coeficiente de absorción**

Corresponde a la fracción de luz incidente que es absorbida por las partículas por unidad de longitud recorrida por el haz de luz. (44)

### **Coeficiente de extinción**

Es el proceso mediante el cual los aerosoles dispersan y absorben la luz, afectando así la intensidad de esta al atravesar un medio con presencia de aerosoles en la dirección de su propagación. (44)

También se consideran otras características ópticas de los aerosoles mencionados en el trabajo realizado por Ana María Díaz Rodríguez, los cuales son:

### **Función de fase**

La función fase representa la probabilidad de que la radiación que alcanza a una partícula e interactúa con ella, sea redispersada en un ángulo  $\theta$  (ángulo entre la dirección de incidencia y la dirección de dispersión).

Esta función permite caracterizar a los aerosoles, ya que toma diferentes valores en función al tamaño de la partícula y la longitud de onda de la radiación que incide sobre ella. Así, se observa que para partículas, cuyo radio sea mucho menor que la longitud de onda incidente, la función de fase toma el mismo valor para cualquier ángulo. Sin embargo, a medida

que el radio de la partícula se aproxima al de la longitud de onda incidente o la supera, la probabilidad de dispersión de la radiación en la dirección del haz incidente aumenta notablemente, mientras que la retrodispersión ( $90^\circ < \theta < 270^\circ$ ) disminuye. (35)

### **Albedo de dispersión simple**

El albedo de dispersión simple es un indicador de la capacidad de los aerosoles de atenuar la radiación, es decir, determina la relación existente entre la extinción debida sólo a la dispersión y a la extinción debida a la dispersión más la absorción. La absorción del aerosol depende de su composición química, forma y tamaño, tomando valores entre 0 (partículas muy absorbentes) y 1 (partículas poco absorbentes) (45).

La razón entre el espesor óptico de dispersión y la extinción (dispersión más absorción) viene dada por el albedo de dispersión simple (35).

#### **2.2.1.8.4. Efectos de los aerosoles**

Los aerosoles pueden influir de manera directa e indirecta en el clima, ya que pueden producir un enfriamiento al reflejar la radiación solar o calentamiento al absorber la radiación.

- **Efecto directo**

Es el efecto asociado a la interacción entre los aerosoles y la radiación solar y esto ocurre dependiendo de la composición y tamaño de los aerosoles. La dispersión y absorción de radiación solar son los fenómenos característicos en este tipo de efecto, estos fenómenos actúan de manera diferente. Es decir, la dispersión hace que predomine la reflexión de la radiación solar generando una disminución de la temperatura sobre la superficie; mientras que la absorción genera el



calentamiento de la baja atmósfera y la superficie terrestre (27).

- **Efecto indirecto**

Este efecto hace referencia a que los aerosoles actúan con los núcleos de condensación aumentando la concentración de gotas de agua en las nubes y partículas de hielo modificando las microfísicas de las nubes y afectando sus propiedades radiativas (27). La modificación afecta al número, densidad y tamaño de gotas de las nubes, por ende puede cambiar la cantidad y las propiedades ópticas de las nubes, y por lo tanto su reflexión y absorción (46).

La interacción entre aerosoles y núcleos de condensación, según una investigación de la Universidad de Austin (Texas), menciona que, con más aerosoles, las nubes se hacen más grandes y viven más tiempo por lo que acaban produciendo tormentas más extremas cuando la lluvia finalmente llega (47).

## **2.2.2. FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS**

### **2.2.2.1. Análisis fotométrico**

#### **A. AERONET**

La red Aerosol Robotic Network (AERONET) es una federación de redes de teledetección de aerosoles en superficie, establecida por la NASA y PHOTONS (Fotometría para el Tratamiento de Normalización Operativa Satélite). En la actualidad constituye una red formada por más de 450 estaciones que tiene la función de coordinar y mejorar las mediciones de aerosoles en superficie, empleando para ello fotómetros solares del tipo CIMEL CE-318 (48). Esta red proporciona cobertura global y sus datos son empleados para la validación de productos atmosféricos derivados a partir de sensores a bordo de satélites.

El programa ofrece una base de datos de dominio público de espesor óptico de aerosoles, microfísica y propiedades de radiación, la

caracterización de aerosoles y la sinergia con otras bases de datos (49). Los datos proporcionados por AERONET se encuentra en dos versiones que son 1 y 2; y se agrupan en tres niveles de confianza diferentes, los cuales son los niveles 1.0,1.5 y 2.0 para cada producto; los datos de nivel 1.0 no han sido revisados ni filtrados, los datos del nivel 1.5 han sido filtrados de datos con nubes y por último los datos del nivel 2.0 han sido filtrado de datos con nubes, control de calidad y se les ha aplicado una calibración probada (pre y poscalibración), pues se asegura que los datos de la más alta calidad se pueden encontrar en la versión 2, nivel 2.0 (49).

**Figura 5. Estaciones de AERONET en el mundo**



Fuente. AERONET.

## **B. Fotómetro solar CIMEL CE318**

El fotómetro es un instrumento diseñado para realizar mediciones ópticas multibandas de forma automática para proporcionar cuantificación y caracterización físico-óptica de los aerosoles. Por sus características tecnológicas este fotómetro cumple con los requisitos operativos de monitoreo continuo de fiabilidad, durabilidad y muy bajo costo de mantenimiento.

La red AERONET lo ha utilizado desde 1992, desde entonces la tecnología del fotómetro solar CIMEL CE-318 ha ido mejorando constantemente para cumplir con los desafíos tecnológicos para la observación del clima y su seguimiento.

Las mediciones que lleva a cabo el fotómetro pueden ser pos-procesados automáticamente para recuperar un gran número de parámetros atmosféricos como las características físicas y ópticas de aerosoles (distribución de tamaño, índice de refracción complejo y forma).

Los datos obtenidos por este equipo han sido utilizados a nivel mundial para diversas aplicaciones como estudios sobre el cambio climático, monitoreo y pronóstico de la calidad de aire, detección en tiempo casi real de las plumas de ceniza volcánica, seguimiento y pronóstico de tormentas de arena y calibración de la información generada por los satélites para mediciones de aerosoles.

El 19 de marzo del 2015 se instaló en el Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR), del observatorio de Huancayo, el fotómetro solar CIMEL CE-318T. Los datos obtenidos por este equipo son enviados y procesados en los servidores de la NASA.

## **2.2.2.2. Modelamiento de transporte y dispersión de partículas**

### **2.2.2.2.1. Descripción del modelo WRF**

The Weather Research & Forecasting Model (WRF), cuyo significado en español es “Modelo de Pronóstico e Investigaciones”, este es un sistema de predicción numérica del tiempo a mesoescala de última generación, diseñado para las necesidades de investigación y predicción atmosféricas. Está compuesto de dos núcleos dinámicos, como es, un sistema de asimilación de datos y una arquitectura de software, lo cual facilita el cálculo paralelo y extensibilidad del sistema. Sirve para una amplia gama de aplicaciones meteorológicas. El desarrollo de WRF comenzó en 1990 con la colaboración, principalmente, del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR, por sus siglas en inglés), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés), representado por los Centros

Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP, por sus siglas en inglés) y Laboratorio de Sistemas de Pronóstico (FSL, por sus siglas en inglés), la Agencia Meteorológica de la Fuerza Aérea (AFWA, por sus siglas en inglés), el Laboratorio de Investigación Naval, la Universidad de Oklahoma y la Administración Federal de Aviación (FAA, por sus siglas en inglés).

El WRF puede generar simulaciones atmosféricas utilizando datos reales (observaciones, análisis, etc.) o condiciones idealizadas (pronósticos) (50).

#### **2.2.2.2. Modelo WRF – CHEM**

El modelo WRF-CHEM es el propio modelo WRF, pero acoplado con la química dentro de un único sistema de coordenadas horizontales y espaciales.

Tradicionalmente la modelación de los procesos químicos en los sistemas de calidad del aire se realiza independientemente de la modelación meteorológica, mediante una integración de los mecanismos químicos sobre una grilla externa que contiene información sobre el transporte de masas de aire y los campos meteorológicos (11).

Este modelo simula la emisión, transporte, mezcla, y la transformación química de los gases, traza y aerosoles, simultáneamente con la meteorología. Este modelo se utiliza para la investigación de la calidad de aire a escala regional, el análisis del programa de campo y las interacciones de nubes a gran escala entre las nubes y la química (51) . La ventaja de utilizar el modelo acoplado WRF-CHEM radica precisamente en que éste posee una estructura modular que permite acoplar la modelación meteorológica con los procesos químicos y considerar la interacción que existe entre ambos procesos, debido a que en la atmósfera real también los

procesos químicos pueden afectar la meteorología. Por ejemplo, a través de sus efectos sobre el balance de radiación, así como la interacción de los aerosoles con la nube o los llamados núcleos de condensación (52)

### **Configuración local del modelo WRF-CHEM**

Los modelos deben configurarse para incluir las características particulares de las áreas de estudio. Debido a su alta complejidad, existe una configuración por defecto optimizada para modelar cualquier región del planeta utilizando datos estáticos globales (11).

El modelo WRF-CHEM trabaja con ecuaciones para poder realizar las modelaciones, las ecuaciones generales de este modelo son las siguientes:

#### **Para la componente zonal del viento:**

$$\frac{\partial u}{\partial t} = - \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + lv + F_x,$$

Donde:

u = Componente zonal del tiempo

lv = Componente zonal de la fuerza Coriolis.

Fx = Parámetros físicos relativos al flujo turbulento horizontal (x,y).

#### **Para la componente meridional del viento:**

$$\frac{\partial v}{\partial t} = - \left( u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - lv + F_y,$$

Donde:

v = Componente meridional del viento

lv = Componente meridional de la fuerza Coriolis.

Fy = Parámetros físicos relativos al flujo turbulento horizontal (x,y)

**Para la componente vertical del viento:**

$$\frac{\partial w}{\partial t} = -\left(u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}\right) - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} - l_1 u - g + Fz,$$

Donde:

w = Componente vertical del viento

lu = Componente meridional de la fuerza Coriolis.

g = Aceleración de la gravedad

Fz = Parámetro vertical de impulso.

**Para la temperatura:**

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \frac{\gamma_a}{g\rho} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{c_p \rho} (\varepsilon_i + \varepsilon_f) + \frac{1}{c_p \rho} \varepsilon_T,$$

Donde:

T = Temperatura

g = Aceleración de la gravedad

ga = Gradiente de temperatura adiabático seco

ρ = Densidad del aire

Cp = Calor específico del aire a presión constante

ε = Parámetros físicos de transformación del estado de la partícula

**Ecuación de la continuidad:**

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -\left(\frac{\partial u\rho}{\partial x} + \frac{\partial v\rho}{\partial y} + \frac{\partial w\rho}{\partial z}\right);$$

Donde:

u = Componente zonal del tiempo

v = Componente meridional del viento

w = Componente vertical del viento

**Para la humedad específica del aire:**

$$\frac{\partial q}{\partial t} = -\left(u \frac{\partial q}{\partial x} + v \frac{\partial q}{\partial y} + w \frac{\partial q}{\partial z}\right) + \frac{1}{\rho} \varepsilon_p + \frac{1}{\rho} \varepsilon_{pT};$$

Donde:

q = Humedad específica del aire

$\varepsilon$  = Parámetros físicos de transformación del estado de la partícula

$\rho$  = Densidad del aire

**Ecuación de estado:**

$$p = R\rho T$$

Donde:

p = Presión absoluta

R = Constante gaseosa para el aire seco

$\rho$  = Densidad del aire

T = Temperatura

A continuación, se describe los componentes restantes de las ecuaciones mostradas líneas arriba:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \text{Derivada local de la variable } f, \text{ aplicable a cualquier variable.}$$

$$u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y} = \text{Transporte horizontal de la variable } f.$$

$$w \frac{\partial f}{\partial z} = \text{Transporte vertical de la variable } f.$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = \text{Gradiente zonal de la presión atmosférica.}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = \text{Gradiente meridional de la presión atmosférica}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = \text{Gradiente meridional de la presión atmosférica.}$$

La transformación de la concentración de contaminante se describe mediante una ecuación tridimensional de difusión turbulenta, teniendo en cuenta la interacción físico-química entre contaminante y el medio ambiente y la existencia de fuentes puntuales contaminantes. Esta ecuación se describe a continuación:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mu \frac{\partial C}{\partial x} + v \frac{\partial C}{\partial y} + (w + wc) \frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} K_v \frac{\partial C}{\partial z} + Kh \nabla^2 C + Q \delta(x - x') \delta(y - y') \delta(z - z') - \frac{C}{\tau_0}$$

Donde:

En el caso de isotopía horizontal ( $K_x = K_y = K_z$ )

$C$  : Concentración de contaminante.

$\mu$   $v$   $w$  : Constituyentes de la velocidad de la corriente por ejes ortogonales  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

$wc$  : La velocidad vertical del contaminante

$\tau_0$  : Constante de descomposición bioquímica del contaminante.

$\delta$  : La Delta de Dirac.



$K_V, K_H$  : Coeficientes de difusión turbulenta vertical y horizontal.

$Q$  : Flujo de la masa del contaminante por unidad del tiempo.

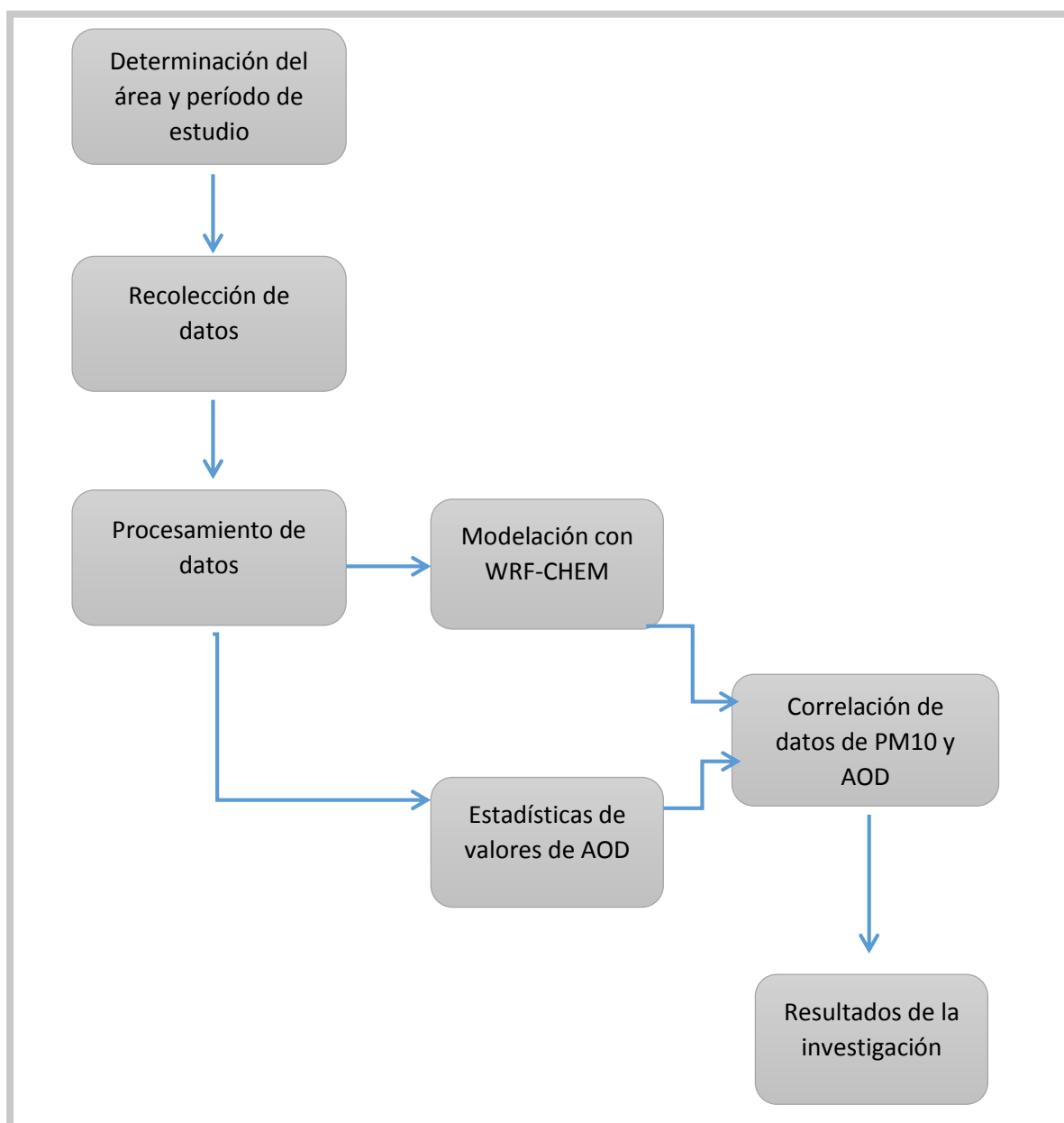
$x', y', z'$  : Coordinadas tridimensionales de la fuente de contaminación.

### **2.2.2.2.3. ACRESP**

Teledetección de Composición Atmosférica y Predicción (ACRESP, por sus siglas en inglés) es una plataforma web la cual proporciona información de las emisiones de los focos de calor calculados basados en el recuento de MODIS de la NASA, a través del Inventario de Emisiones de Fuego de NCAR (FINN, por sus siglas en inglés) que es un producto de emisiones de fuego para los modelos de química atmosférica, ofrece estimaciones de las emisiones globales de quema a cielo abierto, estas son desarrolladas específicamente para emplearlos como datos de entrada para el modelado de la química atmosférica y calidad de aire; como es el caso del modelo WRF-CHEM (53).

### 2.2.3. MODELO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN

Figura 6. Modelo teórico de la investigación



Fuente. Elaboración propia.

### 2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

- **Contaminación atmosférica**

Se define como la presencia en el aire de materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño, molestia grave para las personas y bienes de cualquier naturaleza (54).

- **Forzamiento radiativo**

El término “radiativo” se refiere a los factores que cambian el equilibrio entre la radiación solar entrante (región solar del espectro) y la radiación infrarroja saliente (emisión terrestre). El equilibrio radiativo controla la temperatura de la superficie terrestre. El término forzamiento se emplea con el objetivo de mostrar que el equilibrio radiativo de la Tierra está siendo separado de su estado normal (55).

- **MODIS**

El instrumento MODIS está operando en las naves espaciales “Terra” y “Aqua”. Tiene una anchura de barrido de visualización de 2.330 kilómetros y ve a toda la superficie de la Tierra cada uno o dos días. Sus detectores miden 36 bandas espectrales entre 0.405 y 14.385 m, y que adquiere los datos en tres resoluciones espaciales - 250m, 500m y 1.000m. Junto con toda la información de otros instrumentos a bordo de la nave espacial Terra y del Aqua de la nave espacial, los datos de MODIS se transfieren a las estaciones terrestres en White Sands, Nuevo México, a través del sistema de satélites de retransmisión de datos y de seguimiento (TDRSS). Los datos se envían al sistema de datos y operaciones EOS (EDOS) en el Centro de Vuelo Espacial Goddard. El nivel 1A, 1B Nivel, productos de geolocalización y la máscara de nubes y la de más alto nivel productos tierra y la atmósfera MODIS son producidos por el sistema de procesamiento de Adaptive MODIS (MODAPS), y luego se repartido entre los tres DAAC para su distribución. Productos del color del océano son producidos por el sistema de procesamiento de datos de color del océano (OCDPS) y distribuidos a la comunidad científica y las aplicaciones. Los muchos productos de datos derivados de las observaciones de MODIS describen las características de la tierra, los océanos y la atmósfera que pueden ser utilizados para el estudio de los procesos y las tendencias a nivel local o global. Como se acaba de señalar, productos MODIS están disponibles de varias fuentes. Nivel 1 y ambiente MODIS productos están disponibles a través de la web LAADS. Productos de la Tierra están disponibles a través de los procesos de la tierra DAAC en el estudio geológico de Estados Unidos EROS Data Center (EDC). Productos de datos de la criosfera (nieve y hielo del mar) están disponibles en el Nacional de Nieve y Hielo del Centro de

Datos (NSIDC) en Boulder, Colorado. Productos del color del océano y productos de temperatura superficial del mar, junto con información sobre estos productos se pueden obtener en las OCDPS en GSFC. Los usuarios con un sistema de recepción de banda X apropiado pueden capturar datos regionales directamente desde la nave espacial utilizando la señal de radiodifusión directa MODIS (56).

- **PM 10**

El indicador PM10 se refiere a las partículas de hasta 10 micrómetros de diámetro. PM10 es el indicador más usado para partículas suspendidas en el aire.

## **CAPÍTULO III**

### **MÉTODO**

#### **3.1. MÉTODO, TIPO Y NIVEL DE LA INVESTIGACIÓN**

##### **3.1.1. MÉTODO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN**

En la presente investigación se utilizó como método general deductivo-analítico, ya que se hizo una observación y análisis general para poder llegar a lo particular, y analítico ya que en esta investigación en partes, es decir, se realiza un análisis de concentración de PM10 a través del modelamiento con el WRF-CHEM, y posteriormente un análisis del comportamiento del espesor óptico de aerosoles obtenidos por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo; con los dos análisis se establece la correlación que existe entre ambas.

##### **3.1.2. MÉTODO ESPECÍFICO**

El método específico que orientó la investigación fue el determinar el área y período de estudio, realizar el modelamiento con el modelo WRF-CHEM, analizar el comportamiento del AOD obtenidos por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo y, por último, realizar la correlación entre los datos obtenidos por el modelo y los datos de AOD obtenidos por el fotómetro solar.

Los pasos realizados son:

- Determinar los focos de calor del área y período de estudio.
- Obtener datos de emisión de PM10 de los focos de calor del área y período de estudio a través de la plataforma web ACRESP.

- Obtener los datos meteorológicos del GFS.
- Realizar el modelamiento con el WRF-CHEM.
- Obtener los datos de AOD a través de la descarga de la página de AERONET, la descarga de los datos fue de la versión 2, nivel 2.0.
- Realizar el análisis del comportamiento del AOD del período en estudio.
- Realizar la correlación entre los datos del modelo WRF-CHEM y los datos del fotómetro solar para el período de estudio.

### **3.1.3. ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **3.1.3.1. Tipo de investigación**

El tipo de investigación es aplicada, ya que se busca generar conocimiento en un determinado tema y, según Rodríguez Vera Félix, son:

- Según los hechos y registro de la información, la investigación es prospectiva, pues la información se registra según van ocurriendo los fenómenos.
- Según el período o secuencia de estudio, la investigación es transversal, ya que se estudia las variables simultáneamente en un determinado momento.
- Según el control o no de las variables, la investigación es no experimental descriptiva, ya que se recolectan datos sin introducir cambios con la finalidad de observar, describir y comprobar aspectos de una situación.
- Según el lugar, la investigación es de campo, ya que no se realizan condiciones de control de la situación, todo lo contrario, se realiza en una situación natural.

#### **3.1.3.2. Nivel de investigación**

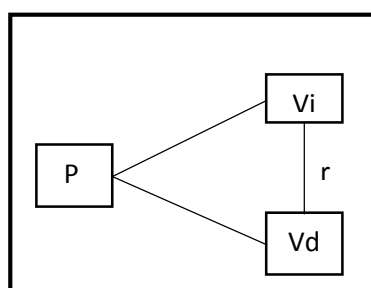
El nivel de la investigación es correlacional.

### 3.2. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El diseño de la investigación es no experimental, ya que no se realiza alguna manipulación en las variables pues se observa cual es el comportamiento de las variables para poder analizarlas

#### 3.2.1. TIPO DE DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

El tipo de diseño de investigación es transversal correlacional, ya que se describe la relación entre las dos variables de estudio en un momento determinado.



Donde:

P: influencia de la concentración de PM10 en el espesor óptico de aerosoles obtenidos por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo.

Vi: variable independiente, concentración de PM10 por la quema de vegetación.

Vd: variable dependiente, espesor óptico de aerosoles obtenidos por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo.

R: relación entre la variable independiente y dependiente.

### 3.3. POBLACIÓN Y MUESTRA

#### 3.3.1. POBLACIÓN

El espesor óptico de aerosoles obtenidos por el fotómetro solar del observatorio de Huancayo.

### 3.3.2. MUESTRA

La muestra es no probabilística por conveniencia, ya que la muestra se determinó de acuerdo al interés del investigador, el cual comprende el espesor óptico de aerosoles obtenidos por el fotómetro solar del observatorio de Huancayo en el mes de agosto de 2015 y enero de 2016.

## 3.4. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

### 3.4.1. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizaron las siguientes técnicas de recolección, las cuales son: recolección de datos, modelación y tratamiento estadístico.

### 3.4.2. INSTRUMENTOS UTILIZADOS EN LA RECOLECCIÓN DE DATOS

Los instrumentos utilizados para recolectar los datos son los que se describen la tabla 4.

**Tabla 4 . Técnicas e instrumentos de recolección de datos.**

<b>Técnica de recolección</b>	<b>Instrumento de recolección</b>
Recolección de datos	*Plataforma web ACRESP para obtener datos de emisión de PM10. * Fotómetro solar CIMEL CE 318T
Modelación	* Modelo WRF-CHEM (datos de concentración de PM10)
Tratamiento estadístico	* Microsoft Excel

**Fuente. Elaboración propia.**

La validación de los instrumentos utilizados y de los datos empleados en esta investigación se presentan en la tabla 5.



**Tabla 5. Validación de instrumentos y datos utilizados en la investigación.**

<b>Variable</b>	<b>Validación de datos</b>	<b>Procesamiento de datos</b>
Concentración de PM10	La validación de las salidas del modelo se da a partir de correlación con los datos de AOD del fotómetro solar, estos últimos nos proporcionarían información de cuanta correlación existe entre los datos obtenidos por el modelo con los datos obtenidos por el instrumento (fotómetro solar).	Se realizó una correlación entre los datos de concentración de PM10 obtenidos por el modelo WRF-CHEM con los datos de AOD obtenidos por el fotómetro solar.
Espesor óptico de aerosoles	Estos datos se obtuvieron a través del fotómetro solar CIMEL CE 318T del Observatorio de Huancayo para los meses de agosto de 2015 y enero de 2016. La validación externa de este instrumento corresponde a la que fue realizada por la NASA, puesto que, esta institución realiza una post calibración del instrumento (Ver anexo 7) para poder alcanzar los datos de nivel 2.0 que son los datos de calidad asegurada que proporciona la institución a través de la página de AERONET. La validación interna se da al utilizar los datos de calidad asegurada, así como también, en la revisión de estos al momento de procesarlos; por ejemplo, si se encuentra algún dato negativo dentro de la data a utilizar, se procede a eliminarlo.	Se realizaron gráficos lineales para mostrar el comportamiento de AOD en los meses de estudio.

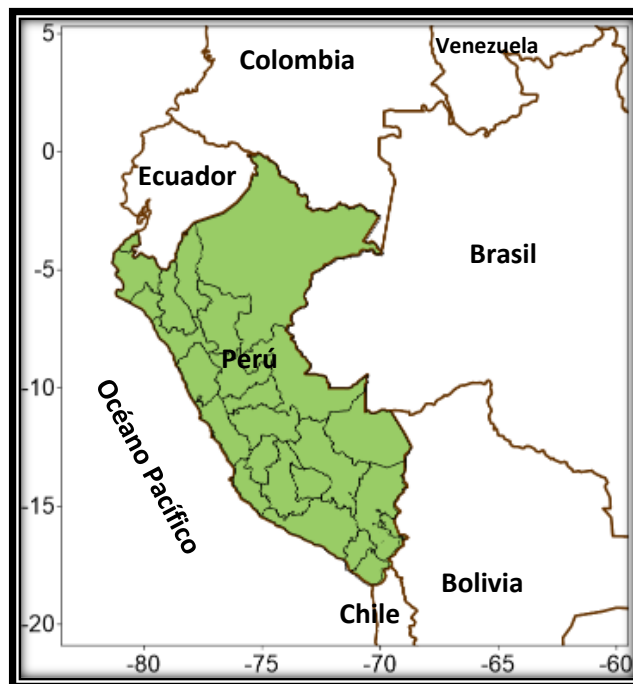
**Fuente. Elaboración propia.**

### **3.5. ÁREA DE ESTUDIO**

En la investigación, para la modelación se consideró el territorio mostrado en la figura 7, el cual comprende todo el territorio peruano y ecuatoriano, el oeste de Brasil, norte de Bolivia, sur de Colombia, sur de Venezuela y norte de Chile. Y, se

toma como punto de referencia el Observatorio de Huancayo para dar los resultados de la investigación, pues es donde está ubicado el fotómetro solar CIMEL CE 318T.

Figura 7. Delimitación espacial de focos de incendio



Fuente. Elaboración propia.

### 3.6. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE DATOS

#### 3.6.1. PROCESAMIENTO DE FOCOS DE INCENDIO MEDIANTE ACRESP

El inventario de fuego de NCAR (FINN) está basado en el recuento de fuegos del satélite MODIS de la NASA, los datos se obtienen mediante la plataforma de ACRESP. Los datos de concentración de PM10 son los que posteriormente se utilizan en el modelo WRF-CHEM. (Anexo 8)

#### 3.6.2. PROCESAMIENTO DE DATOS DE AERONET

Para el presente trabajo se realiza una descarga de los datos promedio diario de AOD de la página de AERONET de los meses de julio de 2015, agosto de 2015 y

enero de 2016 en la versión 2, nivel 2.0, que son los datos que han sido filtrados de datos con nubes, control de calidad y se les ha aplicado una calibración probada (pre y pos calibración), dichos datos son los de más alta calidad; los mismos que se dan a conocer en el Anexo 9.

Al obtener la data de los períodos mencionados líneas arriba, se realiza un tratamiento de dichos datos posteriormente.

### **3.6.3. PROGRAMA DE TRATAMIENTO ESTADÍSTICO**

Para poder identificar cuál es el comportamiento del AOD en cada uno de los meses de estudio se utilizó Microsoft Excel, de esa manera se determinó la media, valores mínimos y máximos alcanzados en cada mes de interés. Los datos utilizados se dan a conocer en el anexo 10.

### **3.6.4. MODELAMIENTO CON WRF-CHEM**

Para realizar el modelamiento con el WRF-CHEM es necesario diferenciar que este trabaja dos componentes, uno de ellos es el componente meteorológico que representa la dinámica de la atmósfera y el otro el componente químico que refleja el transporte y transformación química de los gases y aerosoles. Es de esa manera que se trabaja con dos módulos, un módulo de pre procesamiento (WPS) y un módulo de procesamiento (WRF). Ver anexo 11

- **Módulo de pre procesamiento (WPS).** Se encarga de realizar el procesamiento de datos previo a la modelación, este consta de tres programas, los cuales son:
  - **geogrid.exe**  
En este programa se define el dominio, es decir, la malla o grilla el cual es objeto de estudio.
  - **ungrib.exe**  
En este programa se ingresan los datos meteorológicos, para este caso, se toma en cuenta la base de datos del Sistema Global de Predicción (GFS, por sus siglas en inglés).

- **metgrid.exe**  
En este programa se interpola los datos meteorológicos, vale decir, la data de ungrib.exe. Los datos interpolados son los que sirven como datos de entrada para el módulo de procesamiento del modelo.
  
- **Módulo de procesamiento (WRF).** Este módulo consta de dos programas, los cuales son:
  - **real.exe**  
Este programa crea ficheros (meteorológicos) que se utilizan en el módulo de procesamiento.
  
  - **wrf.exe**  
Genera la simulación de la información meteorológica.

Conjuntamente con lo descrito líneas arriba se consideran los siguientes aspectos, necesarios para poder configurar el modelo WRF-CHEM.

**Tabla 6. Principales características del dominio y datos iniciales y de frontera**

<b>Características</b>	<b>Dominio</b>
Límites	Entre los 5.3° N y los 20.09° S Entre los 83.5° O y los 59.5° E
Paso horizontal de malla	30 Km
Dimensiones (XYZ)	90 x 100 x 28
Paso de tiempo	180 s
Condiciones iniciales	GFS* 0.5° X 0.5° pronóstico
Condiciones de contorno (CC)	GFS* 0.5° X 0.5° pronóstico
Frecuencia de CC	3 horas

\* Sistema Global de Predicción

**Tabla 7. Esquemas de parametrización empleados**

<b>Procesos</b>	<b>Esquemas de parametrizaciones (ambos dominios)</b>
Convección	Grell – Freitas
Capa fronteriza	ACM2*
Microfísica	Esquema de Lin et al. (1983)
Radiación	Esquema RRTMG**
Suelo	Modelo de 4 capas de suelo, Noah LSM***

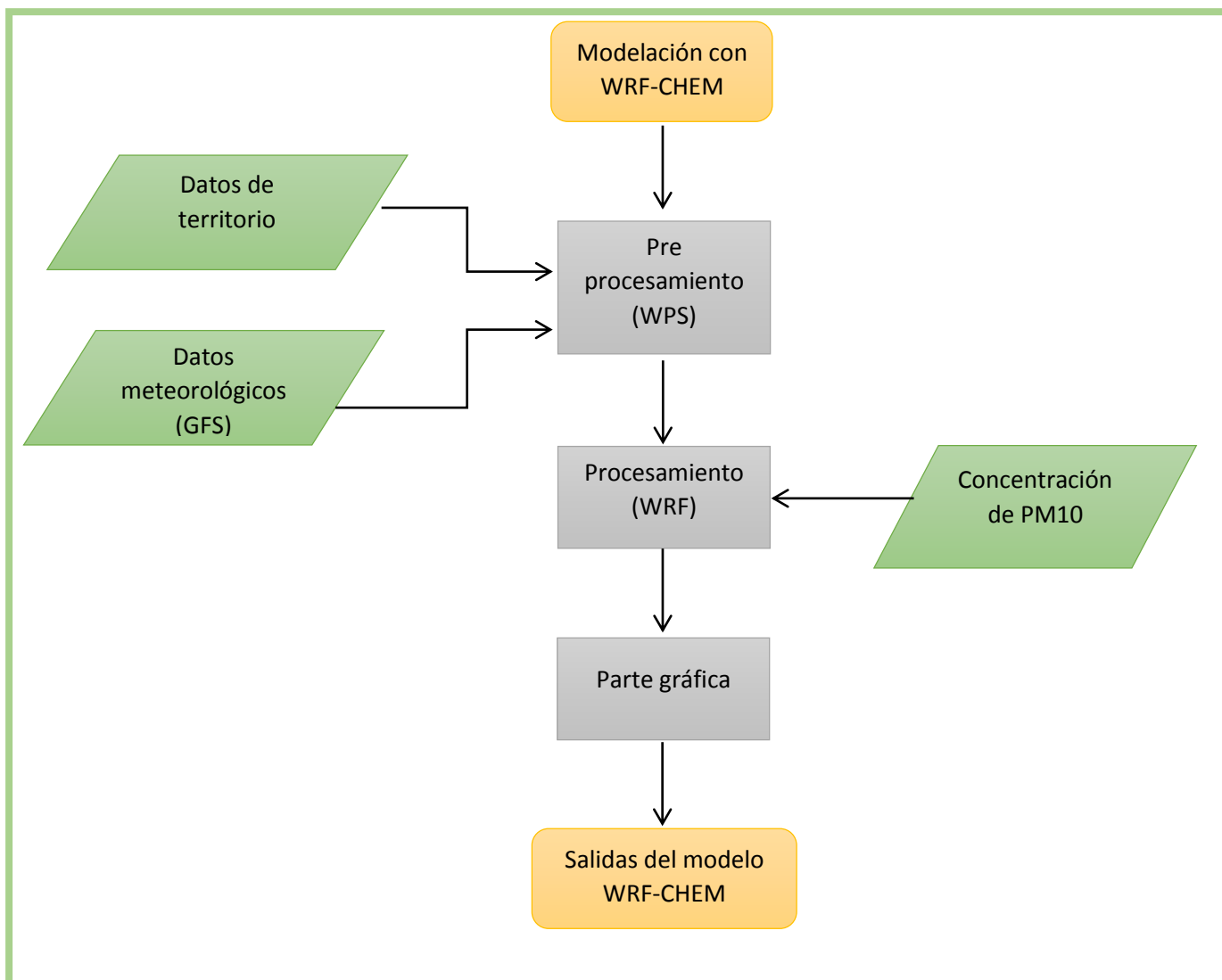
**\* Modelo 2 de Asimetría Convectiva**

**\*\* Modelo Rápido de Transferencia Radiativa – Global**

**\*\*\* Modelo de Superficie de Suelo Noah**

Una vez realizado el modelamiento de transporte de PM10, que dura aproximadamente de doce a trece horas cada corrida, se obtuvieron datos de concentración de PM10. Con los paquetes de datos del modelo y del fotómetro CIMEL CE-318T se realiza una correlación para validar el modelamiento realizado.

Figura 8. Diagrama de flujo para el sistema de modelado WRF-CHEM.



Fuente. Elaboración propia.

## **CAPÍTULO IV**

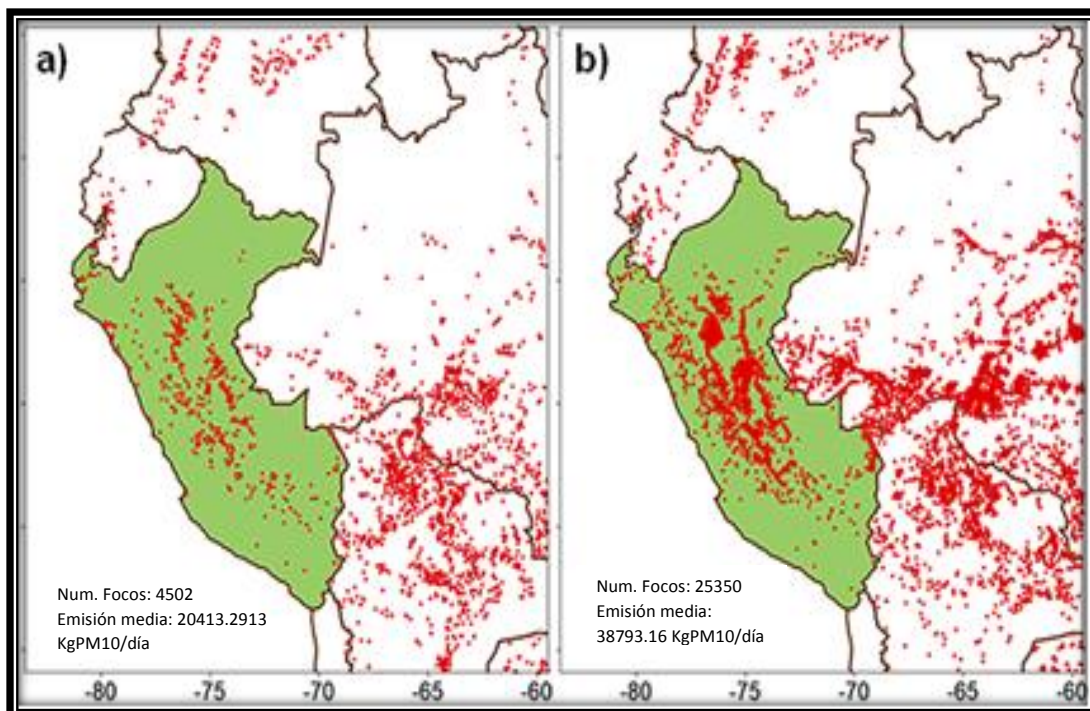
### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

#### **4.1. RESULTADOS**

##### **4.1.1. FOCOS DE QUEMA DE VEGETACIÓN QUE GENERAN CONCENTRACIÓN DE PM10.**

Se considera como período menos lluvioso entre los meses de julio y noviembre, dentro de este se encuentran los meses de julio y agosto, los cuales se representan en la figura 9, el cual muestra la distribución espacial de los focos de incendio detectados en la región de estudio, es decir, cada punto rojo en el mapa representa un foco de incendio detectado por MODIS en los meses de julio de 2015 (a) y agosto de 2015 (b). En ella se puede observar que hubo un incremento en agosto en relación con el mes anterior. Es importante destacar el hecho de que en el mes de agosto el número de focos en Perú (cuya mayor concentración de número de focos se centra a lo largo de la sierra), Brasil y Bolivia son mayores, mientras que en Ecuador y Colombia son menores. También es importante resaltar el hecho que en el mes de julio se registraron un total de 4502 focos de calor con una emisión de 20413.2913 KgPM10/día, mientras que en el mes de agosto se registraron un total de 25350 focos de calor con una emisión total de 38793.16 KgPM10/día.

Figura 9. Focos de incendio registrados en la región de estudio. a) julio de 2015, b) agosto de 2015.



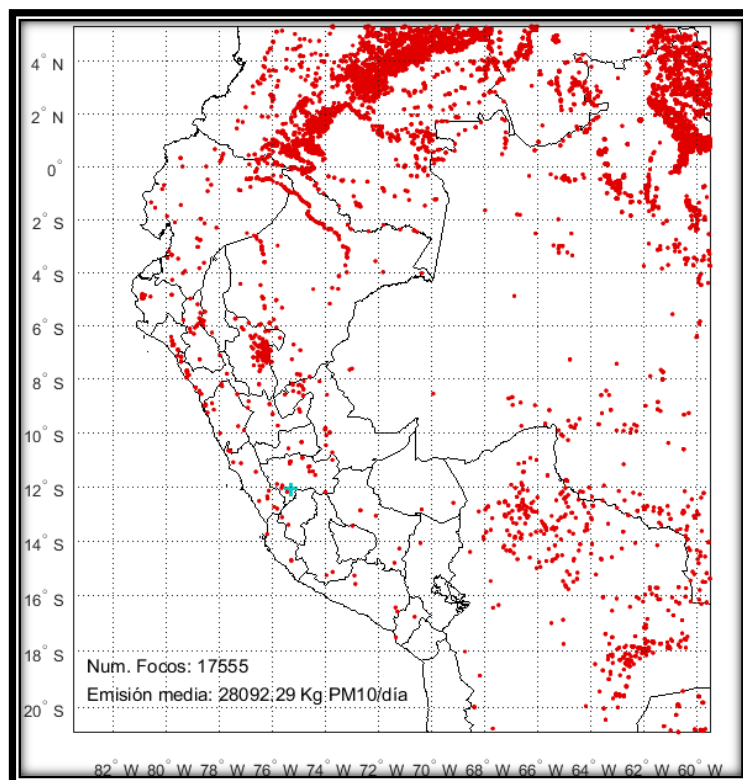
Fuente. Elaboración propia.

Con la finalidad de comparar el número de focos de incendios en la región de estudio entre un período menos lluvioso (julio-agosto) con un período más lluvioso, se optó por considerar el mes de enero de 2016.

En la figura 10 se puede observar que el número de focos de incendio es significativamente menor en Bolivia y Brasil, mientras que existe un incremento en Colombia y en la frontera entre Brasil y Venezuela. El número de focos de incendio para el mes de enero de 2016 es de 17555 con una emisión de 28092.29 KgPM10/día.



**Figura 10. Focos de incendios registrados en la región de estudio para el mes de enero de 2016.**

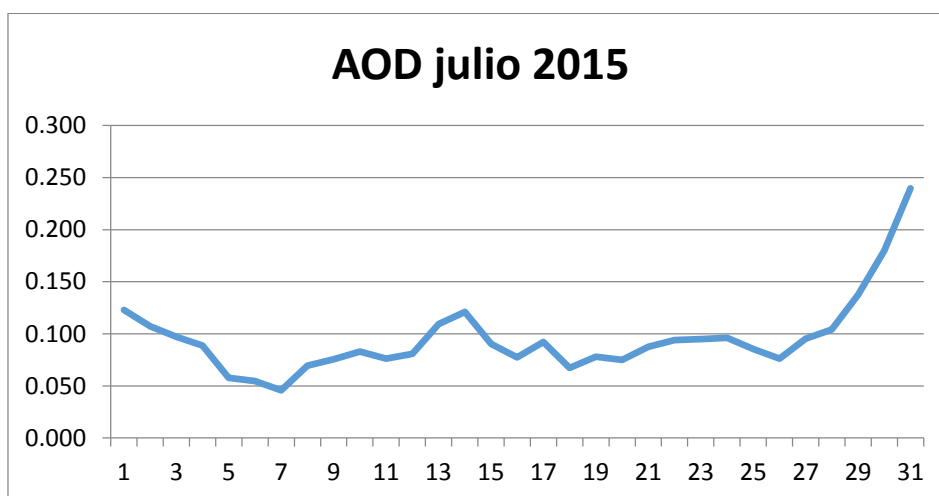


Fuente. Elaboración propia.

#### **4.1.2. COMPORTAMIENTO DEL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLES DEL MES QUE REGISTRA MAYOR Y MENOR EMISIÓN DE PM10.**

La figura 11 muestra cual fue el comportamiento del AOD diario en la longitud de onda de 440 nm durante el mes de julio de 2015, teniendo como promedio el valor de 0.096, valor máximo 0.240 y valor mínimo 0.046.

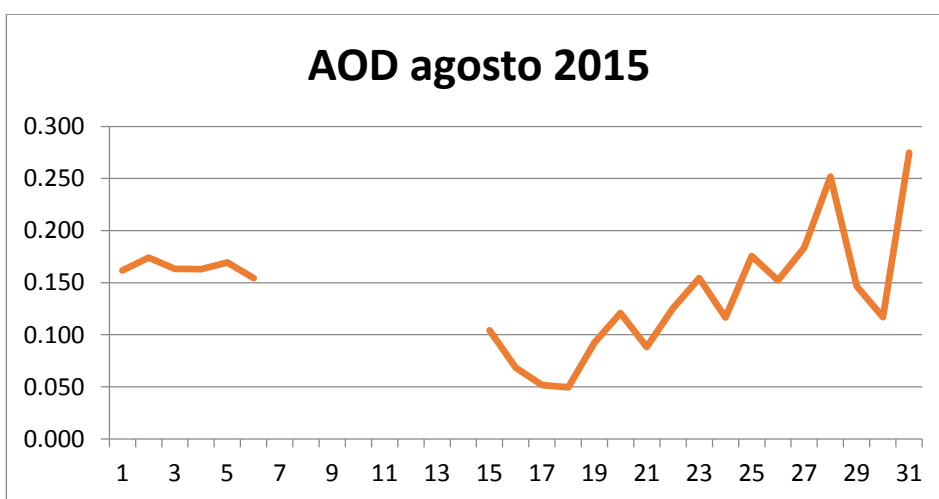
**Figura 11. Comportamiento de AOD en el mes de julio de 2015.**



**Fuente. Elaborado con los datos del fotómetro solar del Observatorio de Huancayo.**

En la figura 12 se muestra el comportamiento diario del AOD en la longitud de onda de 440 nm durante el mes de agosto de 2015, teniendo como promedio el valor de 0.142, valor máximo 0.275 y valor mínimo 0.050. Este valor mínimo es considerado, ya que a partir del día 7 de agosto de 2015 hasta el día 14 de agosto de 2015 el instrumento no registró datos. Es importante mencionar que los días que no tienen valor son porque el fotómetro no registró ningún dato debido a la nubosidad presentada en dichos días.

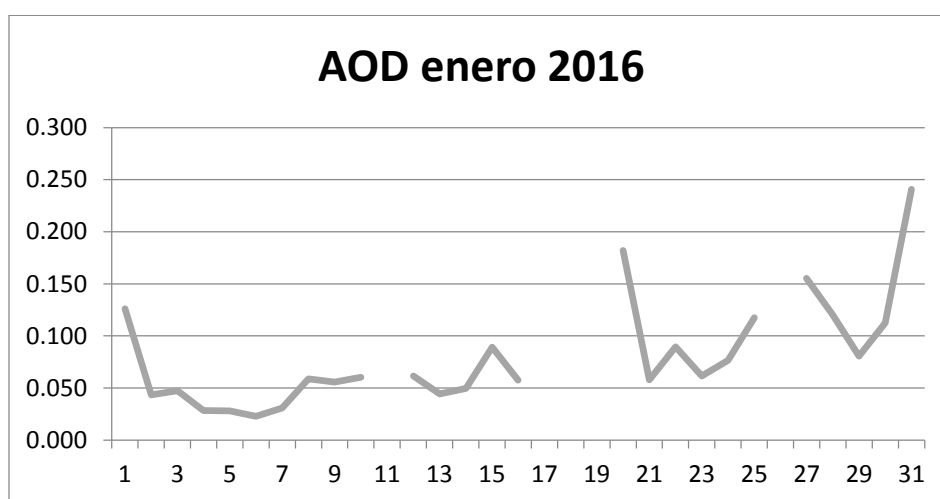
**Figura 12. Comportamiento de AOD en el mes de agosto de 2015.**



**Fuente. Elaborado con los datos del fotómetro solar del Observatorio de Huancayo.**

La figura 13 muestra el comportamiento diario de AOD en la longitud de onda de 440 nm durante el mes de enero de 2016, teniendo como promedio el valor de 0.080, valor máximo 0.241 y valor mínimo 0.023. Este valor mínimo es considerado, ya que los días en que se registra un valor de cero es porque el instrumento no registro dato alguno. Es importante mencionar que los días que no tienen valor son porque el fotómetro no registró ningún dato debido a la nubosidad presentada en dichos días.

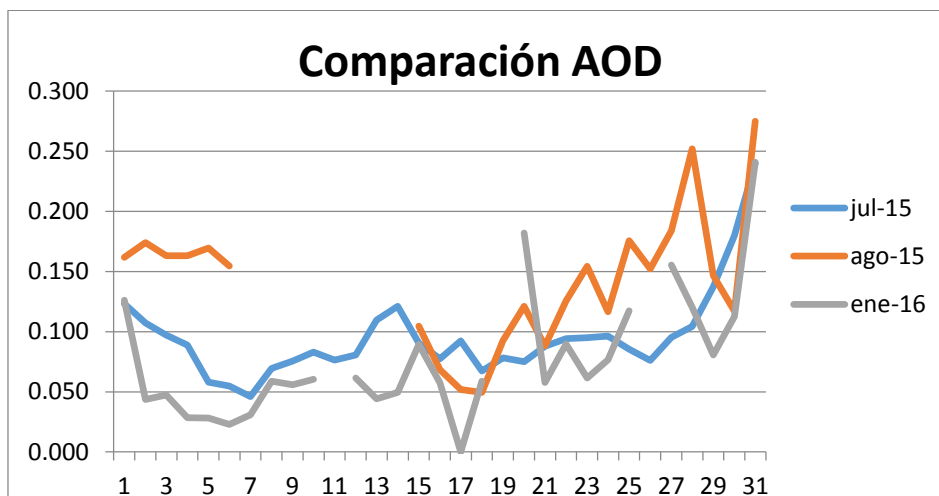
**Figura 13. Comportamiento de AOD en el mes de enero de 2016.**



**Fuente. Elaborado con los datos del fotómetro solar del Observatorio de Huancayo.**

Comparando los datos de los tres meses, en la figura 14 se observa que el mes que tiene los valores más altos es el mes de agosto de 2015, cuyo valor promedio es de 0.142 seguido del mes de julio de 2015 cuyo valor promedio es de 0.096 y, por último, el mes de enero de 2015 con un promedio de 0.080. Esta secuencia tiene concordancia con el número de focos de calor de los meses estudiados que es el mismo mencionado líneas arriba.

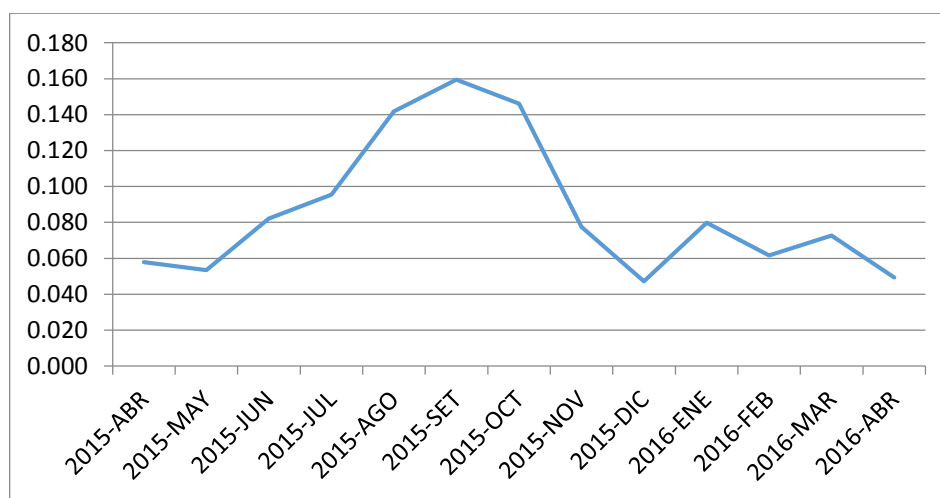
**Figura 14. Comparación del comportamiento de espesor óptico de aerosoles de los meses julio y agosto de 2015 y enero de 2016**



**Fuente. Elaborado con los datos del fotómetro solar del Observatorio de Huancayo.**

A manera de Figura se presentan los gráficos del comportamiento del AOD obtenidos por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo de un año calendario, desde abril de 2015 hasta abril de 2016. En la figura 15 se muestra el valor promedio de cada mes, donde a partir del mes de junio se incrementan los valores de AOD, teniendo valores más altos en el mes de setiembre y, a partir de este se observa una disminución de dichos valores.

**Figura 15. Comportamiento del AOD en un año calendario.**

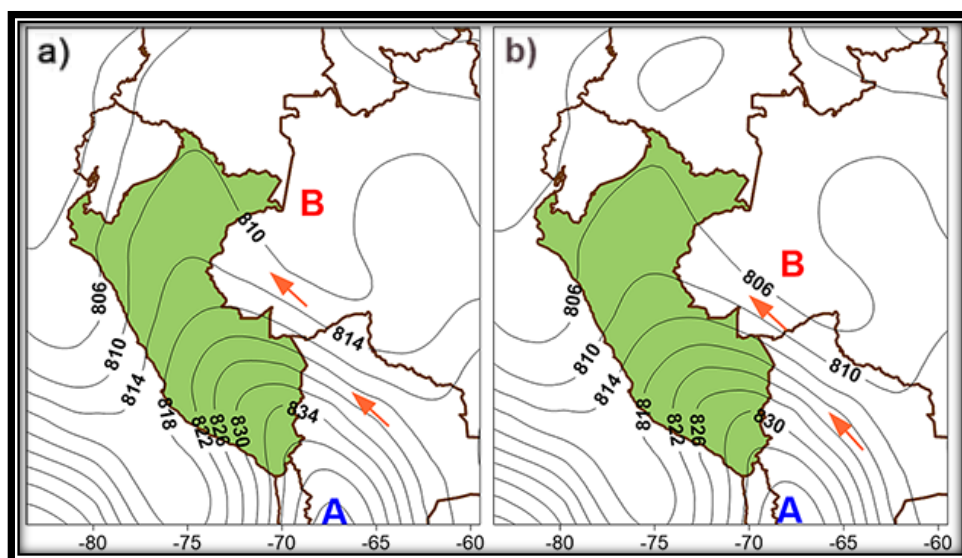


**Fuente. Elaborado con los datos del fotómetro solar del Observatorio de Huancayo.**

#### 4.1.3. ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL TRANSPORTE DE CONCENTRACIÓN DE PM10 EN EL ESPESOR ÓPTICO DE AEROSOLES DE LA CIUDAD DE HUANCAYO EN EL AÑO 2015 – 2016.

Una de las acciones a realizar, para determinar cuál es la influencia de las concentraciones de PM10 sobre Perú, es un análisis de los campos de altura geopotencial medios entre los 1000 y los 850 hPa (tropósfera baja) para el período 1979 – 2013 correspondientes a los meses de julio de 2015 (a) y agosto de 2015 (b), el cual se puede visualizar en la figura 16. Se puede observar un centro permanente en altas presiones en la porción sur del territorio de Bolivia (“A” en azul) y una zona de bajas presiones en el oeste de Brasil (“B” en rojo), que originan un flujo de aire orientado hacia las regiones central y norte de Perú. Lo anterior sugiere un transporte de aerosoles hacia Perú desde los puntos de incendios ubicados en Brasil y Bolivia.

Figura 16. Campos de altura geopotencial medios entre los 1000 y los 850 hPa (tropósfera baja) para el período 1979 – 2013. a) julio de 2015 y b) agosto de 2015



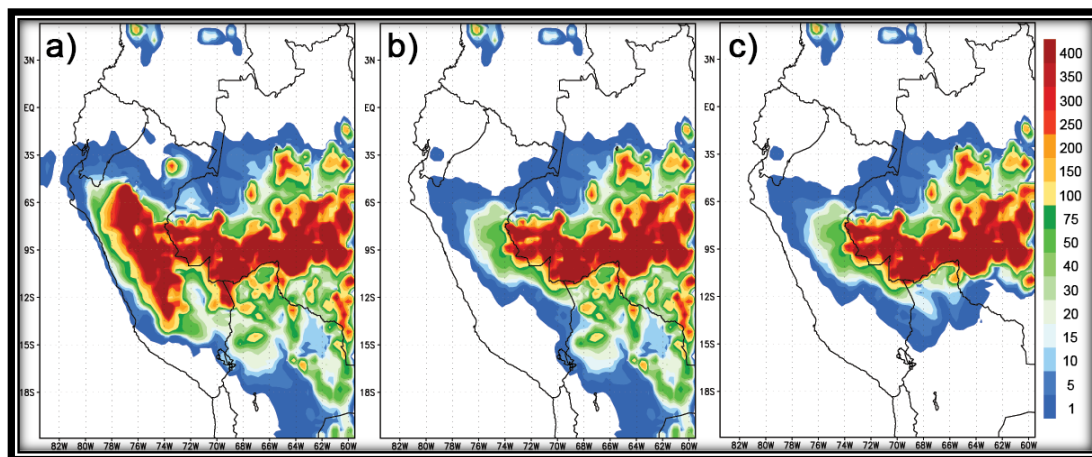
Fuente. Elaboración propia.

Para comprobar el aporte de partículas de los focos de incendio procedentes de Perú, Brasil y Bolivia, se realizó una simulación para el 24 de agosto de 2015 a las 00 UTC (Plazo 54horas) donde: a) incluye los focos de incendio ubicados en Perú

y fuera de este, b) incluye sólo focos de incendio ubicados en Brasil y Bolivia, y c) incluye solo los focos de incendio ubicados en Brasil; el cual se observa en la figura 17.

Para realizar la simulación se ha incluido las emisiones producidas en Perú y fuera de este (a), emisiones producidas solamente en Brasil y Bolivia (b), y las emisiones producidas solamente en Brasil (c). La Figura (b) sugiere que cuando no se incluyen focos de incendio ubicados en Perú se recibe la influencia de las emisiones de focos ubicados en Brasil y Bolivia, principalmente hacia el centro (y en menor medida hacia el norte) del territorio peruano. Esto se relaciona con la dirección de flujo predominante del este – sudeste mostrado en las figuras 16a y 16b. Sin embargo, en la figura (c) se aprecia que en gran medida la influencia se recibe de Brasil, mientras que desde Bolivia es poco significativa.

**Figura 17. Concentraciones de PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) obtenidas con el modelo WRF-CHEM, iniciado el 24 de agosto de 2015 (plazo 54 horas de pronóstico). a) incluye emisiones producidas en Perú y fuera de este, b) incluye emisiones producidas solamente en Brasil y Bolivia, c) incluye emisiones producidas solamente en Brasil.**

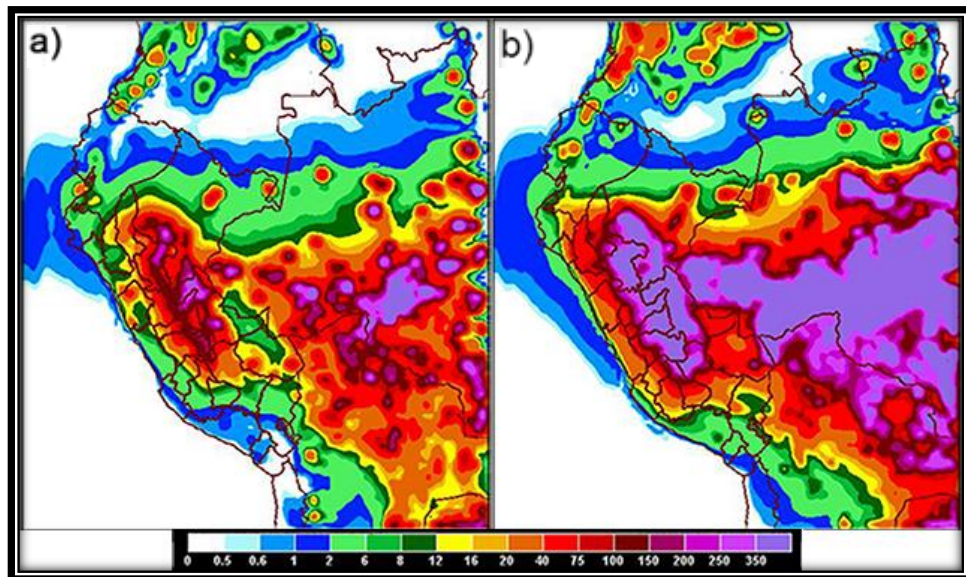


**Fuente. Elaboración propia.**

La figura 18, muestra la distribución de las concentraciones medias mensuales de PM10, generadas a partir de las salidas del WRF - CHEM, para julio de 2015 (a) y agosto de 2015 (b). Para el mes de julio de 2015 se aprecian máximos sobre el suroeste de Brasil, norte de Bolivia y la zona central de Perú, en correspondencia con las regiones con mayor número de fuegos mostrados en la Figura 9. Para el mes de agosto de 2015 estos máximos se incrementan cuantitativamente, a la vez

que sus zonas de impacto se amplían, lo cual se corresponde también con el incremento del número de incendios de un mes a otro.

**Figura 18. Distribución de las concentraciones medias mensuales de PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), calculadas a partir de las salidas del modelo WRF-CHEM. a) julio de 2015 y b) agosto de 2015.**



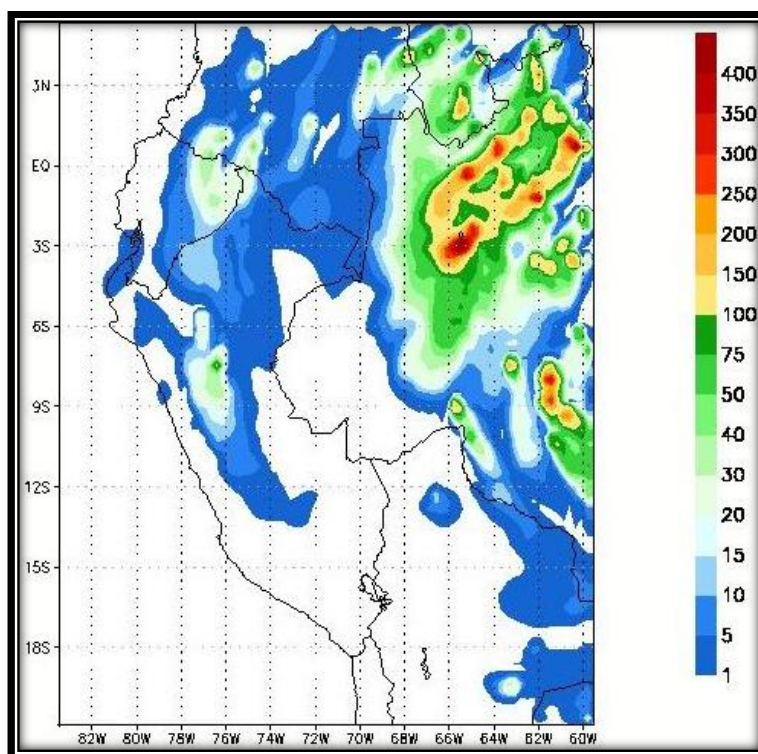
**Fuente. Elaboración propia.**

En la figura 19 se muestra la distribución espacial de concentración media de PM10 para el mes de enero de 2016.

También se hizo una comparación del número de focos de incendio entre un período no lluvioso (julio de 2015 y agosto de 2015) y un período lluvioso (enero de 2016), en este caso se hace la comparación de la concentración media de PM10 en el mismo período. En este caso, a diferencia del mes de agosto, en que las mayores concentraciones se obtuvieron para el suroeste de Brasil, norte de Bolivia y la Sierra central de Perú, las mayores concentraciones son observadas en las cercanías de la frontera de Brasil con Venezuela, es decir, más al norte, que durante el mes de agosto, con una disminución significativa en Bolivia y en la frontera de Brasil con este país. La orientación de las isolíneas de concentración sugiere que en este mes la presencia de PM10 en Perú es el resultado de la quema en este propio país, con un componente de Ecuador y de Colombia. Ello responde al predominio en esta época de vientos de componente noreste, cálido y

húmedo, procedente del cinturón ecuatorial. En sentido general, como era de esperar, las concentraciones de PM10 en este mes del año son notablemente inferiores a las obtenidas para el mes de agosto.

**Figura 19. Distribución de la concentración media mensual de PM10 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), calculadas a partir de las salidas del modelo WRF – CHEM para el mes de enero de 2016.**



**Fuente. Elaboración propia.**

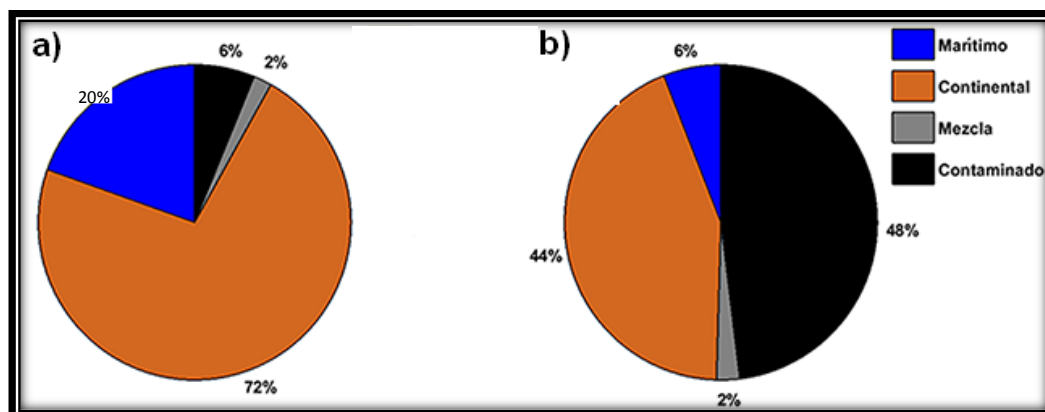
En la figura 20 se representan los porcentajes correspondientes a la clasificación de los diferentes tipos de aerosoles para el mes de julio de 2015 (a) y para el mes de agosto de 2015 (b). Esta clasificación se ha realizado teniendo en cuenta los criterios de Hess (40), Holben (41) y Dubovik (42), los cuales se basan en una comparación entre el coeficiente de Angstrom y el espesor óptico de los aerosoles, el cual está detallado en el punto 2.2.3.2.1.5. Tipos de partículas atmosféricas del capítulo II.

Comparando los dos gráficos se observa que en el mes de agosto de 2015 (b) hubo un notable incremento de los aerosoles de tipo contaminado respecto al mes de julio de 2015 (a). Los aerosoles de tipo continental, que son los que más



predominan en el mes de julio, consideran la contribución de especies carbonáceas originadas fundamentalmente como consecuencia de contaminación de ciudades e industrias, básicamente como consecuencia de la quema incompleta de combustibles fósiles. En el presente estudio los aerosoles de tipo continental constituyen el AOD de fondo o background en la zona de estudio. En el mes de julio el mayor porcentaje corresponde a los aerosoles de tipo continental con un valor de 72%, mientras que en el mes de agosto existe un 44%. En el caso de los aerosoles de tipo contaminado el mes de julio presenta un valor de 6%, mientras que en el mes de agosto existe un 48%. Los aerosoles de tipo contaminado están compuestos básicamente por especies carbonáceas, las mismas que forman parte de los aerosoles generados como consecuencia de la quema de biomasa según Dubovik (42). Este análisis por tipos de aerosoles corrobora, por tanto, los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas con el modelo WRF – CHEM, sobre todo si se tiene en cuenta que la información de entrada al modelo está constituida solamente por las emisiones de PM10 de los puntos de incendio.

**Figura 20. Porcentaje de las clasificaciones de los diferentes tipos de aerosoles registrados por el fotómetro solar ubicado en el observatorio de Huancayo. a) julio de 2015 y b) agosto de 2015.**



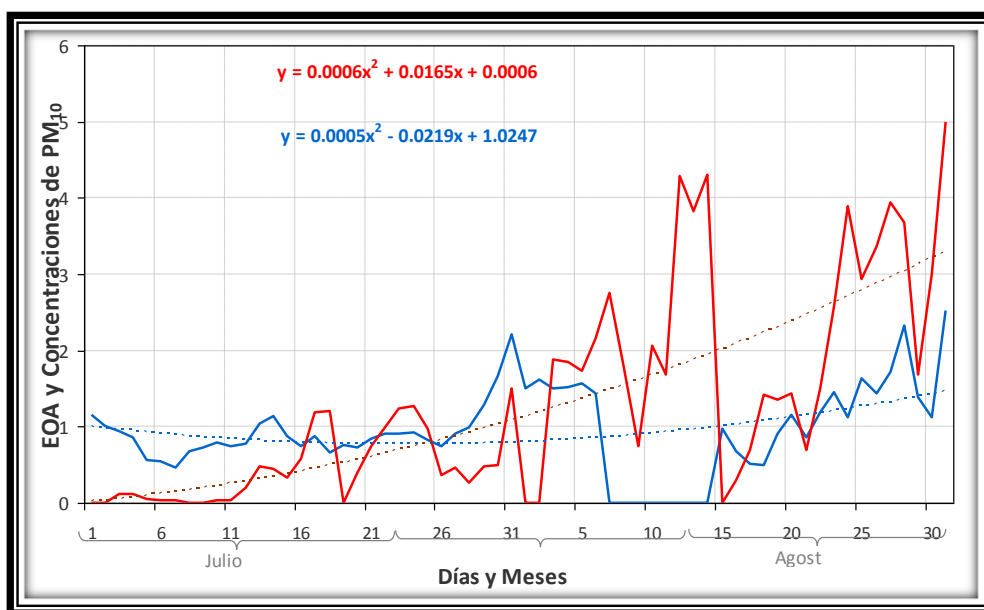
**Fuente. Elaborado con los datos del fotómetro solar del Observatorio de Huancayo.**

En la figura 21 y 22 se representa la correlación de los valores de espesor óptico por aerosoles para el período julio–agosto 2015, registrados por el fotómetro ubicado en el observatorio de Huancayo y los valores medios diarios de las concentraciones de PM10 obtenidos con el modelo. Se puede observar que de

forma general existe una buena correspondencia entre ambas curvas para el período mencionado, con un coeficiente de correlación del 73.6% para el bimestre y de 76.8% para el mes de agosto de 2015.

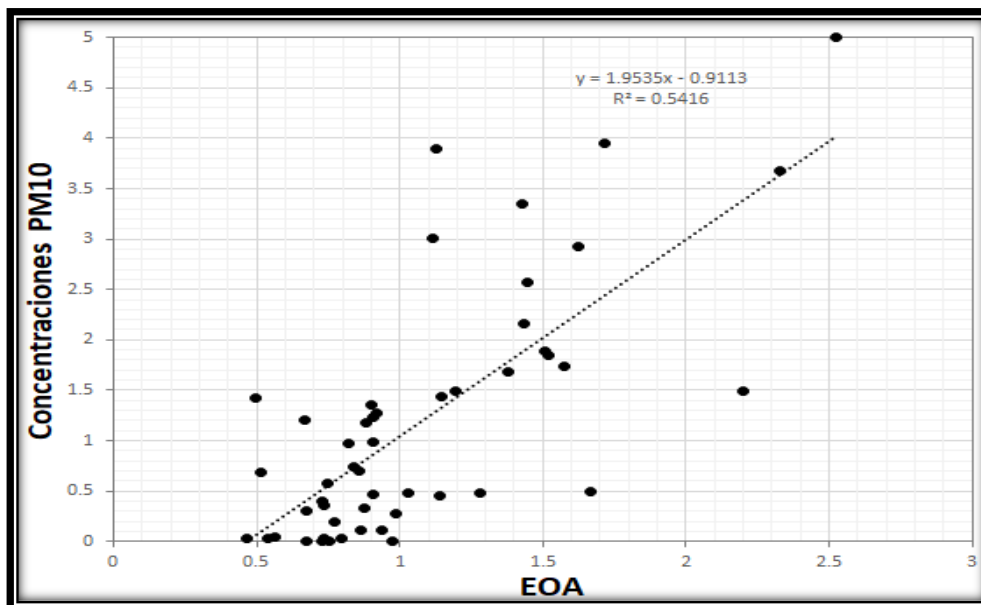
Durante el mes de julio se aprecia que tanto el AOD como las concentraciones de PM10 tienen un comportamiento relativamente estable con un ligero crecimiento, sin embargo, durante el mes de agosto tiene lugar un incremento significativo de ambas variables, principalmente durante la segunda quincena del mes.

**Figura 21. Curvas normalizadas del espesor óptico de aerosoles (línea azul) y de concentraciones de PM10 obtenidas con el modelo (línea roja) para los meses de julio de 2015 y agosto de 2015.**



Fuente. Elaboración propia.

Figura 22. Correlación entre concentración de PM10 y espesor óptico de aerosoles



Fuente. Elaboración propia.

La prueba de hipótesis se resume en lo siguiente:

**Ho:** No existe influencia del transporte de concentración de PM10 en el espesor óptico de aerosoles de la ciudad de Huancayo en el año 2015 –2016.

**Ha:** La influencia del transporte de concentración de PM10 es directa en el espesor óptico de aerosoles de la ciudad de Huancayo en el año 2015 – 2016, ya que PM 10 es un tipo de aerosol.

Tabla 8. Análisis de correlación de los datos de PM10 y espesor óptico de aerosoles.

T	$\alpha$	gl	vc	$r^2$
8.42	0.05	60	2.0003	0.5416

Fuente. Elaboración propia.

Entonces, como  $8.42 > 2.0003$  se rechaza  $H_0$ . Es decir, la influencia del transporte de concentración de PM10 es directa en el espesor óptico de aerosoles de la ciudad de Huancayo en el año 2015 – 2016.

## 4.2. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la presente investigación se tiene que, el espesor óptico para el mes de agosto de 2015 es mayor al de julio de 2015, teniendo como promedio 0.146 y 0.094 respectivamente, reflejando así que el mes de agosto es el período con mayor espesor óptico de aerosoles, siendo agosto uno de los meses dentro de la época seca. Lo que guarda relación con el trabajo realizado por (14) donde menciona que el mes de agosto es uno de los meses que tiene valores máximos en los trece años de estudio (2000 – 2012) y esto se debe al incremento de los focos de incendios forestales en la Amazonía brasileña y boliviana.

Para el mes de agosto de 2015 se registraron los valores más altos de espesor óptico por aerosoles, como consecuencia del incremento del número de focos de incendio, lo que guarda relación con el trabajo realizado por (12) donde se menciona que a la llegada de la época seca se tiene una tendencia al incremento de los valores de AOD obtenidos por MODIS. Este estudio también menciona que por las pruebas realizadas existe evidencia sobre el transporte de contaminantes del aire (ozono troposférico y aerosoles) en la Amazonía del Perú debido a las quemas de vegetación en Brasil, pues con las técnicas de detección de aerosol realizadas han arrojado valores máximos en los meses de agosto a noviembre y, que la explicación a estos resultados es que se tendría influencia del transporte de contaminantes del lado de la región Brasil (tomando referencia la ciudad de Huancayo); bajo esta premisa y tras los análisis realizados en el presente trabajo se puede validar la idea planteada por (12) , pues con la simulación realizada con el modelo WRF – CHEM y demás análisis realizados se pudo concluir que el AOD obtenido por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo tiene influencia de las emisiones generadas por la quema de vegetación en Brasil y Bolivia principalmente.

Los resultados del presente trabajo de investigación se respaldan por los trabajos realizados por (12) y (14). De igual manera con el artículo de divulgación presentado por (3), el cual menciona que existe exportación de emisión producidas por la quema de biomasa en Brasil, esta afirmación se corrobora con los análisis resalidos en este trabajo.

Tras haber realizado la correlación entre los datos de PM10 modelados con el WRF – CHEM y con los datos de AOD proporcionados por el fotómetro solar se obtuvo que el modelo es representativo significativamente, con un coeficiente de correlación de 73.6%. En el trabajo realizado por (10) se concluye que, el modelo WRF – CHEM es capaz de reproducir las variaciones de las concentraciones de CO y O<sub>3</sub> en escala local, y de representar las variaciones meteorológicas en mesoescala; y en el trabajo realizado por

(11) se concluye que, la modelación realizada para la calidad de aire para la región de Mendoza con el modelo WRF – CHEM fue exitosa, dado que se logró una configuración local que incrementó la resolución espacio-temporal de las emisiones antropogénicas y de la pluma de contaminantes primarios; asimismo, permitió describir la variación de concentraciones de contaminantes en altura. Aunque la modelación realizada en los dos trabajos mencionados no sean de los mismos elementos que el presente trabajo se destaca que las ventajas de utilizar el modelo WRF – CHEM descritas en las conclusiones dan mayor soporte a la validación realizada de la correlación de los datos de concentración de PM10 obtenidos por el modelo WRF- CHEM con los datos de espesor óptico por aerosoles obtenidos por medio del fotómetro solar.

## CONCLUSIONES

Tras los resultados del trabajo de investigación se puede concluir que:

1. Los focos de quema de vegetación en Perú para el mes de agosto de 2015 se generan principalmente en la zona central del país. Fuera de Perú, los países que registran mayores focos de incendio son Brasil y Bolivia, principalmente en el período poco lluvioso.
2. Durante los meses materia de estudio, el AOD tuvo un comportamiento diferente respecto de un mes a otro donde se registró un notable incremento a partir de mediados de julio de 2015 aumentado aun más en el mes de agosto de 2015 y siendo mucho más bajo para el mes de enero, en correspondencia con las concentraciones de PM10.
3. La influencia de las concentraciones de PM10 generadas por las emisiones de quema de vegetación es significativa, esto argumentado por el análisis de patrones sinópticos medios de latitudes bajas para el período estudiado donde se confirmó que en el mes de julio de 2015 y agosto de 2015 (meses con mayores focos de incendio) predomina un flujo de aire orientado desde el sureste hacia el noroeste, que garantiza el transporte de partículas generadas desde los países vecinos (Brasil y Bolivia) hacia Perú. Un estudio de caso simulado arrojó que Brasil realizó mayor aporte que Bolivia, aunque las mayores concentraciones de PM10 en Perú resultaron de incendios que tienen lugar en su propio territorio.
4. El efecto que tiene la presencia de PM10 provenientes de la quema de vegetación en Perú y países vecinos sobre el AOD obtenido por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo es significativo dado que, los valores de AOD registrados por el fotómetro solar ubicado en el observatorio de Huancayo guardan relación con el incremento y/o disminución con el número de focos de incendio de los meses estudiados, así como también con el modelado de transporte de PM10 realizado con el modelo WRF – CHEM donde, para los meses de julio de 2015 y agosto de 2015 se observó que existe contribución importante de aerosoles de países aledaños a Perú como Brasil y Bolivia; sin embargo, para el mes de enero de 2016 se obtuvo una disminución notable de las concentraciones de PM10 en relación al mes de agosto. Se apreció que en esta época del año las partículas de PM10 en Perú son resultado de la quema en el propio país, pero también se recibe

un determinado nivel de contaminación proveniente de la quema en Ecuador y Colombia, aunque en mucha menor cuantía que la que se recibe de Brasil durante el período menos lluvioso del año.

5. También se puede concluir que, tras realizar la caracterización de aerosoles para los meses de julio de 2015 y agosto de 2015 el porcentaje del tipo de aerosoles contaminados es de 6% y 48% respectivamente, lo que refleja, se debe al incremento del número de focos de incendios forestales de un mes respecto al otro; consecuentemente, aumenta también las concentraciones de partículas carbonáceas.
6. Finalmente, después de comparar los datos de AOD obtenidos por el fotómetro solar con los datos de concentración de PM10 obtenidos por el modelamiento de transporte de PM10 con el modelo WRF – CHEM se puede concluir que el modelo representa de manera significativa, ya que el coeficiente de correlación entre los dos parámetros para el mes de agosto de 2015 es de 76.8%.
7. El aporte de la presente investigación radica en el conocimiento del comportamiento de PM10, el cual consiste en lo siguiente: La determinación del transporte de partículas de PM10 generados por la quema de biomasa en Perú, Brasil y Bolivia, y como las partículas generadas en estos dos últimos países se transportan a nuestro país, influyendo en el espesor óptico de aerosoles de Huancayo en el período objeto estudio. Esto evidencia que no sólo somos afectados por partículas que se generan por la quema de biomasa en el Perú, sino que también nos afectan las producidas en otros países como Brasil y Bolivia. Para demostrar dicho transporte se empleó el modelo WRF-CHEM, y para validar los resultados obtenidos con este modelo estos fueron comparados con mediciones realizadas con el fotómetro solar, lo cual permite demostrar que el modelo WRF-CHEM puede ser empleado para conocer el comportamiento de las partículas en la realidad. Este trabajo puede ser considerada como línea base para investigaciones futuras.

## **RECOMENDACIONES**

1. Al concluir el presente trabajo de investigación, y al haber logrado resultados confiables y demostrables respecto a la influencia del transporte de PM10 en el AOD obtenido por el fotómetro solar del Observatorio de Huancayo, es relevante considerar que es la primera aproximación como investigación realizada en nuestro contexto, por lo que se recomienda a quienes tengan a bien realizar estudios en esta línea de investigación, puedan tomar como referencia este trabajo de investigación, así mismo poder mejorarlo y enriquecerlo.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. La quema de biomasa en Sudamérica vista desde el espacio. Mielnicki, Diana M, y otros, y otros.
2. *Aerosols, Climate, and the Hydrological Cycle*. Ramanathan, V, y otros, y otros. 7 de Diciembre de 2001, Science's Compass, Vol. 294.
3. **Alisson, Elton**. [En línea] 21 de Agosto de 2014. [Citado el: 15 de Abril de 2017.] [http://agencia.fapesp.br/la\\_deforestacion\\_de\\_la\\_amazonia\\_incrementa\\_la\\_contaminacion\\_en\\_paises\\_de\\_america\\_del\\_sur/19639/](http://agencia.fapesp.br/la_deforestacion_de_la_amazonia_incrementa_la_contaminacion_en_paises_de_america_del_sur/19639/).
4. **Velez, Alexa**. MONGABAY. [En línea] 26 de Agosto de 2016. [Citado el: 15 de Abril de 2017.] <https://es.mongabay.com/2016/08/brasil-bolivia-peru-los-efectos-las-sequias-e-incendios-forestales-podrian-los-mas-severos-los-ultimos-diez-anos/>.
5. Volcano Discovery. [En línea] [Citado el: 15 de Abril de 2017.] <https://www.volcanodiscovery.com/es/pinatubo/chronology-1991-eruption.html>.
6. **Mongabay**. RPP Noticias. [En línea] 15 de Setiembre de 2016. [Citado el: 15 de Abril de 2017.] <http://rpp.pe/blog/mongabay/la-selva-central-esta-siendo-arrasada-por-un-gran-incendio-y-debe-preocuparnos-noticia-995089>.
7. **Martel, D**. *Incendio forestal afecta al Distrito e Huancayo-Junín*. Huancayo : s.n., 2016.
8. Panel Intergubernamental del Cambio Climático. [En línea] [Citado el: 24 de Abril de 2016.] [https://www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html](https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-2-1.html).
9. **Repetto, Manuel**. Toxicología de los aerosoles. pág. 9.
10. *Validacion de pluentes fotoquímicos e inclsión de invebtarios de emisiones en el modelo de calidad de aire WRF/CHE, para la Región Metropoltana de Sao Paulo*. **Da Silva Junior, Rosiberto Salustiano y De Fatima Andrade, Maria**. 1, Sao Paulo : Revista Brasileña de Metereología, 2013, Vol. 28, págs. 105-121.
11. *Modelo regional de la calidad de aire utilizando el modelo WFR/Chem: Implementación de datos globales y locales para Mendoza*. **Fernandez, R, y otros, y otros**. Mendoza : ResearchGate, 2010, Vol. 14.
12. *Estudio de la Variación estacional de ozono troposférico y aerosoles del Perú relacionado a las quemas de vegetación en la Amazonía*. **Suarez, Luis, y otros, y otros**. 2006, Mosaico Científico.
13. *Quema de biomasa en Sudamérica: Impactos regionales y globales*. **Mielnicki, D. M y Canziani, P.O**. Buenos Aires : s.n.
14. **Rojas Benavente , Noelia**. *Estudio de la dinámica del espesor óptico de los aerosoles producidos por las fuentes naturales y antropogénicas a partir de las imágenes el sensor MODIS a bordo del satélite terra y aqua sobre América del Sur (2000 – 2012)*. Lima : s.n., 2014.
15. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. *SENAMHI*. [En línea] [Citado el: 20 de Junio de 2016.] [http://www.senamhi.gob.pe/main\\_down.php?ub=mmt&id=cap7](http://www.senamhi.gob.pe/main_down.php?ub=mmt&id=cap7).
16. **Brenes , Álvaro y Saborio, Victor**. *Elementos de climatología: su aplicación didáctica a Costa Rica*. s.l. : EUNED.
17. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. [En línea] [Citado el: 18 de Abril de 2016.] [http://www.senamhi.gob.pe/main\\_down.php?ub=mmt&id=cap11](http://www.senamhi.gob.pe/main_down.php?ub=mmt&id=cap11).

18. **Alonso Oroza, Sergio.** *¿Hablamos de Cambio Climático?* s.l. : Grupo Ibersaf, 2011.
19. *Coastal Lows along the Subtropical West Coast of South America: Mean Structure and Evolution.* **Garreaud, René D., Rutllant, José A. y Fuenzalida, Humberto.** 2002.
20. *Caracterización climática de la circulación atmosférica en América del Sur.* **Saavedra, Miguel, Calvo, Martín y Jiménez, César.** Lima : Revista de Investigación de Física, 2011, Vol. 14.
21. **Ferreira Silveira, Nivaldo.** Fundación Cearense de Meteorología y Agua. *FUNCEME.* [En línea] [Citado el: 24 de Junio de 2016.] [http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/zcit\\_1.html](http://climanalise.cptec.inpe.br/~rclimanl/boletim/cliesp10a/zcit_1.html).
22. **Gonçalves Ferreira, Artur.** *Meteorología práctica.* s.l. : Paulo Helene; Rozely Ferreira dos Santos; Teresa Gallotti Florenzano.
23. Meteorología Argentina. *Organización Meteorológica Mundial.* [En línea] [Citado el: 2016 de Junio de 27.] <http://metargmeteo.blogspot.pe/p/alta-subtropical.html>.
24. **Bocco, Gerardo, Urquijo, Pedro S. y Vieyra, Antonio.** *Geografía y ambiente en América Latina.* 2011.
25. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. *SENAMHI.* [En línea] [Citado el: 18 de Abril de 2016.] [http://www.senamhi.gob.pe/main\\_down.php?ub=mmt&id=cap8](http://www.senamhi.gob.pe/main_down.php?ub=mmt&id=cap8).
26. **Casas Castillo, Carmen y Alarcón Jordán, Marta.** *Meteorología y clima.*
27. **Alegría Campo, Dario Libardo.** *Propiedades microfísicas de los aerosoles troposféricos derivadas del fotómetro solar y Lidar en el Valle de Aburrá.* Medellín : s.n., 2015.
28. *On rayleigh Optical Depth Calculations.* **Bodhaine, B, y otros, y otros.** s.l. : Journal Atmos and Ocean, 1999, Journal Atmos and Ocean, Vol. 16, págs. 1854-1864.
29. *Determinación del espesor óptico de aerosol en la estación antártida peruana Macchu Picchu.* **Suárez, Luis, y otros, y otros.** 2014, Ciencia y Desarrollo, Vol. 17.
30. **Tomasi, C y Vitale, V.** Calculation of the relative optical mass fuctions for air, water vapor, ozone and nitrogen dioxide in the Antarctic and Arctic Atmospheres, 7th Workshop Italian Research on Antarctic Atmosphere, Conference Proceedings. Bologna : Italian Physical Society, 1997, págs. 22-24.
31. **Reagan, Scott, Fleming, I y Herman by Schotland, R.** Recovery of spectral optical, depth and zero – air mass solar spectral irradiance under conditions of temporally varying optical depth proceedings of IGARSS'84 Symposium. Strasbourg : s.n., 1984, págs. 455-459.
32. *An introduction to atmospheric radiation.* **Liou, K.** New York : Academy Press, 2007.
33. *Aerosol optical depth value-added product.* **Michalsky, J.** 2013, Climate Research, págs. 1-32.
34. **Orozco Barrenetxea, Carmen, y otros, y otros.** *Contaminación Ambiental, una visión desde la química.* s.l. : Paraninfo, 2011.
35. **Díaz Rodríguez, Ana María.** *Caracterización de los aerosoles atmosféricos y su influencia en los niveles de radiación UV en la Región Canaria.* Tenerife : Servicio de Publicaciones de la Universidad de la Laguna, 2005.
36. IPCC. *Panel Intergubernamental del Cambio Climático.* [En línea] [Citado el: 13 de abril de 2016.] <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-annex-sp.pdf>.

37. *Natural Aerosols*, en *Aerosols: Anthropogenic and Natural, Sources and Transport*. **Jaenicke, R, Kneip, T. J y Lioy, P.J.** 317-329, New York : s.n., 1980, The New York Academy of Sciences, Vol. 338.
38. **Spedding, D.J.** . Contaminación Atmosférica. 2002, pág. 6.
39. *Química de la atmosfera natural*. **Warneck , Pete.** s.l. : Academic Press, 1988, Serie Geofísica Internacional, Vol. 41, págs. 121-122.
40. *Optical Properties of Aerosols and Clouds: The Software Package OPAC*. **Hess, M, Koepke, P y Schult, I.** 5 de Mayo de 1998, Vol. 79.
41. *An emerging ground-based aerosol climatology: Aerosol Optical Depth from AERONET*. **Holben, B. N., y otros, y otros.** 16 de Junio de 2001, Journal of Geophysical Research, Vol. 106.
42. *Variability of Absorption and Optical Properties of Key Aerosol Types Observed in Worldwide Locations*. **Dubovik, Oleg, y otros, y otros.** 1 de Febrero de 2002, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 59.
43. *Tropospheric Aerosols*. **Buseck , P. R. y Schwartz, S.** s.l. : Elsevier, 2003, Treatise on Geochemistry, págs. 91-142.
44. **Palacios Peña, Laura.** *Estudio del efecto directo de los aerosoles atmosféricos sobre Europa*. Murcia : s.n., 2014.
45. *Caracterización de aerosoles por quema de biomasa en le sureste de México*. **Cortés Hernández, Virginia.** s.l. : SciELO, Febrero de 2014, Tecnología y Ciencias del Agua, Vol. 5.
46. **Li, Xiaowen, y otros, y otros.** *Impacto de los aerosoles en las nubes y las precipitaciones convectivas*. 2012.
47. *Relative influence of meteorological conditions and aerosols on the lifetime of mesoscale convective systems*. **Chakraborty, Sudip, y otros, y otros.** 17 de Junio de 2016, Proceedings of the National Academy of Sciences.
48. **Holben, B.N, y otros, y otros.** AERONET-A Federated instrument network and data archive for aerosol characterization. *Remote Sensing of Environment*. s.l. : ELSEVIER, 1998.
49. AERONET. *AEROSOL ROBOTIC NETWORK*. [En línea] [Citado el: 16 de abril de 2016.] <http://aeronet.gsfc.nasa.gov/>.
50. WRF. *The Weather Research & Forecasting Model*. [En línea] [Citado el: 16 de Abril de 2016.] <http://www.wrf-model.org/index.php>.
51. NCAR - National Center for Atmospheric Research. *UCAR - Atmospheric Chemistry Observation & Modeling*. [En línea] [Citado el: 17 de Abril de 2016.] <https://www2.aacom.ucar.edu/wrf-chem>.
52. **Grell, G, y otros, y otros.** Fully coupled online chemistry within the WRF model. *Atmospheric Environment*. [En línea] 2005. [Citado el: 25 de Junio de 2016.] <http://ruc.noaa.gov/wrf/WG11/>.
53. National Center for Atmospheric Research . *Atmospheric Chemistry Observations & Modeling*. [En línea] [Citado el: 19 de Octubre de 2016.] <https://www2.aacom.ucar.edu/modeling/finn-fire-inventory-ncar>.
54. **Martínez Ataz, Ernesto y Díaz de Mera Morales, Yolanda.** *Contaminación atmosférica*. La Mancha : s.n., 2004.

55. *Forzamiento radiativo neto mundial, potenciales de calentamiento mundial y pautas de forzamiento.* **IPCC.**
56. MODIS. *MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER.* [En línea] 27 de Abril de 2016. <http://modis.gsfc.nasa.gov/about/>.
57. *Estudio de la dinámica del espesor óptico de los aerosoles en Perú y América del Sur a partir de las imágenes MODIS de los satélites TERRA y AQUA en el.* **Rojas Beavente Noelia y Rojas Acuña, Joel.** Lima : Revista de Investigación de Física, 2015.
58. *Transporte de aerosoles generados por erosión durante episodios de fuertes vientos: Un estudio de modelado.* **Allende , D, y otros, y otros.** 2012, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 16.
59. **Bautista Vicente , Flor Silvetre y Carbajal Pérez, José Noel.** *Simulación Numérica de la Dispersión de Aerosoles Producidos por Incendios Forestales en el Área de Protección de Flora y Fauna La Primavera, Jalisco.* San Luis Potosi : s.n., 2009.
60. **Hatheway, Becca.** Ventanas al Universo. [En línea] [Citado el: 22 de Junio de 2016.] [http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/hadley\\_cell.html&lang=sp](http://www.windows2universe.org/earth/Atmosphere/hadley_cell.html&lang=sp).
61. **Torres Steinke, Ercília.** *Climatología fácil.* s.l. : Luis Enrique Sánchez; Paulo Helene; Rozely Ferreira dos Santos; Teresa Gallotti Florenzano; Doris C.C.K. Kowaltowski.
62. **Hidy, George M.** *Los Vientos .* s.l. : Reverté Mexicana S.A., 1968.
63. **Departamento de Ciencias de la Atmósfera - Universidad de la República Oriental del Uruguay.** *Circulación General de la Atmósfera.*
64. *Variación del espesor óptico de aerosol en la estación Antártica Peruana Machu Picchu.* **Angeles Suazo, Julio y Angeles Vasquez, Roberto.** s.l. : SciELO, 2015, Revista Boliviana de Física, págs. 15-19.
65. **Servicios de Comunicación Intercultural.** *Alerta de riesgo de grave sequía e incendios forestales en la Amazonía de Bolivia, Brasil y Perú.*

## **ANEXOS**

## ANEXO 1. ARTÍCULO CIENTÍFICO PRESENTADO POR ROSIBERTO SALUSTIANO DA SILVA Y MARÍA DE FÁTIMA ANDRADE

Revista Brasileira de Meteorologia, v.28, n.1, 105 - 121, 2013

### VALIDAÇÃO DE POLUENTES FOTOQUÍMICOS E INCLUSÃO DO INVENTÁRIO DE EMISSÕES NO MODELO DE QUALIDADE DO AR WRF/CHEM, PARA A REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO

ROSIBERTO SALUSTIANO DA SILVA JUNIOR<sup>1</sup>, MARIA DE FÁTIMA ANDRADE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Ciências Atmosféricas (UFAL/ICAT), Maceió, AL, Brasil

<sup>2</sup>Universidade de São Paulo, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (USP/IAG), São Paulo, SP, Brasil

rosiberto@icat.ufal.br, mftandra@modeliag.usp.br

Recebido Março de 2011 - Aceito julho de 2012

#### RESUMO

Este trabalho mostra os resultados das aproximações feitas para o inventário de emissões de poluentes da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) e transformações necessárias para serem implementadas no modelo fotoquímico WRF/CHEM ("*Weather Research and Forecasting / CHEMistry*"). Portanto, o objetivo é avaliar a eficiência do modelo WRF/CHEM em simular os poluentes fotoquímicos para a RMSP, utilizando as concentrações de monóxido de carbono (CO) e ozônio troposférico (O<sub>3</sub>). O WRF/Chem é um modelo de previsão de tempo, clima e qualidade do ar, que resolve em conjunto e de forma simultânea os módulos de meteorologia e química. A RMSP é considerada uma das dez maiores metrópoles do mundo, e sofre igualmente a outros centros urbanos com o problema da poluição atmosférica. Pesquisas realizadas na RMSP mostram que os automóveis são as principais fontes de CO, hidrocarbonetos totais (HC) e Óxidos Nitrogenados (NOx). Para Óxidos de Enxofre (SOx), as indústrias e os automóveis são fontes importantes na emissão de SOx e emissão de partículas inaláveis (PM10). Outro fator muito importante é a ressuspensão de partículas do solo e formação de aerossóis secundários. Para estimar as emissões será usado o estudo do inventário feito pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) para o ano de 2006, onde estas informações serão trabalhadas para adequação ao formato de entrada do modelo WRF/Chem, pois esse levantamento anual de emissões de poluentes é feito para toda a RMSP. Logo, algumas das propostas foram de gerar aproximações para tornar as emissões mais representativas, em termos de distribuição espacial e temporal. Os resultados mostraram que tais aproximações melhoram a previsão da concentração de ozônio (O<sub>3</sub>) e de CO em cerca de 25%, atingindo coeficientes de correlação de 0,79 para ozônio e 0,49 para monóxido de carbono, quando comparado os dados simulados e observados.

**Palavras-Chave:** Poluição do Ar, Emissões, Modelos de Qualidade do Ar.

**ABSTRACT:** PREDICTION OF PHOTOCHEMICAL POLLUTANTS IN METROPOLITAN AREA OF SÃO PAULO USING AIR QUALITY MODEL (WRF/CHEM) AND THE CETESB POLLUTANTS EMISSION INVENTORY

## ANEXO 2. ARTÍCULO CIENTÍFICO PRESENTADO POR FERNÁNDEZ Y OTROS.

### MODELADO REGIONAL DE LA CALIDAD DE AIRE UTILIZANDO EL MODELO WRF/CHEM: IMPLEMENTACIÓN DE DATOS GLOBALES Y LOCALES PARA MENDOZA

R. Fernández<sup>1,\*</sup>, D. Allende<sup>2</sup>, F. Castro<sup>2</sup>, P. Cremades<sup>2</sup>, E. Puliafito<sup>1</sup>.  
Grupo de Estudios Atmosféricos y Ambientales (GEAA) – Facultad Regional Mendoza, Universidad Tecnológica Nacional  
Cnel. Rodríguez 273, Ciudad de Mendoza – CP: 5500 – Mendoza  
Tel. 0261-5243000 – Fax 0261-5244531  
<http://www.frm.utn.edu.ar/geaa/>

\* Instituto de Ciencias Básicas (ICB) – Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo)  
Centro Universitario, Parque Gral. San Martín S/N – CP: 5500 – Mendoza  
e-mail: [rpfernandez@uncu.edu.ar](mailto:rpfernandez@uncu.edu.ar)

**RESUMEN:** El presente trabajo muestra los primeros resultados obtenidos en el modelado de la calidad de aire regional en Mendoza utilizando el modelo WRF/Chem, el cual posee la gran ventaja de resolver la meteorología y la química en forma acoplada. El modelo WRF/Chem fue configurado para representar correctamente la compleja orografía local (elevación de terreno de alta resolución SRTM3), caracterizar los tipos y usos de suelo en la región (LULC), e incorporar datos de emisión de contaminantes globales (REIRO y EDGAR) y locales (inventario GEAA). El área de estudio considerada abarca un dominio espacial de 160 km × 200 km centrado en la ciudad de Mendoza, con una resolución espacial de 4 km y un intervalo de tiempo de 24 segundos. Los resultados muestran que modificando la configuración por defecto de WRF/Chem para incorporar las características regionales de Mendoza se obtiene una descripción más detallada y resulta de la evolución espacio-temporal de la pluma de contaminantes antropogénicos.

**Palabras clave:** WRF/Chem, Calidad de Aire Regional, Emisiones Antropogénicas, Mendoza.

#### INTRODUCCIÓN

La simulación y predicción de la calidad de aire es un problema altamente complejo, que involucra tanto factores meteorológicos (velocidad y dirección del viento, turbulencia, radiación, precipitaciones, etc.) como procesos químicos (emisión, deposición, reactividad química, etc.). Más allá de que históricamente los modelos numéricos atmosféricos se han desarrollado para simular sólo una de estas componentes, en la atmósfera real los procesos físicos y químicos están altamente acoplados y ocurren simultáneamente (Grell et al., 2005). Por ejemplo, la química afecta a la meteorología a través de su efecto directo sobre el balance radiativo mientras que las nubes y las precipitaciones modifican directamente la transformación y remoción de contaminantes.

En la actualidad, la utilización de modelos numéricos de calidad de aire regional se ha constituido en una herramienta imprescindible para estudiar el efecto que ejercen los contaminantes emitidos sobre el medio ambiente y/o sobre la salud de sus pobladores (Puliafito and Quaranta, 2009). Los campos de aplicación se han extendido enormemente, permitiendo considerar dominios de modelado cada vez más extensos, menores resoluciones de grilla y la posibilidad de modificar la resolución temporal dependiendo del dominio espacial seleccionado. La correcta implementación de estos modelos permite identificar la contribución de cada una de las fuentes, así como evaluar el impacto que posee cada uno de los contaminantes sobre la calidad de aire en la región estudiada.

La calidad del aire urbano en Argentina ha sido determinada solamente en las ciudades más importantes del país. Las ciudades de Mendoza y Bahía Blanca han sido estudiadas utilizando los modelos CALPUFF, ISC3 y HYSPLIT (Puliafito et al., 2003; Puliafito and Allende, 2007; Allende and Puliafito, 2008). Para la ciudad de Córdoba se han utilizado los modelos CAPAS y TUV que incluyen, respectivamente, la reactividad de contaminantes y los efectos de la radiación UV-visible sobre la superficie terrestre (Olcese and Toselli, 2005; Toselli et al., 2009). En Buenos Aires también se ha caracterizado la contaminación atmosférica utilizando tanto modelos como medidas experimentales (Mazzeo et al., 2005; Reich et al., 2006; Pineda Rojas and Venegas, 2009; Arkouli et al., 2010). Cabe mencionar que en ninguno de los estudios anteriormente mencionados se han utilizado modelos regionales 3D como el modelo WRF/Chem, y que además en la mayoría de los casos solamente se ha considerado la emisión y transporte de contaminantes primarios.

### ANEXO 3. ARTÍCULO CIENTÍFICO PRESENTADO POR SUAREZ Y OTROS.

## Estudio de la variación estacional de ozono troposférico y aerosoles del Perú relacionado a las quemas de vegetación en la Amazonía

Study of the seasonal variation of tropospheric ozone and aerosols related to the biomass burning in Amazonia

Luis Suárez<sup>1,2</sup>,  
Luis Castillo<sup>2</sup>,  
Madeleyne Marín<sup>2</sup>,  
Gisela Carrillo<sup>2</sup>,  
Lody Rímac<sup>2</sup>,  
José Pomalaya<sup>2</sup>,  
Ricardo Menacho<sup>2</sup>

#### RESUMEN

La quema de vegetación es la más importante fuente de contaminación del aire en la región tropical del planeta. De manera especial, en la Amazonia esta contaminación alcanza miles de kilómetros, principalmente los relacionados a las quemas en territorio de Brasil, que serían transportados por los vientos hasta el territorio peruano. Este estudio presenta las evidencias del transporte transfronterizo de contaminantes del aire hacia el Perú desde Brasil, y utiliza datos de satélite para poder cuantificarlo y evaluar el rol que tiene este transporte en la composición química de la atmósfera de la región peruana. Se han evaluado datos de los satélites TOMS y MODIS para evaluar y cuantificar la variación estacional de contaminantes del aire: ozono troposférico y aerosoles (material particulado). Esto ha permitido evaluar la variación estacional en términos de ozono troposférico, Índice de Aerosol (AI) y espesor óptico de aerosol (AOD), tomando como referencia la ciudad de Huancayo, en la cordillera de los Andes, que indicaría el transporte de los contaminantes al territorio peruano. Los datos han mostrado máximos valores durante la última parte del periodo seco (agosto a noviembre). Este incremento no encontraría explicación solamente en las quemas locales, sino que además tendría la influencia del transporte de contaminantes del lado de la región de Brasil.

**Palabras clave:** ozono troposférico, aerosoles, quema de vegetación, contaminación del aire transfronterizo.

#### ABSTRACT

Biomass burning is the most important source of air pollution in the tropical region of the world. Specially, in the Amazon basin the pollution reaches thousand of kilometers, mainly, the related to burning in the region of Brasil, that could be transported by the predominant winds to the peruvian territory. This study presents evidences of the of the transboundary air pollution from Brasil to Peru and utilizes data from TOMS and MODIS satellites to evaluate and quantify air pollutants: tropospheric ozone and aerosols (particulate matter). This permitted to evaluate the seasonal variation in terms of tropospheric ozone, aerosol index (AI) and aerosol optical depth (AOD) taking as reference Huancayo city, over the Andean mountain, that could indicate the transport of the pollutants to the peruvian territory. The data showed maximum values during the late part of the dry season (August to November). This increase could not be explained only by the local biomass burnings, but it has additional influence of the transport of pollutants coming from Brasil.

**Key words:** tropospheric ozone, aerosols, biomass burning, transboundary air pollution.



#### ANEXO 4. ARTÍCULO CIENTÍFICO PRESENTADO POR MIELNICKI Y CALZIANI.

QUEMA DE BIOMASA EN SUDAMÉRICA: IMPACTOS REGIONALES Y GLOBALES;  
MIELNICKI, D.M.<sup>1</sup>, CANZIANI, P.O.<sup>1,2</sup>;  
1. PROGRAMA DE ESTUDIOS DE LOS PROCESOS ATMOSFÉRICOS EN EL CAMBIO GLOBAL / PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD CATÓLICA ARGENTINA, 2. CONICET;  
ARGENTINA;  
[dmielnicki@uca.edu.ar](mailto:dmielnicki@uca.edu.ar);  
CAP.GRAL. RAMÓN FREIRE 183; CP 1426; BUENOS AIRES.

Mediante mediciones satelitales se ha encontrado que en el mundo se producen 1.500.000 focos de incendios por año. En Sudamérica, durante los meses de agosto a octubre se detectan entre 1000 y 5000 focos de incendio cada día. Esta gran cantidad de incendios es la principal causa de contaminación del aire a escala regional y la principal fuente de gases de efecto invernadero en Sudamérica. Algunos incendios se realizan para la quema de pastizales y residuos agrícolas o por causas accidentales, pero una gran parte son para deforestación y desmonte por el avance de la frontera agropecuaria. Mientras que los efectos de los incendios en escala local son conocidos en mayor o menor grado: daños a los seres humanos y sus propiedades, daños a los animales, efectos sobre los suelos, los ecosistemas, la biodiversidad; hasta ahora prácticamente no se tienen en cuenta los impactos regionales y globales, cuyo estudio es reciente. Entre los impactos regionales se encuentra el transporte de contaminantes atmosféricos por los vientos a grandes distancias: el humo de incendios en Mato Grosso, Brasil y Bolivia, sumado al de incendios en Paraguay y Argentina puede llegar tan al sur como Bahía Blanca, Argentina. A partir de las emisiones de los incendios se genera ozono troposférico dañino, que afecta a la vegetación natural, los cultivos y a la salud humana y animal. El material particulado afecta el ciclo hidrológico y disminuye la radiación solar sobre los cultivos. El principal efecto global es la emisión de gases de efecto invernadero, que afecta al clima del planeta, lo cual produce cambios que a su vez pueden producir condiciones que favorezcan aún más la ocurrencia de incendios. Estos procesos se estudian mediante datos e imágenes satelitales. La difusión de estos impactos puede contribuir a la toma de conciencia necesaria para la prevención de incendios.

**ANEXO 5. TESIS PRESENTADA POR BENAVENTE.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

**FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS**

**E.A.P. DE FISICA**

**Estudio de la dinámica del espesor óptico de los  
aerosoles producido por las fuentes naturales y  
antropogénicas a partir de las imágenes del sensor modis  
a bordo del satélite terra y aqua sobre américa del Sur  
(2000-20012)**

**TESIS**

**Para optar el Título Profesional de Licenciado en Fisica Modalidad M1**

**AUTOR**

**Noelia Rojas Benavente**

## CONCLUSIONES

- Las imágenes de AOT procedentes del sensor MODIS (Terra y Aqua) presentan un aumento de concentración del espesor óptico de aerosol en la cuenca amazónica. Este aumento se debe a que en Brasil y Bolivia se detectan cientos de focos de incendios forestales en la temporada seca (agosto-noviembre) y más en el mes de setiembre. Su uso incluye la compensación de tierras agrícolas, la quema de residuos agrícolas, y el cambio de vegetación.
- Los datos AOT de las series de tiempo procedentes del sensor MODIS-Terra muestran una dinámica muy similar a los datos AOT procedente del MODIS-Aqua, teniendo picos máximos AOT cada año entre los meses de agosto a noviembre siendo la temporada seca. Estos picos máximos de AOT es la máxima concentración de aerosol sobre la cuenca amazónica. Esta máxima concentración o aumento de concentración de aerosol coincide con el inicio de incendios por los agricultores en la región amazónica, que es muy común durante la temporada seca, lo que también coincide con la menor capacidad para eliminar los contaminantes de las precipitaciones mínimas y por tanto una mayor probabilidad de que los contaminantes lleguen a mayores distancias.
- Los datos AOT obtenidos por la estación AERONET (Brasil y Bolivia) tienen una dinámica muy similar a los datos procedentes de sensor MODIS (Terra y Aqua), mostrando picos máximos en la temporada seca (agosto-noviembre) y picos mínimos en los meses entre enero a abril, teniendo resoluciones espaciales diferentes. Esta comparación entre dos diferentes métodos de obtener el AOT es consecuencia de los incendios forestales que se realizan en Brasil y Bolivia, que es una fuente muy importante para el origen de los aerosoles en la tropósfera de la cuenca Amazónica.

## ANEXO 6. ARTÍCULO DE DIVULGACIÓN PRESENTADA POR ALLISON.

### La deforestación de la Amazonia incrementa la contaminación en países de América del Sur

21 de agosto de 2014



Por Elton Alisson, desde Rio Branco (Acre)

Agência FAPESP – Los estados amazónicos brasileños de Pará, Rondônia, Amazonas y Acre han venido “exportado” el humo producto del desmonte con fuego hacia Bolivia, Perú y Paraguay, y han contribuido para que aumenten los niveles de polución atmosférica en esos países vecinos. Junto a Mato Grosso, esos cuatro estados también registran la mayor cantidad de focos de incendios de América del Sur.



El humo producido por el fuego en los estados brasileños amazónicos migra hacia Bolivia, Perú y Paraguay, elevando los niveles de polución atmosférica en esos países, según indica un estudio realizado en el Inpe (foto: Wikipedia/Nasa)

Esta constatación surge de un estudio realizado por científicos del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (Inpe) de Brasil, que utilizaron la supercomputadora Tupã, instalada en dicha institución con recursos de la FAPESP y del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (MCTI).

Algunos resultados de dicho estudio se dieron a conocer en una conferencia sobre el impacto trinacional de la quema de biomasa y del humo en la Amazonia Sudoccidental, realizada durante la 66ª Reunión Anual de la Sociedad Brasileña para el Progreso de la Ciencia (SBPC), que se extendió hasta el domingo 27 de julio, en el campus de la Universidad Federal de Acre (UFAC), en la localidad de Rio Branco.

“La mayor producción de humo resultante de incendios forestales en la América del Sur le corresponde a Brasil. El país realmente exporta humo de incendios y contamina a los demás países de la región”, declaró [Saulo Ribeiro de Freitas](#), investigador del Inpe, a Agência FAPESP.

De acuerdo con Freitas, los incendios forestales se registran en escala global. Con todo, en América del Sur pueden detectarse más de 5 mil focos de quemas durante un solo día.

Durante un mes, la acumulación de varios focos de incendios genera plumas de humo. Al ser transportadas por masas de aire producidas en la región norte y en el centro de Brasil, dichas plumas de humo llegan a la región sur de Sudamérica y pueden cubrir áreas de hasta 5 millones de kilómetros cuadrados, tal como se observó en imágenes de satélite.

“El tipo de circulación de aire predominante durante la estación seca en la región norte de Brasil hace que exista un corredor de exportación que canaliza el humo producido por los incendios en esa región hacia el oeste de América del Sur, invadiendo el área de Perú, Bolivia y Paraguay”, dijo Freitas.

**ANEXO 7. CALIBRACIÓN DEL FOTÓMETRO SOLAR UBICADO EN EL "LABORATORIO DE MICROFÍSICA ATMOSFÉRICA Y RADIACIÓN (LAMAR), OBSERVATORIO DE HUANCAYO, DEL INSTITUTO GEOFÍSICO DEL PERÚ".**

The inter-calibration of #890 (Huancayo-IGP) versus #814 was done on Jul 23, 2016. AOT data were reprocessed assuming linear interpolation between pre- and post-deployment calibrations from Oct 05, 2014 to Jul 23, 2016.

Since #890 (Huancayo-IGP) has been post-deployment calibrated and reprocessed, it is ready for evaluation to Level 2 status.

Device 890 - Installed a new Intercal vs. reference 814 with time stamp [23:07:2016,16:06:08]  
 Preceding Intercal with time stamp [05:10:2014,17:11:07] made by Tom Eck on [25:07:2016,20:58:57] vs. reference 126  
 New Intercal with time stamp [23:07:2016,16:06:08] made by Tom Eck on [25:07:2016,21:00:11] vs. reference 814  
 656 days or ~ 21 months since preceding calibration:

Wave	V0(new)	V0(prec)	Diff	Diff/Year
1020	489580.2	495144.5	-1.12%	-0.62%
1640	1072559.4	1081183.5	-0.80%	-0.44%
870	930503.0	942339.1	-1.26%	-0.70%
675	1043280.5	1058877.7	-1.47%	-0.82%
440	795941.3	808727.9	-1.58%	-0.88%
500	986875.3	999136.2	-1.23%	-0.68%
1020	626269.3	626377.8	-0.02%	-0.01%
935	788433.3	805250.9	-2.09%	-1.16%
380	137192.2	138814.8	-1.17%	-0.65%
340	38235.3	37516.8	1.92%	1.06%

## ANEXO 8. PÁGINA DE INVENTARIO DE FUEGOS.

ACOM ACRESP Las previsiones MOZART FINLANDÉS MOPITT IASI DC3 SEAC4RS KORUS-AQ

# ACRESP

### INVENTARIO DE FUEGO DE NCAR DATOS

Inventario de emisiones de fuego de NCAR (FINN) calculados en tiempo casi real basado en los recuentos de fuego de respuesta rápida MODIS de la NASA ( **empresas activas datos de incendios** ). Para las emisiones procedentes fechas más antiguas consulte el **sitio web de FINN** .

Inicio ACRESP

DC3 Haga clic para descargar los archivos a continuación.

Mapas del	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2016358.txt.gz</a>	12/23/2016 23:34:13	2MB
Secciones cruzadas	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2016359.txt.gz</a>	12/24/2016 23:33:53	2MB
	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2016360.txt.gz</a>	12/25/2016 23:34:09	2MB
parcelas MOPITT	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2016361.txt.gz</a>	12/26/2016 23:34:07	2MB
parcelas FINN	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2016362.txt.gz</a>	12/27/2016 23:34:13	2MB
datos FINN	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2016363.txt.gz</a>	12/28/2016 23:34:08	3 MB
	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2016364.txt.gz</a>	12/29/2016 23:33:37	2MB
trazado interactivo	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2016365.txt.gz</a>	12/30/2016 23:33:42	2MB
	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2016366.txt.gz</a>	12/31/2016 23:33:46	2MB
	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2017001.txt.gz</a>	01/01/2017 23:33:09	817Kb
	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2017002.txt.gz</a>	01/02/2017 23:33:37	929KB
	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2017003.txt.gz</a>	01/03/2017 23:34:06	2MB
	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2017004.txt.gz</a>	01/04/2017 23:33:34	2MB
	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2017005.txt.gz</a>	01/05/2017 23:34:19	3 MB
	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2017006.txt.gz</a>	01/06/2017 23:34:07	3 MB
	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2017007.txt.gz</a>	01/07/2017 23:34:00	2MB
	<a href="#">GLOB_SAPRC99_2017008.txt.gz</a>	01/08/2017 23:33:52	2MB

## ANEXO 9. PÁGINA DE DESCARGA DE DATOS DE AERONET

+ Inicio

Aerosol Optical Depth

+ AEROSOL/FLUX NETWORKS

+ CAMPAIGNS

+ COLLABORATORS

- DATA

+ LOGISTICS

+ NASA PROJECTS

+ OPERATIONS

+ PUBLICATIONS

+ SITE INFORMATION

+ STAFF

+ SYSTEM DESCRIPTION

ACCESO DE DATOS AERONET

HERRAMIENTA DE DATOS DE SINERGIA

+ Visualización de Datos

AEROSOL profundidad óptica (V3)

+ Visualización de Datos

+ Herramienta de Descarga

+ Servicio Web

AEROSOL profundidad óptica (V2)

+ Visualización de Datos

+ Herramienta de Descarga

+ Descargar todos los sitios

AERONET de datos herramienta de descarga Versión 2 Directo Sun Algoritmo [Cambiar a la versión 2 de Inversiones](#)

---

Haga clic región geográfica, País / Estado o AERONET sitio para cambiar la selección del sitio:

Región geográfica	Estado País	AERONET sitio
Sudamerica	Perú	Huancayo-IGP

---

Descarga de datos para Huancayo-IGP

Seleccione la hora de inicio y final del período de descarga de datos:

COMIENZO:	Día / Mes / Año	FIN:	Día / Mes / Año
	1 ENE 2015		31 DIC 2017

Las descripciones de datos      Unidades de datos

**Nota:** Los datos no están disponibles si el tipo de datos es *en cursiva*

Seleccione el tipo (s) de datos utilizando la casilla correspondiente:

Productos directos del sol	Seleccionar
Aerosol Optical Depth (AOD) con agua precipitable y Angstrom Parámetro	1.0 nivel <input type="checkbox"/> nivel 1.5 <input type="checkbox"/> 2.0 nivel <input type="checkbox"/>
Información de instrumento (por ejemplo, las longitudes de onda exactas) *	Fila india <input type="checkbox"/> Fusionarse con AOD <input type="checkbox"/>
La profundidad óptica total con los componentes *	1.0 nivel <input type="checkbox"/> nivel 1.5 <input type="checkbox"/> 2.0 nivel <input type="checkbox"/>
Espectral algoritmo de deconvolución (SDA) - Recuperaciones de imagen alta de AOD, de modo grueso de AOD, y la fracción fina Modo	1.0 nivel <input type="checkbox"/> nivel 1.5 <input type="checkbox"/> 2.0 nivel <input type="checkbox"/>

Formato de datos

todos los Puntos  
  Promedios diarios  
  Promedios mensuales

Sólo \* Todos los Puntos de formato

## ANEXO 10. DATOS DE AOD DE LOS MESES EN ESTUDIO.

Tabla 9: Datos de AOD del mes de julio de 2015.

Date(dd-mm-yy)	AOD_440
01/07/2015	0.123
02/07/2015	0.107
03/07/2015	0.097
04/07/2015	0.089
05/07/2015	0.058
06/07/2015	0.055
07/07/2015	0.046
08/07/2015	0.069
09/07/2015	0.076
10/07/2015	0.083
11/07/2015	0.076
12/07/2015	0.081
13/07/2015	0.109
14/07/2015	0.121
15/07/2015	0.091
16/07/2015	0.077
17/07/2015	0.092
18/07/2015	0.067
19/07/2015	0.078
20/07/2015	0.075
21/07/2015	0.088
22/07/2015	0.094
23/07/2015	0.095
24/07/2015	0.096
25/07/2015	0.085
26/07/2015	0.076
27/07/2015	0.095
28/07/2015	0.104
29/07/2015	0.137
30/07/2015	0.180
31/07/2015	0.240



**Tabla 10. Datos de AOD del mes de agosto de 2015**

<b>Date(dd-mm-yy)</b>	<b>AOD_440</b>
01/08/2015	0.162
02/08/2015	0.174
03/08/2015	0.163
04/08/2015	0.163
05/08/2015	0.169
06/08/2015	0.154
15/08/2015	0.104
16/08/2015	0.068
17/08/2015	0.052
18/08/2015	0.050
19/08/2015	0.093
20/08/2015	0.121
21/08/2015	0.088
22/08/2015	0.126
23/08/2015	0.154
24/08/2015	0.117
25/08/2015	0.176
26/08/2015	0.152
27/08/2015	0.184
28/08/2015	0.252
29/08/2015	0.147
30/08/2015	0.117
31/08/2015	0.275

**Tabla 11. Datos de AOD del mes de agosto de 2015**

<b>Date(dd-mm-yy)</b>	<b>AOD_440</b>
01/01/2016	0.126
02/01/2016	0.044
03/01/2016	0.047
04/01/2016	0.028
05/01/2016	0.028
06/01/2016	0.023
07/01/2016	0.031
08/01/2016	0.059
09/01/2016	0.056
10/01/2016	0.060
12/01/2016	0.061
13/01/2016	0.044
14/01/2016	0.050
15/01/2016	0.089
16/01/2016	0.057
18/01/2016	0.059
20/01/2016	0.182
21/01/2016	0.058
22/01/2016	0.090
23/01/2016	0.061
24/01/2016	0.077
25/01/2016	0.117
27/01/2016	0.155
28/01/2016	0.120
29/01/2016	0.080
30/01/2016	0.112
31/01/2016	0.241

## ANEXO 11. CONFIGURACIÓN PARA EL MODELAMIENTO

Cuadro 1: Descripción de la física del modelo

```
&time_control
run_days                = 0,
run_hours               = ,
run_minutes            = 0,
run_seconds            = 0,
start_year             = 2015, 2015, 2015,
start_month            = 08, 01, 01, 01, 01,
start_day              = 12, 06, 06, 06, 06,
start_hour             = 00, 00, 06, 06, 06,
start_minute           = 00, 00, 00, 00, 00,
start_second           = 00, 00, 00, 00, 00,
end_year               = 2015, 2015, 2015,
end_month              = 08, 08, 01, 01, 01,
end_day                = 15, 12, 08, 08, 08,
end_hour               = 00, 00, 12, 12, 12,
end_minute             = 00, 00, 00, 00, 00,
end_second             = 00, 00, 00, 00, 00,
interval_seconds       = 10800
input_from_file        =
.true.,.true.,.true.,.true.,.true.,
fine_input_stream      = 0, 2, 2, 2, 2,
history_interval       = 180, 60, 60, 60, 60,
frames_per_outfile    = 1000, 1000, 1000, 1000,
1000,
restart                = .false.,
restart_interval       = 5000,
auxinput5_interval_m  = 60,      ! para lectura
de los archivos de emision
io_form_history        = 2
io_form_restart        = 2
io_form_input          = 2
io_form_boundary       = 2
io_form_auxinput2      = 2
io_form_auxinput5     = 2      ! para lectura
de los archivos de emision
debug_level            = 0
/
```

```

&domains
  time_step                = 180,
  time_step_fract_num     = 0,
  time_step_fract_den    = 1,
  max_dom                 = 1,
  e_we                   = 90, 94, 121, 49, 40,
  e_sn                   = 90, 64, 106, 40, 40,
  e_vert                 = 32, 40, 40, 40, 40,
  num_metgrid_levels     = 24,
  num_metgrid_soil_levels = 4,
  dx                     = 30000, 8000, 3000,
  dy                     = 30000, 8000, 3000,
  grid_id                = 1, 2, 3, 4,
  parent_id              = 0, 1, 2, 3,
  i_parent_start         = 1, 5, 8, 11,
  j_parent_start         = 1, 9, 7, 16,
  parent_grid_ratio      = 1, 3, 3, 3,
  parent_time_step_ratio = 1, 3, 3, 3,
  feedback               = 0,
  smooth_option          = 0
  p_top_requested        = 10000,

/

  &physics
  mp_physics              = 2, 2, 2, 2,
  ra_lw_physics           = 4, 4, 4, 4,
  ra_sw_physics           = 4, 4, 4, 4,
  radt                    = 12, 4, 2,
  sf_sfclay_physics      = 7, 7, 7, 7,
  sf_surface_physics     = 2, 2, 2, 2,
  bl_pbl_physics         = 7, 7, 7, 7,
  bldt                    = 0, 0, 0, 0,
  cu_physics              = 3, 3, 1, 1,
  cudt                    = 0, 0, 0, 0,
  cu_diag                 = 1,
  isfflx                  = 1,
  ifsnow                  = 0,
  icloud                  = 1,
  surface_input_source   = 1,
  num_soil_layers        = 4,
  sf_urban_physics       = 0,
  maxiens                 = 1,
  maxens                  = 3,
  maxens2                 = 3,
  maxens3                 = 16,
  ensdim                  = 144,

/

```

```

fdda
/

&dynamics
w_damping           = 0,
diff_opt            = 1,
km_opt              = 4,
diff_6th_opt        = 0,    0,    0,
0,
diff_6th_factor     = 0.12, 0.12, 0.12,
0.12,
base_temp           = 290.
damp_opt            = 0,
zdamp               = 5000.,5000.,5000.,
5000.,
dampcoef            = 0.01,0.01,0.01,0.01,
khdif               = 0,    0,    0,
0,
kvdif               = 0,    0,    0,
0,
non_hydrostatic     = .true., .true., .true.,
.true.,
moist_adv_opt        = 1,    1,    1,    1,
scalar_adv_opt       = 1,    1,    1,
1,
/

&bdy_control
spec_bdy_width      = 5,
spec_zone            = 1,
relax_zone           = 4,
specified            = .true.,
.false.,.false.,.false.,
nested               = .false., .true.,
.true., .true.,
/

&grib2
/
&fire
ifire                =0,
/

&scm
/

&chem
kemit                = 2,                ! Depende
del parametro n_lev en el archivo mlv.ncl. Aqui vamos a
considerar apenas 2 niveles
chem_opt             = 2, 2, ! 2 = RADM2/MADE-
SORGAM
bioemdt              = 30, 30,
photdt               = 30, 30,
chemdt               = 1.0, 2.0,
io stvle emissions   = 2,    ! 1 Para usar 2

```

```

archivos de emisiones: wrfchemi_00z_d01 y wrfchemi_12z_d01
  emiss_inpt_opt           = 1, 1,      ! 1 =
RADM2/SORGAM
  emiss_opt                = 3, 3,      ! 3 =
RADM2/MADE-SORGAM
  chem_in_opt              = 0, 0,      ! Para utilizar
perfiles idealizados
  phot_opt                 = 2, 1,      ! Esquema de
fotolisis Fast-J
  gas_drydep_opt           = 1, 1,
  aer_drydep_opt           = 1, 1,
  bio_emiss_opt            = 1, 1,
  dust_opt                 = 0,
  dmsemis_opt              = 0,
  seas_opt                 = 0,
  gas_bc_opt               = 1, 1,
  gas_ic_opt               = 1, 1,
  aer_bc_opt               = 1, 1,
  aer_ic_opt               = 1, 1,
  gaschem_onoff            = 1, 1,
  aerchem_onoff            = 1, 1,
  wetscav_onoff            = 0, 0,
  cldchem_onoff            = 0, 0,
  vertmix_onoff            = 1, 1,
  chem_conv_tr             = 0, 1,
  biomass_burn_opt         = 3, 0,
  plumerisefire_frq       = 180, 30,
  aer_ra_feedback          = 0, 0,
  have_bcs_chem            = .false., .false.,
/

&dft_control
dft_opt                    =0,
dft_nfilter                =0,
dft_write_filtered_input   =.false.,
dft_write_dft_history      =.false.,
/

&namelist_quilt
nio_tasks_per_group = 0,
nio_groups = 1,
/

```

**Cuadro 2: Configuración geográfica del área de trabajo**

```
&share
  wrf_core = 'ARW',
  max_dom = 1,
  start_date = '2015-12-26_00:00:00','2015-12-
26_00:00:00','2015-12-26_00:00:00',
  end_date   = '2015-12-27_00:00:00','2015-12-
27_00:00:00','2015-12-27_00:00:00',
  interval_seconds = 10800
  io_form_geogrid = 2,
/

&geogrid
  parent_id           = 0, 1, 2,
  parent_grid_ratio  = 1, 4, 4,
  i_parent_start     = 1, 11, 24,
  j_parent_start     = 1, 20, 22,
  e_we              = 90, 201, 161,
  e_sn              = 90, 201, 161,
  geog_data_res      = '10m','10m','10m',
  dx = 30000,
  dy = 30000,
  map_proj = 'mercator',
  ref_lat  = -12.0,
  ref_lon  = -76.8,
  truelat1 = -12.0,
  stand_lon = -76.8,
  geog_data_path = '/home/wrf/DATA/GEOG/'
/

&ungrib
  out_format = 'WPS',
  prefix = 'GFS',
/

&metgrid
  fg_name = 'GFS'
  io_form_metgrid = 2,
/
```