

UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL



**“EVALUACIÓN DE LA VARIABILIDAD DE LA PROFUNDIDAD
ÓPTICA DE AEROSOLES EN PERÚ DEL 2015 AL 2019”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR EL BACHILLER

QUIÑONES MALCOHACCHA, FIORELLA

Villa El Salvador

2020

DEDICATORIA

A Dios, por guiar mis pasos y su bendición.
A mis padres Silvia y Vile, por su amor y apoyo incondicional, son mi motivación de ser mejor cada día. Con quienes comparto este logro en recompensa a la dedicación que impartieron en mi educación, valores y principios.

AGRADECIMIENTO

A los destacados profesores de la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur de la Escuela de Ingeniería ambiental por sus conocimientos, dedicación y enseñanzas brindadas, fundamental en mi formación profesional.

De forma especial un agradecimiento al Ph.D. Odón Sánchez Ccoyllo promotor de la investigación y desarrollo universitario en la UNTELS, asesor a cargo de este trabajo por su tiempo, aportes académicos, criterio y su brillantez.

Al sistema en línea GIOVANNI mantenido y desarrollado por la NASA GES DISC, ya que la recolección de datos fue producida con el sistema. También, al Laboratorio de Recursos del Aire (ARL) de la NOAA por la disposición del modelo HYSPLIT empleado en este trabajo.

A aquellas personas quienes influyeron positivamente en mí y están siempre conmigo, son mi soporte e impulso necesario en mi vida.

ÍNDICE

RESUMEN	1
I. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Objetivos	3
1.1.1. Objetivo general.....	3
1.1.2. Objetivos específicos.....	3
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	4
2.1. Bases teóricas.....	4
2.1.1. Antecedentes.....	4
2.1.2. Contaminación atmosférica	7
2.1.3. Aerosol atmosférico	12
2.1.4. Profundidad óptica de aerosol	15
2.1.5. Sensor MODIS.....	16
2.1.6. Software Giovanni	18
2.1.7. Trayectorias de masas de aire	18
2.2. Definición de términos básicos.....	20
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL TRABAJO PROFESIONAL	21
3.1. Delimitación temporal y espacial del trabajo	21
3.1.1. Temporal	21
3.1.2. Espacial	21
3.2. Determinación y análisis del problema.....	21
3.2.1. Formulación del problema	22
3.3. Modelo de solución propuesto	22
3.3.1. Selección del área de estudio.....	23

3.3.2. Recolección de datos AOD.....	25
3.3.3. Análisis de los datos	27
3.3.4. Cálculo de trayectorias de masas de aire.....	27
3.4. Resultados	28
IV. CONCLUSIONES	44
V. RECOMENDACIONES.....	45
VI. BIBLIOGRAFÍA	46
VII. ANEXOS.....	49

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Procesos de la contaminación atmosférica	10
<i>Figura 2.</i> Diagrama de actividades	23
<i>Figura 3.</i> Área de estudio	24
<i>Figura 4.</i> Área delimitada en el sistema Giovanni	25
<i>Figura 5.</i> Descripción del producto MYDO8_D3 v6.1	26
<i>Figura 6.</i> Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2015 al 31/12/2015	28
<i>Figura 7.</i> Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2016 al 31/12/2016	29
<i>Figura 8.</i> Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2017 al 31/12/2017	30
<i>Figura 9.</i> Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2018 al 31/12/2018	31
<i>Figura 10.</i> Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2019 al 31/12/2019	32
<i>Figura 11.</i> Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2015 al 31/12/2019	33
<i>Figura 12.</i> Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2015 al 31/12/2019, valores máximos.....	34
<i>Figura 13.</i> Proceso de la trayectoria de masas de aire	35
<i>Figura 14.</i> Trayectoria 11 de setiembre del 2016 en el modelo HYSPLIT	36
<i>Figura 15.</i> Trayectoria 11 de setiembre del 2016	37
<i>Figura 16.</i> Trayectoria 23 de setiembre del 2017 en el modelo HYSPLIT	38
<i>Figura 17.</i> Trayectoria 23 de setiembre del 2017	39
<i>Figura 18.</i> Trayectoria 10 de setiembre del 2018 en el modelo HYSPLIT	40
<i>Figura 19.</i> Trayectoria 10 de setiembre del 2018	41
<i>Figura 20.</i> Trayectoria 14 de agosto del 2019 en el modelo HYSPLIT	42
<i>Figura 21.</i> Trayectoria 14 de agosto del 2019	43

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 <i>Fuentes de contaminación atmosférica antropogénicas</i>	8
Tabla 2 <i>Fuentes de contaminación atmosféricas naturales</i>	9
Tabla 3 <i>Tamaño de partículas en función a la salud humana</i>	13
Tabla 4 <i>Valores de AOD</i>	15
Tabla 5 <i>Generalidades del satélite Terra</i>	17
Tabla 6 <i>Generalidades del satélite Aqua</i>	17
Tabla 7 <i>Descripción de datos AOD</i>	26
Tabla 8 <i>Descripción de los parámetros en HYSPLIT</i>	27

RESUMEN

El presente trabajo de suficiencia profesional evaluó la variabilidad temporal de la Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD) en Perú del 2015 hasta el 2019 que permitió obtener una visión general de la calidad de aire en el país, ya que la AOD es un valor proporcional a la concentración de aerosoles presentes en la atmósfera.

Para el cumplimiento del trabajo se desarrolló la siguiente metodología: i) selección del área de estudio, el cual comprende el Perú; ii) recolección de datos de promedios diarios de la AOD de los algoritmos *Combined Dark Target and Deep Blue*, producto MYD08_D3 v6.1 obtenidos del sistema en línea Giovanni, sensor MODIS, satélite *Aqua*, resolución espacial de $1^{\circ} \times 1^{\circ}$, resolución temporal diaria y longitud de onda de 550 nm; iii) análisis de la variabilidad temporal diaria de AOD a través de series de tiempo; iv) identificación de los valores máximos de AOD; v) finalmente el cálculo de las trayectorias a partir del modelo HYSPLIT para los valores máximos.

Los resultados obtenidos validan que en Perú en el año 2015 la atmósfera tiene una tendencia buena, mientras que del 2016 al 2019 tendencia a contaminada. Los valores de AOD varían entre 0.05 a 0.9 del 2015 al 2019, presentando 4 valores máximos: 0.8 para el 11 de setiembre del 2016, 0.9 para el 23 de setiembre del 2017, 0.6 para el 10 de setiembre del 2018 y 0.7 para el 14 de agosto del 2019, representan la máxima concentración de aerosoles en la atmósfera. Por otro lado, el transporte de masas de aire con alta carga de aerosoles se origina en Madre de Dios, Pasco, Ucayali y Huánuco.

Es necesario seguir promoviendo acciones por parte de las competentes autoridades del estado peruano para abordar las causas de la contaminación atmosférica por aerosoles, por lo que es nocivo para la salud de los peruanos y el ambiente.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, la contaminación atmosférica se ha convertido en uno de los mayores problemas ambientales principalmente por aerosoles a causa de un rápido desarrollo económico, actividades industriales y humanas. Las emisiones producidas por fuentes naturales o antropogénicas son transportadas bajo la influencia del viento desde su lugar de origen a distintos puntos (Calvo, Molina, y Salvachúa, 2009). Los aerosoles son partículas sólidas y líquidas suspendidas en la atmósfera que afectan la calidad del aire reduciendo la visibilidad en días contaminados (Morales y Leiva ,2006).

Los satélites de teledetección permiten conseguir información de cualquier objeto sin contacto directo, la medición por sensor y satélite a través de MODIS-*Aqua* permite recolectar los valores de la Profundidad Óptica de Aerosoles. Esta variable adimensional representa la concentración total de partículas entre un satélite y la superficie terrestre (SERVIR, 2009).

En la actualidad, es más frecuente el uso de información satelital para el análisis de aerosoles por la observación continua y fácil acceso, presentando resultados satisfactorios. En la investigación se utilizó el sistema en línea Giovanni, proporciona gran cantidad de datos científicos de los sensores que observan la Tierra entre ellos el sensor MODIS a bordo del satélite *Aqua* y a fin de complementar la investigación se usó el modelo HYSPLIT para el transporte de aerosoles.

Esta investigación presenta la evaluación temporal de la variabilidad de la Profundidad Óptica de Aerosoles del 2015 al 2019. El desarrollo de la investigación comprende siete capítulos: el primero detalla la introducción y objetivos, el segundo el desarrollo del marco teórico, el tercero describe el planteamiento del problema y modelo de solución propuesto. Finalmente, los capítulos IV, V, VI y VII se presentan los resultados, conclusiones, recomendaciones, referencias y anexos. Se espera que los resultados alcanzados sirvan como punto de referencia para comprender la contaminación atmosférica por aerosoles y se tomen las acciones necesarias para mejorar la calidad del aire del Perú en beneficio de la población y el ambiente.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo general

Evaluar la variabilidad temporal de la Profundidad Óptica de Aerosoles en el Perú del 2015 al 2019.

1.1.2. Objetivos específicos

- Analizar la variabilidad temporal diaria de la Profundidad Óptica de Aerosoles en el Perú durante el período del 2015 al 2019.
- Identificar los valores máximos de la Profundidad Óptica de Aerosoles durante el período del 2015 al 2019.
- Determinar las zonas de origen de la Profundidad Óptica de Aerosoles a través de trayectorias de masas de aire para los valores máximos.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas

2.1.1. Antecedentes

Llorente (2017) desarrolló la investigación: *Evaluación de la variabilidad espaciotemporal de la profundidad óptica de aerosoles en la zona carbonífera del Cesar a partir de observaciones satelitales*. En la Universidad Nacional de Colombia para optar por el título de Magíster en Geomática, la cual concluye que:

En la investigación se evaluó la Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD) en Bogotá, Puerto Gaitán, Zona Carbonífera del Cesar (ZCC) y Medellín del 2012 al 2015. El análisis determinó una sobreestimación en las observaciones de AOD del sensor MODIS aproximadamente de 77 % en Bogotá, 37 % en Puerto Gaitán y 21 % en Medellín a causa de la presencia de nubes y características del producto que observa más ruido en los cálculos de reflectancia de la superficie, para los datos recolectados por el fotómetro un 8 % en ZCC. Los valores de 0.2 corresponden a una atmósfera limpia, si el valor incrementa se relaciona a actividades que pueden deteriorar la calidad del aire. La variación temporal y distribución espacial de la AOD en la ZCC tuvieron valores altos (> 0.4) en marzo, abril y mayo. Esto se interpreta que puede haber impactos no significativos en relación a la calidad del aire, pero si puede haber impactos al ciclo hidrológico y el clima.

Céspedes, Cuero y Hernández (2015) realizaron la investigación: *Metodología para medir las concentraciones de aerosoles atmosféricos usando técnicas de teledetección*. En la Universidad Pontificia Bolivariana, la cual presenta las principales conclusiones:

La presente investigación desarrolló una metodología para el uso de sensores *Terra* MODIS, concluyendo que este sensor tiene una alta capacidad de resolución espectral para estudios atmosféricos. En consecuencia, se confirma que el uso de sensores resulta un método útil y versátil, el cual complementa al monitoreo tradicional de la

calidad del aire. Las imágenes recolectadas de MODIS se utilizan para realizar series de tiempo del Espesor Óptico de Aerosoles para un período de estudio (2011-2012). Conforme al análisis de la data recolectada a través de las imágenes MODIS, mostraron que la concentración de PM10 no ha aumentado ni disminuido de forma relevante, es decir la quema de caña aporta significativamente a la concentración de material particulado en el área de estudio, pero no se relaciona como un patrón para estudios de calidad del aire.

Chacón (2015) realizó la investigación titulada: *Efecto de los incendios forestales sobre la calidad del aire en dos ciudades colombianas*. En la Universidad Nacional de Colombia para optar por el título de Magister en Ingeniería Ambiental, la cual presenta las siguientes conclusiones:

Existe una relación directa y clara entre el material particulado (PM2.5 y PM10) y el número de incendios forestales en Bucaramanga, Bogotá y Medellín, mientras que para el número de incendios forestales y las concentraciones de monóxido de carbono no se encuentra relación. Esta investigación señala que los grandes incendios forestales suceden en las épocas secas y coincide con sucesos de bajas precipitaciones. Del análisis del modelo HYSPLIT se encontró que las masas de aire que tienen como destino a estas tres ciudades se originan en las sabanas venezolanas y el Orinoco, por ello es probable que calidad del aire de esta región se vea afectada por la quema de biomasa que se da en la época seca. Es fundamental aclarar las causas de estos incendios forestales, además es necesario realizar investigaciones a detalle para confirmar los resultados obtenidos.

Núñez (2017) realizó la investigación: *Caracterización de la variación diurna, mensual y estacional del espesor óptico de aerosoles, registrados en el observatorio de Huancayo, período marzo-2015 hasta julio-2016*. En la Universidad Continental para optar el título de Ingeniera Ambiental, la cual concluye que:

El análisis de medias diarias del EOA demuestra que en el 2015 el mayor valor registrado fue el 1 de setiembre y el menor 25 de diciembre para longitudes de onda (500 y 440 nm); el 2016 el mayor valor fue el 6 de marzo a 500 nm, el 31 de enero a

440 nm y el menor 8 de marzo para ambas longitudes de onda. El análisis estacional del EOA demuestra períodos de concentraciones bajas en verano y otoño, de alta carga se presentan en primavera e invierno. El estudio de medias mensuales del EOA demuestra aerosoles de tipo marítimo y continental considerándose estos aerosoles como los de fondo, desde julio a noviembre del año 2015 muestra aerosoles de tipo contaminado en relación con la quema de biomasa. En el período de agosto a octubre se registran los valores más altos de EOA, resultando el mes de septiembre el de mayor valor.

Cholan (2016) realizó la investigación: *Distribución espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles y del monóxido de carbono en el Perú relacionado con las quemadas de biomasa (2002-2014)*. En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos para optar por el título de Licenciado en Física, la cual concluye que:

Se analizó la distribución espacial y temporal de los promedios mensuales del espesor óptico de aerosoles (EOA) y monóxido de carbono (CO), en relación con la combustión de biomasa que sucede en la Selva. Se registraron los datos de los sensores MODIS *Terra* y AIRS *Aqua* a resolución espacial de $1^\circ \times 1^\circ$. Los promedios mensuales entre 2002 y 2014 de las concentraciones de CO y EOA tienen relación con la quema de biomasa en agosto y setiembre, los mayores valores de EOA se dan en estos meses para los años 2004, 2005, 2007 y 2010; en Loreto se ve influenciado por quemadas en Ucayali y Madre de Dios, a causa del transporte por los vientos alisios provenientes de quemadas en Brasil, del Norte Amazónico de Bolivia y Paraguay. En las regiones de las Costas se ve sutilmente influenciada por la quema en la selva, mientras que en Lima y Tacna no parecen tener relación.

Rojas (2014) realizó la investigación: *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 (2000-2012)*. En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos para optar por el título de Licenciado en Física Modalidad M1, la cual concluye que:

La serie de tiempos AOT MODIS del satélite *Terra* tiene valores entre 0.0 - 0.499, AOT MODIS de *Aqua* tiene valores entre 0.0 - 0.493 y AOT AERONET en las cuatro estaciones de Brasil registra valores altos en la estación seca (agosto-noviembre) y mínimos entre enero y abril, en las estaciones de Chile y Bolivia se registra una variación estacional muy distinta a los datos AOT MODIS. Las imágenes de AOT MODIS del satélite *Terra* y *Aqua* muestran un aumento de concentración en la cuenca amazónica debido a incendios forestales en la estación seca en Brasil y Bolivia siendo más notorio en el mes de setiembre, teniendo también picos máximos. Los datos AOT MODIS ubicado en la misma región que la estación AERONET (Arica-Chile) coinciden con picos mínimos en junio a septiembre (temporada fría).

2.1.2. Contaminación atmosférica

El aire según Calvo et al. (2009) se entiende como un conjunto homogéneo de gases que componen la atmósfera, es necesario para el desarrollo de vida puesto que es el recurso natural que mayor intercambio tiene con la biosfera y los seres vivos aeróbicos son más dependientes de este recurso. Por lo tanto, es un recurso que debemos aprovechar de manera correcta para evitar modificaciones en su calidad que pongan en peligro el equilibrio biológico del planeta Tierra.

La contaminación atmosférica según plantea De Nevers (1998) es la presencia de toda aquella sustancia indeseable y/o nociva presentes en altas cantidades en el aire, de tal forma que puedan provocar efectos nocivos a las personas o al ambiente. Las sustancias indeseables es decir los contaminantes pueden perjudicar los bienes, el ambiente, la vegetación, la salud de las personas, así como producir cambios en la visibilidad que tienden a ser de color brumoso o café y olores desapacibles.

Fuentes de contaminación atmosférica

Respecto a su origen Calvo et al. (2009) hace referencia que las fuentes de contaminación atmosférica (fuentes emisoras) se clasifican en dos tipos, antropogénicas y naturales:

Antropogénicas: Es el resultado de la existencia y actividades del ser humano. Se resaltan las siguientes en la Tabla 1.

Tabla 1
Fuentes de contaminación atmosférica antropogénicas

Fuentes de contaminación	Descripción
Hogar	Uso de calefacciones y aparatos domésticos que emplean combustibles fósiles como carbón, petróleo y gas.
Transporte	El automóvil, avión, ferrocarril y la navegación, va a depender de la clase de combustible, tipo de motor, empleo de catalizadores y densidad del tráfico.
Industria	Actividades como centrales térmicas, cementeras, siderometalúrgicas, papeleras y químicas son las más contaminantes.
Agricultura y ganadería	Uso de fertilizantes, el empleo de amplias superficies de regadío y el ganado vacuno provocan gases de efecto invernadero, como el metano (CH ₄).
Residuos sólidos	Mediante los procesos de incineración en su eliminación.

Fuente: Calvo et al. (2009)

En los países desarrollados De Nevers (1998) indica que las principales fuentes de estos contaminantes son actividades humanas, relacionadas con nuestro nivel de vida. La eliminación de estas actividades conduciría a una decadencia fundamental en el nivel de vida de las personas por lo que estas acciones rara vez se toman en cuenta, la solución sugerida es seguir con estas actividades y monitorear las emisiones de los contaminantes.

Naturales: Abarca las fuentes de contaminación causadas por la actividad natural de la biosfera, la geósfera, la hidrosfera y la atmósfera. En se resaltan las siguientes la Tabla 2.

Tabla 2
Fuentes de contaminación atmosféricas naturales

Fuentes de contaminación	Descripción
Erupciones volcánicas	Proporciona a la atmósfera compuestos de azufre (SO ₂ , H ₂ S) y partículas que se dispersan por acción del viento.
Incendios forestales	Aquellos que se generan de forma natural emiten altas concentraciones de CO ₂ , óxidos de nitrógeno, humo, polvo y cenizas.
Actividades de los seres vivos	Procesos como la respiración incrementa la cantidad de CO ₂ , reproducción - floración en plantas (las que polinizan a través del aire) y la descomposición anaerobia (fermentación) de la materia orgánica genera metano (CH ₄).
Descargas eléctricas	Generadas durante las tormentas y que dan lugar a la formación de óxidos de nitrógeno al oxidar el nitrógeno atmosférico.
El mar	Emite a la atmósfera aerosoles salinos.
Vientos fuertes o vendavales	Transfieren a otras zonas partículas de las regiones áridas.

Fuente: Calvo et al. (2009)

Dispersión de los contaminantes en la atmósfera

La dispersión depende de diversos componentes que participan en los procesos de contaminación en la atmósfera, como en la *Figura 1* se puede observar.



Figura 1. Procesos de la contaminación atmosférica

Fuente: Calvo et al. (2009)

De acuerdo a Calvo et al. (2009) el proceso empieza con la emisión, la transformación de los contaminantes sigue a través de los procesos de transporte, difusión, mezcla o acumulación. Las reacciones químicas conducen a la evolución de los contaminantes, ya que la atmósfera es un medio oxidante por contener sustancias químicas y recibir energía solar. El final de estos procesos determina el valor de inmisión de un determinado contaminante, permitiendo indicar la calidad del aire.

Calvo et al. (2009) da a conocer los factores que contribuyen en los procesos de dispersión de los contaminantes, las cuales son:

Características de las emisiones: Abarca el tipo de contaminante (partícula o gas), características fisicoquímicas (temperatura de emisión y velocidad de salida, ya que a más velocidad mayor probabilidad de traspasar las capas de inversión) y concentración. Se toma en cuenta la altura del foco emisor dado que, a más altura mayor probabilidad de pasar capas de inversión y favorecer la dispersión.

Condiciones atmosféricas: Estas establecen el estado y movimiento de las masas de aire, determinando la inestabilidad o estabilidad atmosférica. Resaltan las siguientes:

- *Gradientes verticales de temperatura:* Establecen los movimientos de las masas de aire y las determinaciones de inestabilidad o estabilidad atmosféricas. Estas consiguen llevar a sucesos de inversión térmica, la cual entorpece la dispersión de los contaminantes.
- *Vientos:* Elemento fundamental por sus características respecto a los contaminantes como la dirección (hacia donde se pueden movilizar), velocidad (a más velocidad, mayor dispersión) y turbulencia (genera una acumulación).
- *Precipitaciones:* Esta condición ocasiona un lavado en la atmósfera arrastrando gran parte de los contaminantes a la superficie terrestre. Cuando sucede en bajas presiones facilitan a la dispersión de estos.
- *Insolación:* Facilita las reacciones entre los contaminantes primarios y secundarios, incrementando la concentración de los mismos.

Características topográficas y geográficas: Contribuyen en el movimiento de las masas de aire. La ocurrencia de este fenómeno varía según la zona en que se origina, como:

- *Zonas costeras:* En las mañanas, los sistemas de brisas marinas movilizan los contaminantes hacia el interior. Por la noche, se invierte la circulación de las mismas y los contaminantes se movilizan hacia el mar en un movimiento cíclico que sucede todos los días.
- *Zonas montañosas:* Impide el movimiento de las masas de aire, facilitando la acumulación y dificultando la dispersión de los contaminantes. En las mañanas se produce una corriente ascendente de aire caliente, este se moviliza desde el valle en dirección a las cumbres, en tanto en el fondo del valle se aglomera una masa de aire frío. En la noche la temperatura es inferior en las laderas y se produce una corriente descendente de aire frío desde las cumbres en dirección al valle, en ambos se da una inversión térmica.
- *Presencia de masas vegetales:* Absorben el CO₂ al llevar a cabo la fotosíntesis comportándose como un sumidero, reducen la velocidad del viento y estos facilitan la deposición de los contaminantes quedando atrapados en las hojas.

Presencia de núcleos urbanos: Interviene en el movimiento de las masas de aire, reduciendo o minimizando su velocidad y produciendo turbulencias. El efecto isla de calor hace la temperatura dentro de la ciudad mayor que en su exterior. Estos facilitan la aparición de movimientos cíclicos de las masas de aire frío del exterior y brisas urbanas, que favorecen a la formación de una cúpula dificultando la dispersión de los contaminantes.

2.1.3. Aerosol atmosférico

El término aerosol proviene del griego *sol* que significa suelo y *aero* que significa aire, también llamado comúnmente partículas se refiere a aquellas que están en estado líquidas y/o sólidas las cuales se encuentran suspendidas en el aire, se mantienen el tiempo necesario facilitando su medida y observación. Se integran a la atmósfera a través de diversas fuentes naturales o antropogénicas, de este modo van evolucionando en función del tamaño, forma y composición química (Morales y Leiva, 2006).

Tamaño: De acuerdo a Carnicer (2008) los aerosoles pueden variar en un rango de 0.1 μm y 1000 μm , algunas se encuentran fuera de este rango. Respecto a las partículas de tamaño menor a 0,1 μm se comportan de manera semejante al de las moléculas. En su desplazamiento se originan choques entre ellas formando agregados de superior tamaño a este suceso se denomina coagulación. En cambio, las mayores de 1 μm se comportan distinto al soportar una significativa deposición gravitacional (materia sedimentable), resultando baja su tasa de coagulación.

Las partículas inferiores de 10 μm suelen constituir suspensiones estables en el aire, persistiendo en la atmósfera a lo largo de períodos de tiempo (días o semanas), favoreciendo el transporte a largas distancias por acción del viento. Al contrario, las mayores de 10 μm se encuentran en suspensión en el aire por períodos de tiempo limitados como efecto de altas tasas de materia sedimentable.

El tamaño está sujeto tanto del período de tiempo que se encuentra en la atmósfera y de lo fácil que ingresa al aparato respiratorio (Carnicer, 2008). En la Tabla 3 se considera lo siguiente en función a la salud humana:

Tabla 3
Tamaño de partículas en función a la salud humana

Partículas	Tamaño
Inhalables o totales	Menos de 100 μm , ingresan al aparato respiratorio a través de la nariz o boca.
Torácicas	Menos de 10 μm , ingresan más allá de la tráquea y laringe.
Respirables	Menos de 2.5 μm , ingresan a la región no ciliada o alveolar.

Fuente: Manahan (2007)

Forma: Las partículas sólidas adoptan las formas de astillada (polvo de cemento), rectangular (cuarzo y polvos mineral), laminar (bronce, mica) y esférica (polen, negro de humo). Mayormente las líquidas son esféricas (Carnicer, 2008).

Composición química: Depende de su procedencia. Las partículas de polvo del suelo comprenden su composición de silicio, aluminio y calcio; el humo de la quema de residuos sólidos, carbón, madera y petróleo, comprenden compuestos orgánicos, presentándose también en polvos de insecticidas y en diversos productos de la industria alimentaria y química. En la quema del carbón se liberan los oligoelementos que contiene, que forman parte de las partículas que se liberan a la atmósfera, frecuentemente en modo de óxidos (Carnicer, 2008).

Propiedades ópticas de aerosoles

Las propiedades ópticas de los aerosoles son de carácter fundamental de estudio dado que son los principales causantes, ocasionando efectos en el clima, la atmósfera y visibilidad.

Según Buseck y Schawartz (2003) señala que son los siguientes:

- *Coeficiente de dispersión*: Esta propiedad es fundamental, se entiende como la proporción de luz incidente que dispersan las partículas por la unidad de longitud que recorre por el haz de luz. La eficacia de dispersión se da como el cociente de dispersión de luz de las partículas dividido por la concentración en masa de de las partículas. A veces se usa la eficacia de dispersión molar dividido por la concentración molar de una determinada especie de partículas.
- *Coeficiente absorción*: Se entiende como la proporción de luz incidente absorbida por partículas por la unidad de longitud que recorre por el haz de luz.
- *Coeficiente de extinción*: Las partículas son capaces de absorber y dispersar la luz, lo que lleva a su atenuación, quiere decir, disminuirá la intensidad de la luz luego de pasar un espesor de aerosoles en la dirección de su propagación, lo que se denomina extinción. Esta propiedad se da por la suma de los coeficientes de absorción y dispersión, su unidad se expresa por lo general en longitud (cm^{-1}). Sobre el planeta Tierra, esta propiedad se expresa en tres dimensiones en función a la longitud de onda, tiempo y espacio.

Clasificación de aerosoles atmosféricos

Como señala Morales y Leiva (2006) se pueden clasificar en primarios y secundarios según su mecanismo con los que se incorporan a la atmósfera. Se les denomina aerosoles primarios los cuales son emitidos directamente a la atmósfera, en cambio a los que se originan en la atmósfera por medio de la transformación química se les denomina aerosoles secundarios.

Desde el punto de vista de Manahan (2007) los aerosoles atmosféricos se clasifican según su origen:

- *Naturales*: Cenizas volcánicas, polen, sal marina, esporas, polvo terrestre, polvo desértico, etc.
- *Antropogénicos*: Actividad humana (humo de chimeneas y tránsito vehicular), partículas minerales producidas por procesos industriales y fotoquímicamente a partir de contaminantes gaseosos.

2.1.4. Profundidad óptica de aerosol

SERVIR (2009) define la profundidad óptica de aerosol - *Aerosol Optical Depth* (AOD) como una medición de la absorción y dispersión de luz por partículas que se encuentran en una columna entera de la atmósfera, representa la concentración total de partículas presentes en la atmósfera entre un satélite y la superficie de la Tierra. Por ello se considera esencial para estudiar la calidad del aire, ya que es un valor similar.

De acuerdo a Chung (2012) la AOD se entiende como la integral vertical del coeficiente de extinción de la propiedad óptica del aerosol a partir de la superficie de la Tierra hasta la atmósfera, es el resultado de la suma de profundidad óptica de aerosol de dispersión y absorción. Los valores no se expresan en unidades generalmente estos varían entre cero y uno, uno indica una capa densa de aerosoles. Asimismo, la observación satelital se usa para determinar el AOD con esta variable se puede obtener imágenes AOD durante horarios diurnos. Debido a esto, es una variable importante para la relación aerosol-clima.

En la Tabla 4 se indican los valores de AOD según Levy, Matto, Munchack, Kleidman, Patadia y Gupta (2019).

Tabla 4
Valores de AOD

Valores	Descripción
0.02	Áreas aisladas muy limpias
0.08	Fondo sobre el océano
0.2	Atmósfera bastante limpia
0.6	Atmósfera contaminada
1.5	Eventos de humo, polvo denso
>3.0	Disco de sol oscurecido

Fuente: Levy et al. (2019)

2.1.5. Sensor MODIS

El sensor MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) denominado espectroradiómetro de imágenes de resolución moderada está a bordo de los satélites *Aqua* y *Terra*, ambas monitorean completamente la superficie terrestre proporcionando cobertura global cada 1 o 2 días. Terra está planificada para atravesar de norte a sur por medio del ecuador en el día, en tanto Aqua de sur a norte por encima del ecuador en la tarde. MODIS fue construido para obtener información acerca de procesos de relevancia para la ciencia del sistema de la Tierra, sobre todo para los aerosoles y nubes.

Está compuesto por 36 grupos de longitudes o bandas espectrales. Las iniciales 19 bandas abarcan la región entre 405 hasta 2155 nm del espectro electromagnético, del 1 al 7 son convenientes para observaciones de aerosoles y terrestres, del 8 al 16 para oceánicas y del 17 al 19 para vapor de agua atmosférico. Las bandas espectrales del 20 al 36 abarcan desde 3660 hasta 14385 nm, son provechosos para generar productos relacionados a temperatura atmosférica, nubes y ozono. El sensor tiene una resolución espacial de 250 m (bandas de 1 al 2), 500 m (bandas de 3 al 7), 1000 m (bandas de 8 al 36) (NASA, 2002).

Los niveles de datos de procesamiento de MODIS según ARSET (2015), son los siguientes:

- *Nivel 2*: Variables derivadas derivadas en resoluciones 1, 3 y 10 km.
- *Nivel 2G*: Data de nivel 2 al mapear en una escala cuadrículada de espacio-tiempo uniforme.
- *Nivel 3*: Variables de nivel 2 agrupadas y promediadas para generar una cuadrícula diaria de 110 km con una resolución temporal y/o espacial variable.
- *Nivel 4*: Son el resultado de productos o modelos de examinar data de niveles menores.

Satélite Terra

Satélite bandera de las misiones de la NASA ciencias de la Tierra y el primero del Sistema de Observación de la Tierra (EOS). En la Tabla 5 se describe.

Tabla 5
Generalidades del satélite Terra

Datos	Descripción
Lanzamiento	18/12/1999
Órbita	Casi polar, sincrónico al sol
Altitud	705 km
Inclinación	98.1°
Horario	10:30 am
Período	98.88 minutos
Estado	Activo
Sensores	ASTER, CERES, MISR, MODIS, MOPITT

Fuente: EOS (2013)

Satélite Aqua

Es una fundamental misión satelital internacional de las misiones de la NASA de ciencias de la Tierra, es parte del EOS. En la Tabla 6 se describe sus generalidades.

Tabla 6
Generalidades del satélite Aqua

Datos	Descripción
Lanzamiento	4/ 05/ 2002
Órbita	Casi polar, sincrónico al sol
Altitud	705 km
Inclinación	98.2°
Horario	1:30 pm
Período	98.8 minutos
Estado	Activo
Sensores	AIRS, AMSR-E, CERES, HSB, MODIS, AMSU-A

Fuente: EOS (2013)

2.1.6. Software Giovanni

A partir de su lanzamiento en el año 2003, *Goddard Online Interactive Visualization ANd aNalysis Infrastructure* (Giovanni) desarrollado y mantenido por *Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center* (GES DISC) de la NASA ha sido destacado como sistema web conveniente para acceder, visualizar y analizar diversos datos disponibles de las ciencias de la Tierra para ser aplicados en distintos temas de investigación como calidad del aire, agricultura e hidrología. Provee información de varios satélites con cobertura global, en la actualidad se cuenta con su última versión 4.34 con mucha más capacidad de análisis mejorando notablemente la velocidad y rendimiento del sistema.

Proporciona diversos tipos de representaciones de los datos como mapa de tiempo promedio, mapas de superposición de promedios de tiempo, dispersión, perfil vertical, series temporal promediado por área, entre otros; esta última representación se entiende como los valores medios en un área total delimitada a lo largo de un determinado período de tiempo de un parámetro. También provee mapas, series temporales, diagramas de dispersión e histogramas; estos se visualizan fácilmente y descargan inmediatamente (Acker, Soebiyanto, Kiang y Kempler ,2014).

Los datos están agrupados por temas, cada uno muestra diversos parámetros de distintos sensores como precipitación, presión de aire, Profundidad Óptica de Aerosoles, humedad atmosférica, carbón negro, calor del suelo, fitoplancton, entre otros.

2.1.7. Trayectorias de masas de aire

Al detenerse el aire durante semanas o varios días, sobre una extensa área donde la superficie subyacente en relación a sus propiedades homogéneas adquiere ciertas características, se conoce como masa de aire. El movimiento de las masas de aire y sus condiciones, pueden tener efectos importantes en las reacciones, y la dispersión de los contaminantes. Su tamaño abarca normalmente cientos y hasta miles de kilómetros cuadrados, en ocasiones alcanza espesores de varios kilómetros en dirección vertical (Bidegain, 2010).

Modelo HYSPLIT

El modelo de simulación Híbrido Lagrangiano de Trayectoria Integrada de Partícula Única - HYSPLIT (*Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory*) es una prestación de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) del laboratorio de recursos del aire de Estados Unidos, fue desarrollado para la modelación del transporte de masas de aire.

HYSPLIT estima la trayectoria regresiva o progresiva de una masa de aire, conveniente para facilitar la interpretación de sucesos que afectan la calidad del aire. Las trayectorias progresivas determinan la dispersión de los contaminantes, en cambio las regresivas determinan las fuentes y orígenes de los contaminantes. Utiliza registros históricos para calcular trayectorias para sucesos que ya pasaron, cabe resaltar que es un sistema completo y a gran escala (SERVIR, 2009).

Rolph, Stein y Stunder (2017) sostiene que en la actualidad se puede realizar cuatro tipos de trayectorias, las cuales son:

- *Normal*: El más solicitado por ser un gráfico sencillo en el cual se puede manejar incluso tres distintas alturas iniciales para las trayectorias a partir de una a tres ubicaciones de inicio. Se utiliza con el fin de determinar las posibles zonas de origen de las masas de aire.
- *Matriz*: Proporciona trayectorias simultáneas, resultando una cuadrícula que es posible facilitar una medición de las direcciones de transporte en el dominio por tanto no hay necesidad de realizar varias trayectorias únicas. Cabe resaltar que para este tipo solo se puede utilizar una altura.
- *Conjunto*: Proporciona diversas trayectorias con cada miembro del grupo de trayectoria calculado, compensando la data meteorológica por un factor de cuadrícula fijo. Resultando 27 trayectorias para los posibles desplazamientos en los ejes X, Y y Z.
- *Frecuencia*: Proporciona trayectorias para una sola altura y ubicación cada 3, 6, o 12 horas en tanto dure los datos meteorológicos, después se suma el número de veces que la trayectoria pasa por cada cuadrícula.

2.2. Definición de términos básicos

- *Absorción*: Proceso en el cual una materia se adhiere en otra y la retiene.
- *Aerosol atmosférico*: Partículas sólidas o líquidas que están suspendidas en la atmósfera.
- *Dispersión*: Transmisión de la radiación provocado por partículas.
- *Emisión*: Cantidad de contaminantes liberados por una fuente emisora al aire durante un rango de tiempo.
- *Inmisión*: Cantidad de contaminantes existentes en el aire.
- *Profundidad Óptica de Aerosoles*: Simboliza la concentración de aerosoles en la columna entera de la atmósfera.
- *Resolución espacial*: Medida del tamaño de una imagen en píxel que se capta a través de la percepción remota.
- *Resolución temporal*: Fase de tiempo en conseguir dos imágenes continuas de un área específica de la superficie terrestre.
- *Satélite*: Plataforma espacial que órbita alrededor del planeta Tierra con determinadas misiones.
- *Sensor*: Instrumento que detecta radiación electromagnética, capaz de convertirla en valores digitales.
- *Teledetección*: También llamado percepción remota, permite obtener información a distancia y sin contacto directo con el objeto de estudio.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL TRABAJO PROFESIONAL

3.1. Delimitación temporal y espacial del trabajo

3.1.1. Temporal

El período de la investigación comprende del año 2015 al 2019.

3.1.2. Espacial

La investigación tiene como área de estudio el Perú. Los datos de Profundidad Óptica de Aerosoles son obtenidos del sistema Giovanni mantenido y desarrollado por la NASA GES DISC registrados por el sensor MODIS a bordo del satélite *Aqua*.

3.2. Determinación y análisis del problema

En la actualidad, los contaminantes atmosféricos más relevantes son el material particulado también llamado como aerosol atmosférico, pueden originarse por fuentes naturales y antropogénicas. Según la Organización Mundial de la Salud (2018) en los países desarrollados o en los países en vías de desarrollo la contaminación atmosférica significa un riesgo importante para la salud y el ambiente. En las zonas rurales como en las ciudades la exposición a partículas pequeñas (PM 2.5) fue la causa de muerte prematura de 4,2 millones a nivel global por año, la tasa mortalidad se debe a causa de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer.

En el ranking del 2019 de los países con peor calidad del aire en el mundo, IQ Air (2020) ubica al Perú en el puesto 33 de 98 países. En este reporte se evaluó el material particulado PM2.5 y su concentración fue 2 veces superior a la recomendación de la OMS. Para América Latina y Caribe de 12 países, Perú tiene la exposición anual promedio más alta a consecuencia del parque automotor ineficiente, crecimiento industrial y quema de biomasa.

La contaminación del aire en el Perú es uno de los principales problemas ambientales, esto altera la calidad del aire lo cual implica efectos adversos para la

salud y el ambiente, esto se debe principalmente a que el crecimiento económico de los últimos años requiere que la industria y la población utilicen más recursos, energía y servicios. Perú tiene 31 zonas de atención prioritaria siendo objeto de análisis y evaluación de diversos parámetros entre ellos el material particulado, siendo el contaminante más perjudicial (Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013-2014, 2015).

De acuerdo a SERVIR (2009) hace referencia que el valor de AOD, es adecuado para fines de analizar la calidad del aire ya que es un valor referencial a la concentración total de partículas en el aire. Por lo tanto, el enfoque de la investigación se orienta en la evaluación cuantitativa del aerosol mas no en su composición en el Perú en un período de tiempo.

3.2.1. Formulación del problema

Problema general

¿Cómo se evalúa la variabilidad de la Profundidad Óptica de Aerosoles en el Perú del 2015 al 2019?

Problemas específicos

- ¿Cómo es el comportamiento de la variabilidad temporal diaria de la Profundidad Óptica de Aerosoles en el Perú durante el período del 2015 al 2019?
- ¿Cuáles son los valores máximos de la Profundidad Óptica de Aerosoles durante el período del 2015 al 2019?
- ¿Cuáles son las zonas de origen de la Profundidad Óptica de Aerosoles a través de trayectorias de masas de aire para los valores máximos?

3.3. Modelo de solución propuesto

Para el desarrollo de los objetivos planteados en la investigación se realizó las siguientes actividades (ver *Figura 2*).

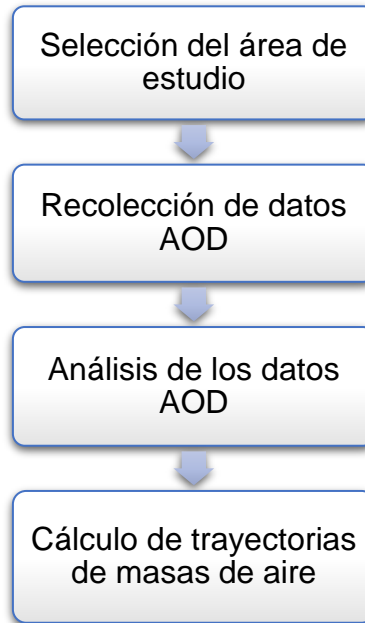


Figura 2. Diagrama de actividades

3.3.1. Selección del área de estudio

El área de estudio corresponde a Perú, es el tercer país más grande de América del Sur y está ubicado al oeste, con una superficie total de 1 285 215 km² y una población de 32 495 500 habitantes.

Limita con Ecuador y Colombia al norte, Brasil al este, Bolivia al sureste, Chile al sur y al oeste bordea con el océano Pacífico con un dominio marítimo de 200 millas a partir del litoral. Se encuentra organizado en 24 departamentos y la provincia constitucional Callao (ver *Figura 3*).

El Perú tiene tres grandes regiones: Costa, sierra y selva. La costa es arenosa y mayormente desértica a excepción de ciertos fértiles valles; la sierra está conformada por la cordillera de los Andes esta atraviesa el país de norte a sur, se ubican los principales yacimientos minerales; la selva está conformada por densos bosques, planicies orientales y laderas formando parte de la cuenca del Amazonas, posee recursos forestales, reservas petroleras y de gas natural. La costa representa el 11% del territorio peruano, la sierra 30% y la selva 59% (Oficina de información diplomática, 2020).



Figura 3. Área de estudio

Fuente: Oficina de información diplomática (2020)

3.3.2. Recolección de datos AOD

Para la recolección de datos promedio diario en el sistema en línea Giovanni (<https://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) procedente del sensor MODIS a bordo del satélite *Aqua* es necesario ingresar con un nombre de usuario para acceder a las funciones completas y datos sin restricciones.

Al ingresar al sistema se delimitó el área de estudio; obteniendo las siguientes coordenadas 83.4961 al Oeste, 18.3281 al Sur, 67.5 al Este y 0.6563 al Norte. (Ver *Figura 4*)

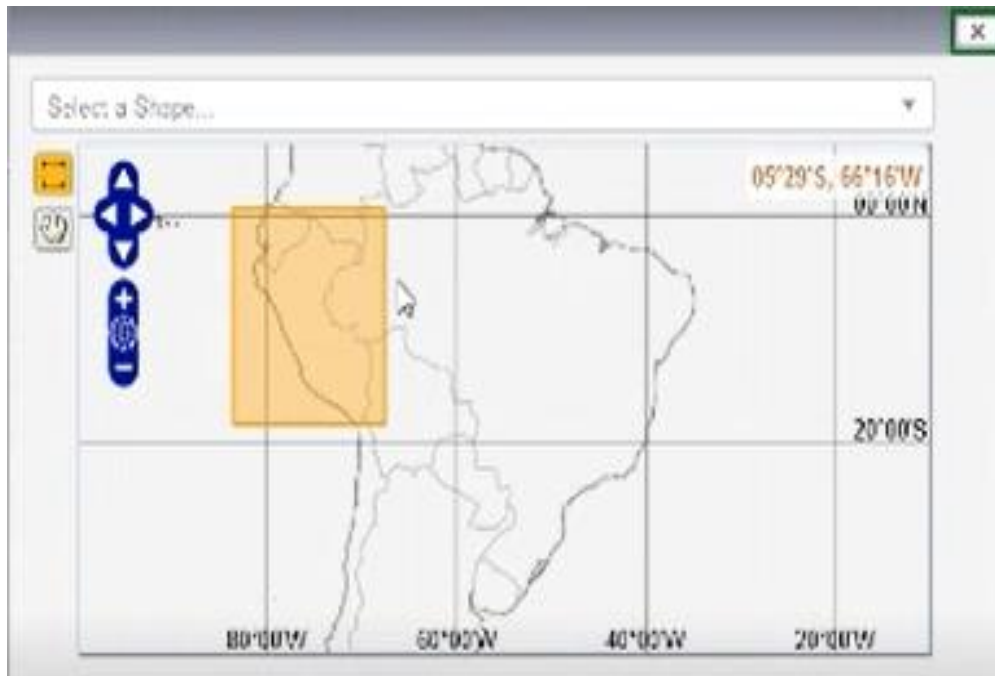


Figura 4. Área delimitada en el sistema Giovanni

Después se seleccionó lo siguiente: series temporal promediado por área, aerosol la medida AOD, sensor, rango de fecha, resolución espacial y temporal. Se utilizó los siguientes algoritmos:

Combined Dark Target and Deep Blue

Estos proporcionan una cobertura global completa, el algoritmo *Dark Target* aplica sobre la tierra oscura y el océano, mientras que *Deep Blue* cubre todas las áreas terrestres comprendiendo las superficies oscuras y brillantes.

El producto de nivel 3 utilizado es el siguiente MYD08_D3 v6.1. Los nombres de archivo de datos están estandarizados por la NASA para MODIS, permitiendo a través de la nomenclatura identificar el nombre del producto, la plataforma a la que pertenece, código, nivel y la colección. La descripción del producto se visualiza en la *Figura 5*.

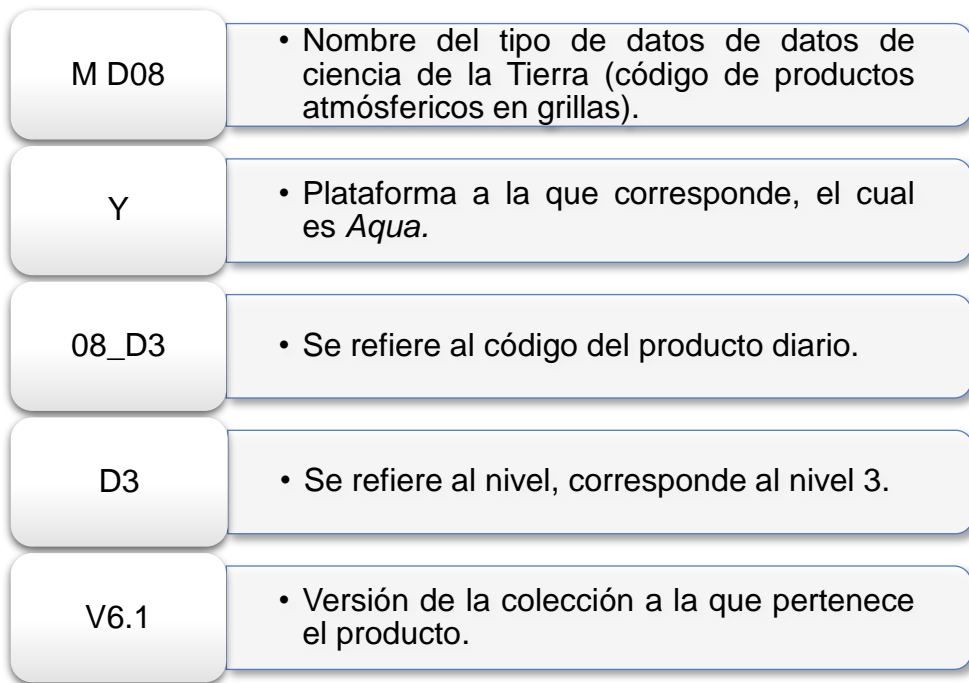


Figura 5. Descripción del producto MYD08_D3 v6.1

Los datos se descargaron como un archivo de valores separados por comas de Microsoft Excel (.csv). En la Tabla 7 se describe los datos AOD.

Tabla 7
Descripción de datos AOD

Área	Sensor	Satélite	Longitud de onda	Resolución espacial	Resolución temporal	Rango de fecha
Perú	MODIS	Aqua	550 nm	1° x 1° (110 x 110 km)	Diaria	2015-2019

3.3.3. Análisis de los datos

Los datos de AOD se organizaron en formato hoja de cálculo Microsoft Excel 2016 (.xlsx) y se continuó con lo siguiente:

- Control de calidad de los datos verificando que todas las fechas tengan valores y se encuentren en el rango de 0 a 1.
- Gráficos de series de tiempo en Microsoft Excel 2016 de los datos para el período del 2015 al 2019.
- Del proceso anterior se analizó los gráficos y se identificó cuatro valores máximos más representativos de AOD para el período del 2015 al 2019.

3.3.4. Cálculo de trayectorias de masas de aire

Finalmente, para trazar las trayectorias de las masas de aire cargadas de aerosoles de los cuatro valores máximos y determinar las posibles zonas de origen se utilizó el modelo HYSPLIT versión 4.0 (https://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT_traj.php).

Se realizó las trayectorias para cada día de los valores máximos de AOD utilizando datos archivados en el sistema las cuales corresponden al 11 de setiembre del 2016, 23 de setiembre del 2017, 10 de setiembre del 2018 y 14 de agosto del 2019.

Para que la modelación sea correcta, se proporcionó las coordenadas del lugar de destino en grados decimales, la base de datos meteorológicos de análisis archivados *Global Data Assimilation System* (GDAS), tipo de trayectoria y la selección de diferentes alturas. En la Tabla 8 se describe los parámetros.

Tabla 8
Descripción de los parámetros en HYSPLIT

Coordenadas	Meteorología	Alturas	Tipo de trayectoria
Latitud 10S, longitud 76W	<i>GDAS (1 degree, global, 2006-present)</i>	1000, 1500 y 2000m	Normal, regresiva

3.4. Resultados

▪ Análisis de la variabilidad temporal diaria de la Profundidad Óptica de Aerosoles

En la *Figura 6* se puede observar la serie de tiempo de los valores de AOD que corresponden al año 2015, estos varían de 0.08 a 0.4. Según Levy et al. (2014) señala que estos valores tienen una tendencia a una atmósfera bastante limpia ya que estos valores están próximos a 0. De abril a agosto se puede observar un descenso de los valores mientras que, de setiembre a diciembre un incremento.

Para el 19 de setiembre se registra el valor de 0.08 siendo el más bajo de todo el año y para el 18 de octubre se registra el valor de 0.4 siendo el más alto. Este último puede representar acontecimientos de contaminación antropogénica y/o natural que favorecieron este valor alto de AOD a lo largo del día.

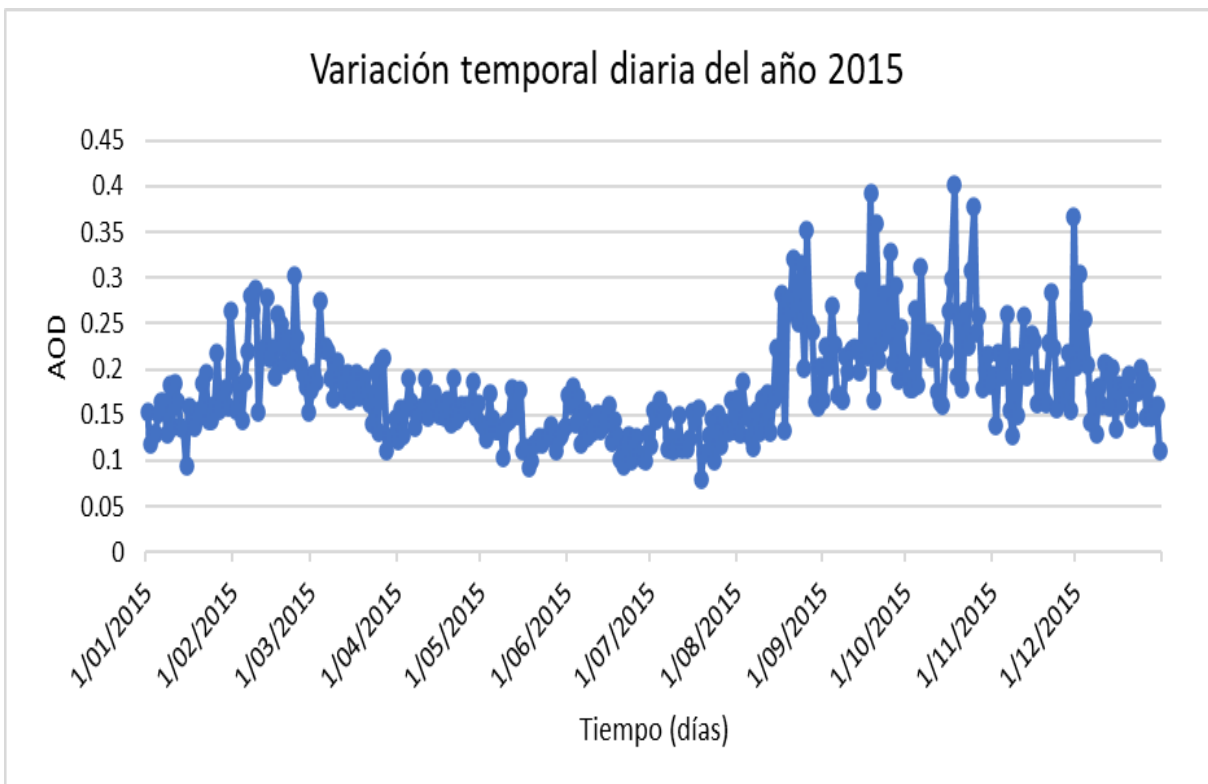


Figura 6. Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2015 al 31/12/2015

En la *Figura 7* se puede observar la serie de tiempo de los valores de AOD que corresponden al año 2016, estos varían de 0.07 a 0.52 con excepción del día 11 de setiembre que presenta un valor máximo que corresponde a 0.8. Según Levy et al. (2014) señala que estos valores tienen una tendencia a una atmósfera contaminada ya que estos valores están próximos a 1. En los meses de febrero, marzo y setiembre se puede observar un incremento de los valores mientras que, de abril a julio un descenso.

Para el 29 de abril se registra el valor de 0.07 siendo el más bajo de todo el año y para el 14 de setiembre se registra el valor de 0.52 siendo el más alto. Este último puede representar acontecimientos de contaminación antropogénica y/o natural que favorecieron este valor alto de AOD a lo largo del día.

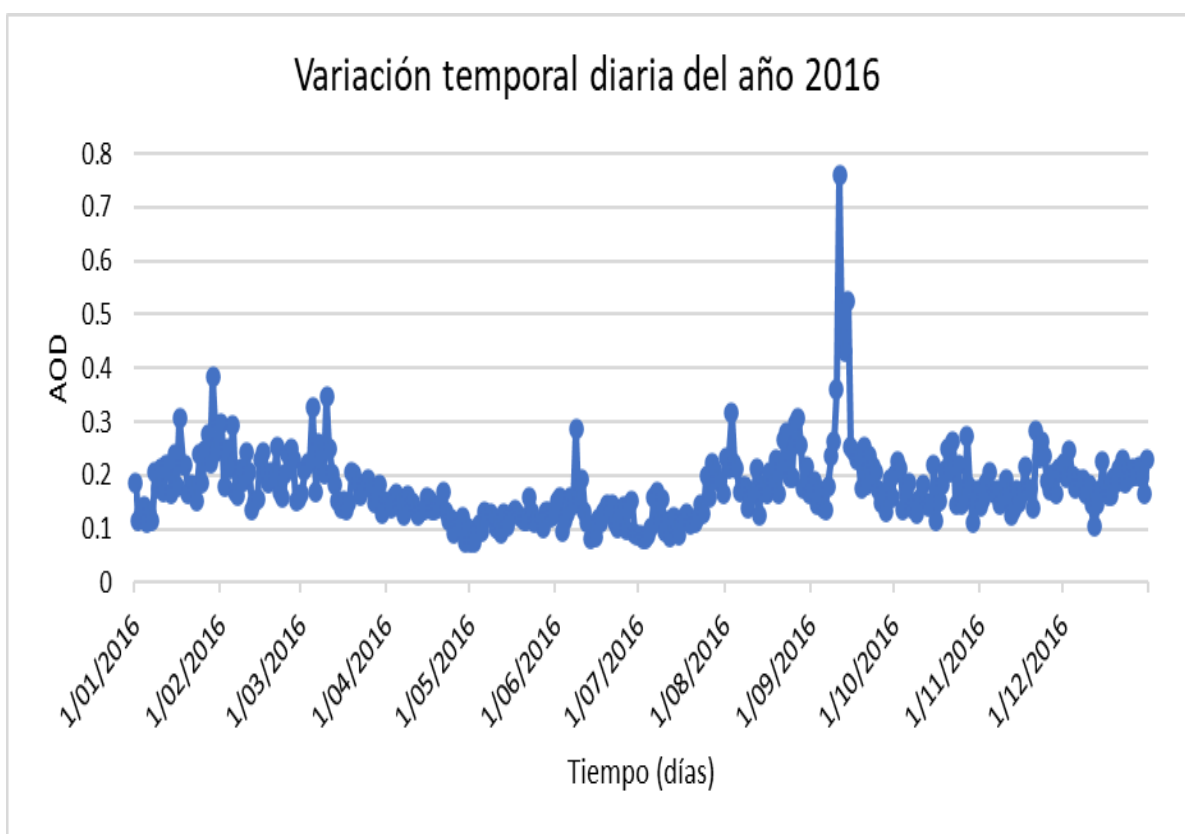


Figura 7. Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2016 al 31/12/2016

En la *Figura 8* se puede observar la serie de tiempo de los valores de AOD que corresponden al año 2017, estos varían de 0.07 a 0.71 con excepción del día 23 de setiembre que presenta un valor máximo que corresponde a 0.9. Según Levy et al. (2014) señala que estos valores tienen una tendencia a una atmósfera contaminada ya que estos valores están próximos a 1. En los meses de setiembre a octubre se puede observar un incremento de los valores mientras que, de abril a agosto un descenso.

Para el 23 de julio se registra el valor de 0.07 siendo el más bajo de todo el año y para el 19 de setiembre se registra el valor de 0.71 siendo el más alto. Este último puede representar acontecimientos de contaminación antropogénica y/o natural que favorecieron este valor alto de AOD a lo largo del día.

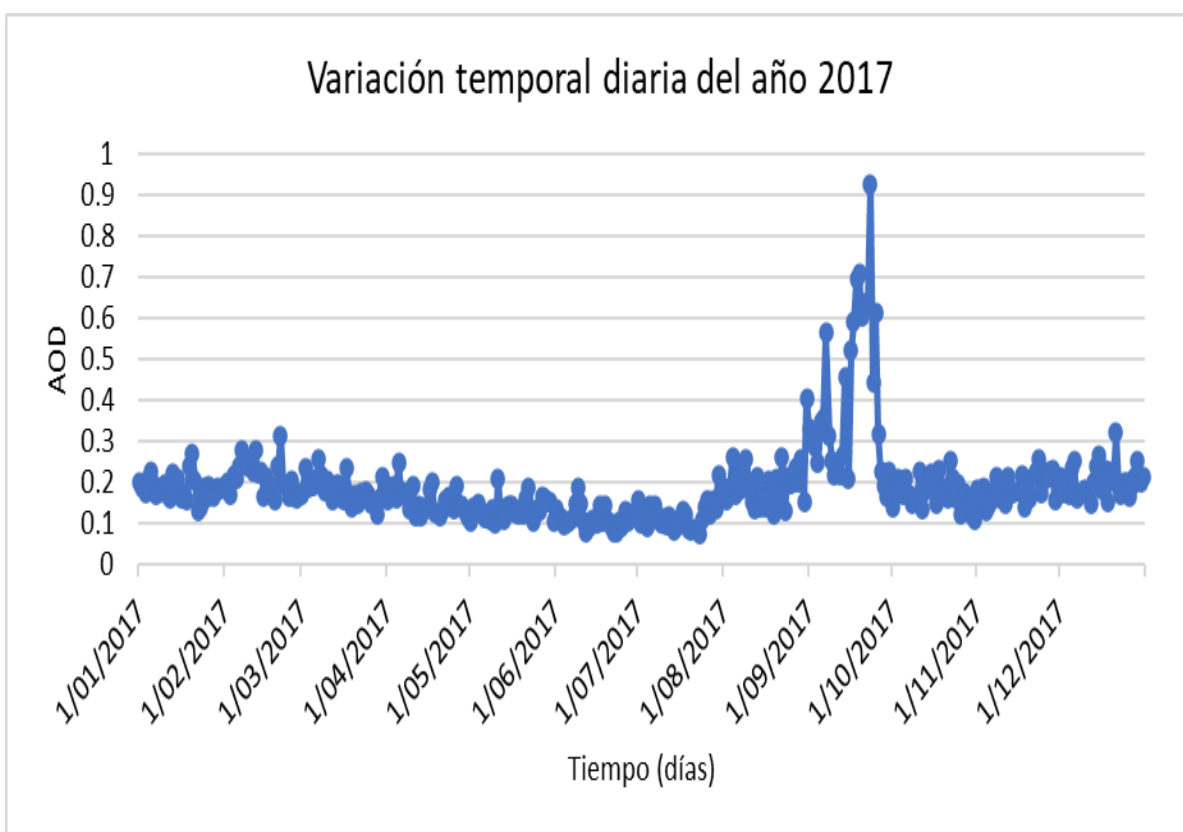


Figura 8. Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2017 al 31/12/2017

En la *Figura 9* se puede observar la serie de tiempo de los valores de AOD que corresponden al año 2018, estos varían de 0.05 a 0.49 con excepción del día 10 de setiembre que presenta un valor máximo que corresponde a 0.6. Según Levy et al. (2014) señala que estos valores tienen una tendencia a una atmósfera contaminada ya que estos valores están próximos a 1. En los meses de febrero, marzo y setiembre se puede observar un incremento de los valores mientras que, de abril a agosto un descenso.

Para el 19 de junio se registra el valor de 0.05 siendo el más bajo de todo el año y para el 12 de setiembre se registra el valor de 0.49 siendo el más alto. Este último puede representar acontecimientos de contaminación antropogénica y/o natural que favorecieron este valor alto de AOD a lo largo del día.

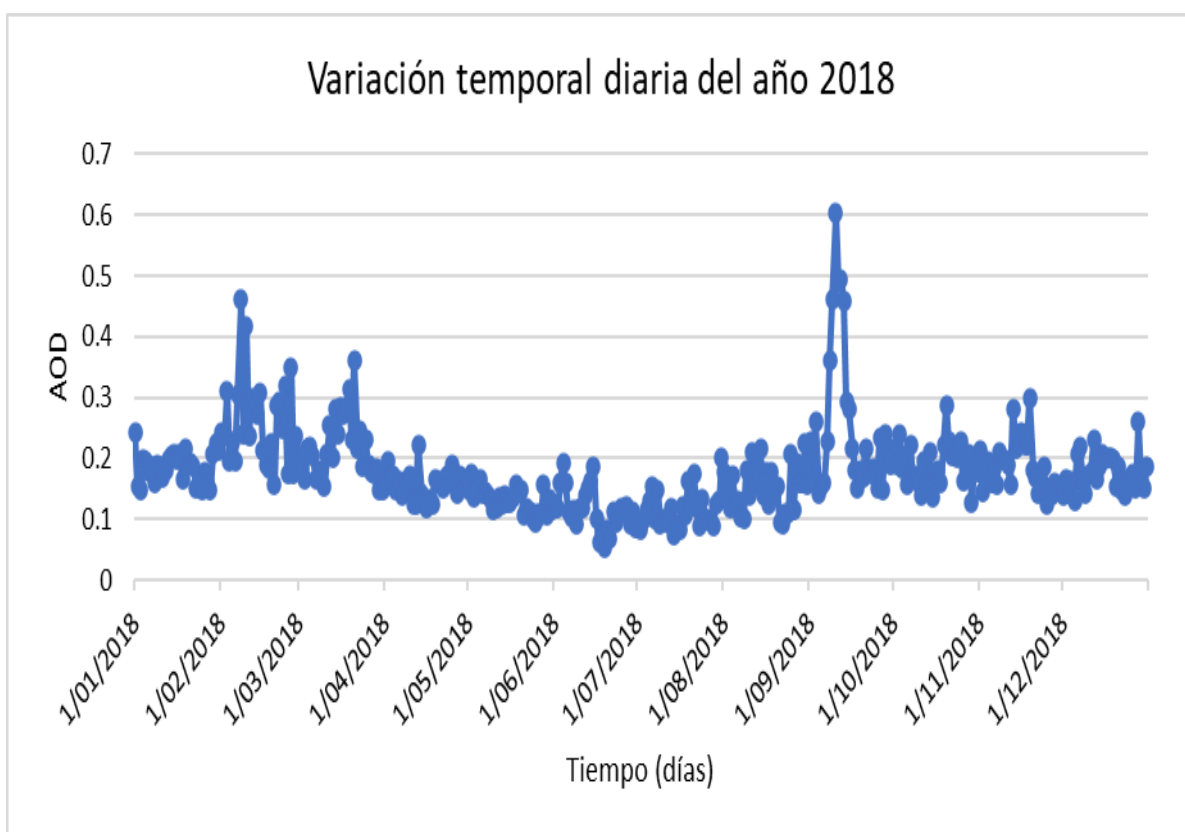


Figura 9. Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2018 al 31/12/2018

En la *Figura 10* se puede observar la serie de tiempo de los valores de AOD que corresponden al año 2019, estos varían de 0.06 a 0.56 con excepción del día 14 de agosto que presenta un valor máximo que corresponde a 0.7. Según Levy et al. (2014) señala que estos valores tienen una tendencia a una atmósfera contaminada ya que estos valores están próximos a 1. De agosto a octubre se puede observar un incremento de los valores mientras que, de mayo a julio un descenso.

Para el 15 de mayo se registra el valor de 0.06 siendo el más bajo de todo el año y para el 24 de setiembre se registra el valor de 0.56 siendo el más alto. Este último puede representar acontecimientos de contaminación antropogénica y/o natural que favorecieron este valor alto de AOD a lo largo del día.

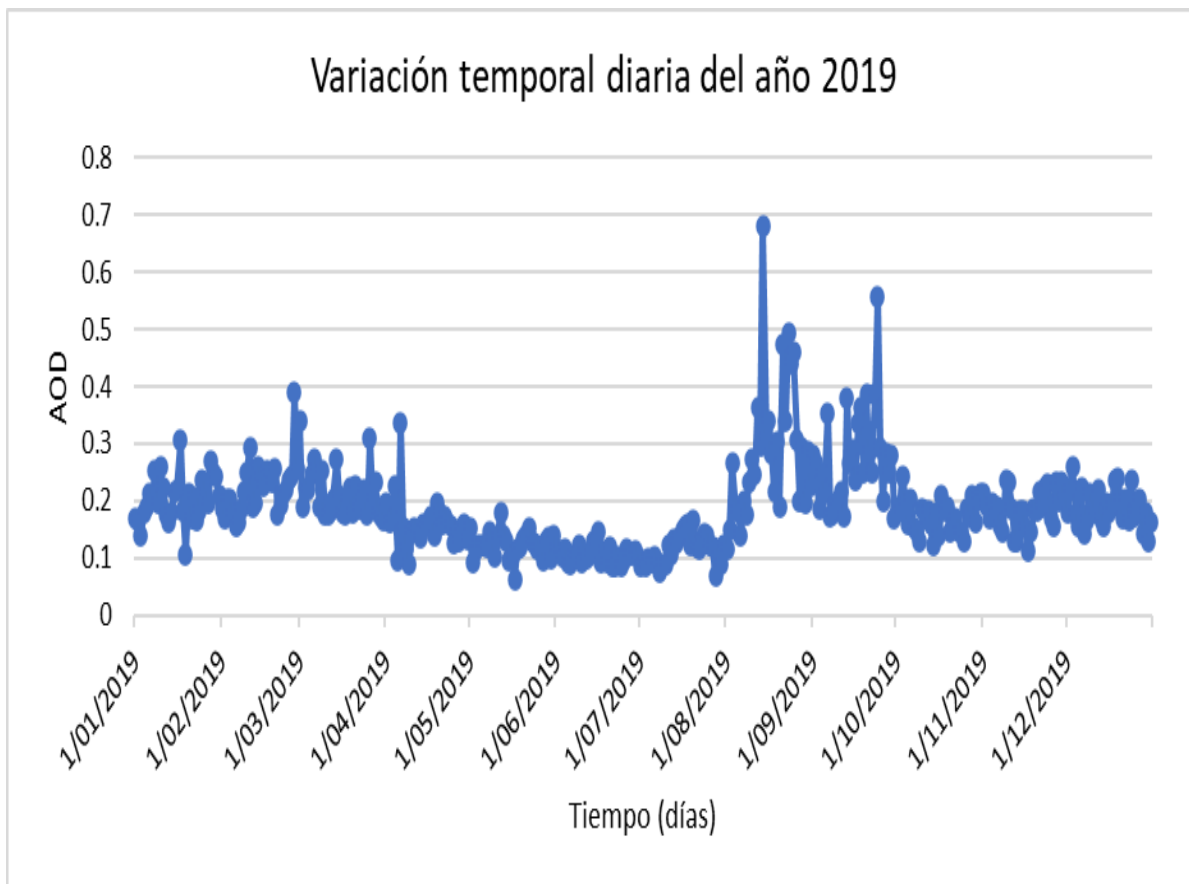


Figura 10. Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2019 al 31/12/2019

En el año 2015 los valores de promedios diarios de AOD son menores en comparación del 2016 al 2019, esto es en relación a que el Perú ha tenido un crecimiento del parque automotor, población, económico e industrial en los últimos años, significando una mayor carga de aerosoles en la atmósfera que alteran la calidad del aire afectando a la población y al ambiente.

El valor de AOD varía de 0 a 1, para el año 2015 tiene una tendencia a una atmósfera bastante limpia ya que estos valores están próximos a 0, mientras que del 2016 al 2019 una atmósfera contaminada ya que estos valores están próximos a 1. Cabe resaltar que los valores máximos registrados y el rango de valores de promedios diarios de AOD para el período del 2018 al 2019 son menores respecto del 2016 al 2017, esto se relaciona a que en los últimos años las autoridades competentes han implementado acciones para abordar las causas directas e indirectas de la contaminación atmosférica y por ende mejorar la calidad del aire del país. (Ver *Figura 11*)

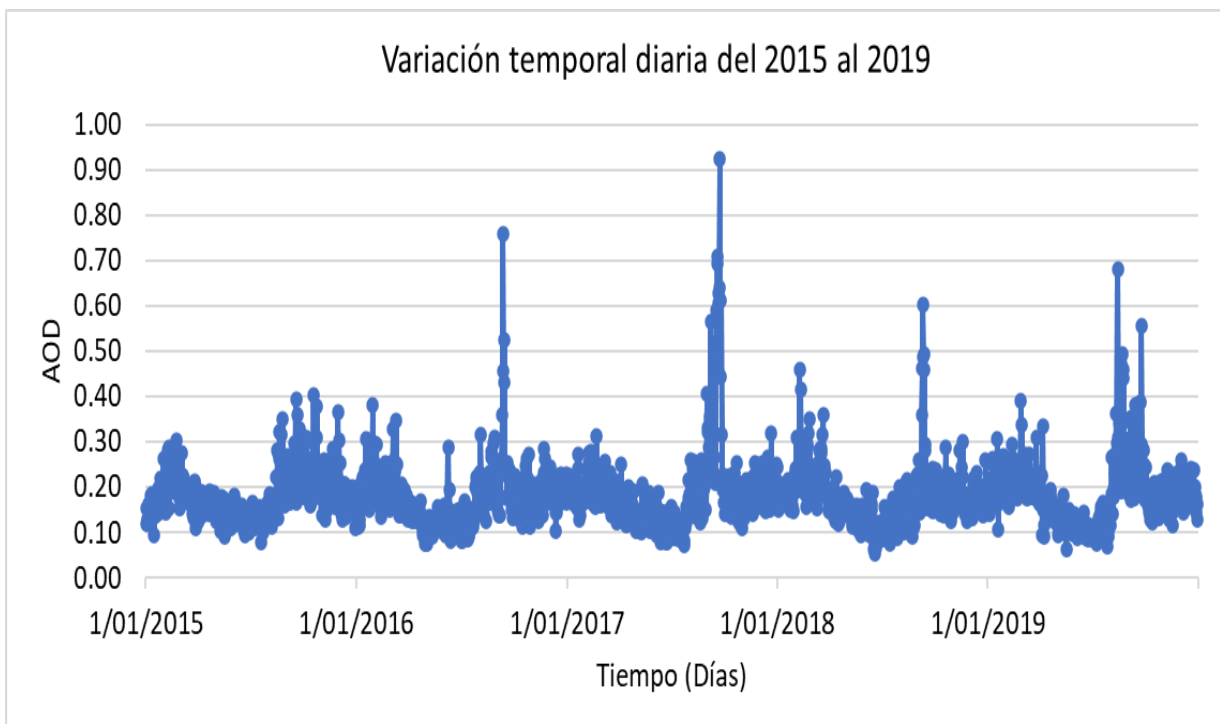


Figura 11. Variación temporal diaria de AOD de MODIS-Aqua del 01/01/2015 al 31/12/2019

- **Identificación de los valores máximos de la Profundidad Óptica de Aerosoles**

En la *Figura 12* se observa la serie de tiempo de valores de AOD MODIS *Aqua* para el período del 2015 al 2019, estos varían de 0.05 a 0.9. Se identifica 4 valores máximos correspondientes a las fechas del 11 de septiembre del 2016, 23 de septiembre del 2017, 10 de septiembre del 2018 y 14 de agosto del 2019 con los valores de AOD 0.8, 0.9, 0.6 y 0.73 respectivamente. Los valores máximos ocurren en el mes de septiembre con excepción para el año 2019 que se da en el mes de agosto.

Estos registros de valores máximos de AOD representan una alta carga de aerosoles correspondiendo a una atmósfera contaminada, pueden representar acontecimientos de contaminación antropogénica y/o natural que favorecieron estos valores máximos de AOD a lo largo del día. Cuando el valor de AOD es alto hay menor visibilidad.

También puede estar relacionado con la fuente de contaminación antropogénica o natural como los incendios forestales, aunque no suelen ser muy frecuentes son significativos. Es muy común durante la temporada seca (agosto a noviembre) en la Amazonía coincidente con la deficiencia de precipitaciones. (Suárez, Castillo, Marín, Carillo, Rimac, Pomalaya y Menacho, 2006)

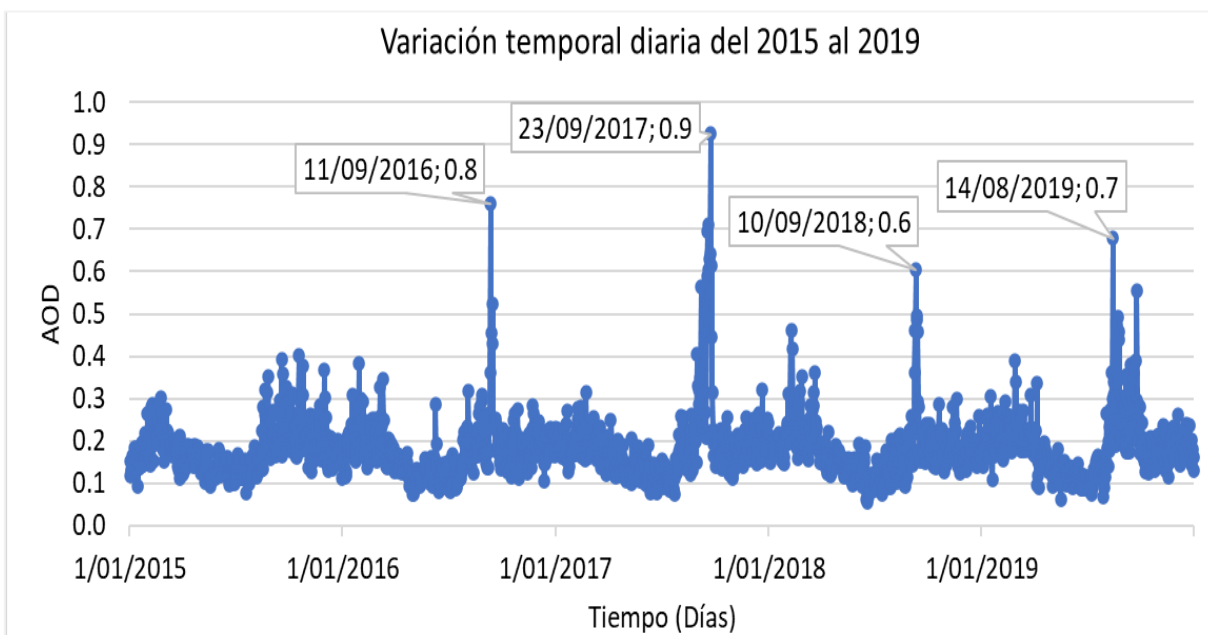


Figura 12. Variación temporal diaria de AOD de MODIS-*Aqua* del 01/01/2015 al 31/12/2019, valores máximos

- **Determinación de las zonas de origen de la Profundidad Óptica de Aerosoles a través de trayectorias de masas de aire**

El modelamiento del transporte de masas de aire predominantes cargadas de aerosoles en el modelo HYSPLIT se da bajo la influencia de la dirección del viento y diversas variables meteorológicas, desde su lugar de origen al destino incrementando la concentración local. El modelo es útil para monitorear los movimientos que presenta el aire. (Ver *Figura 13*)

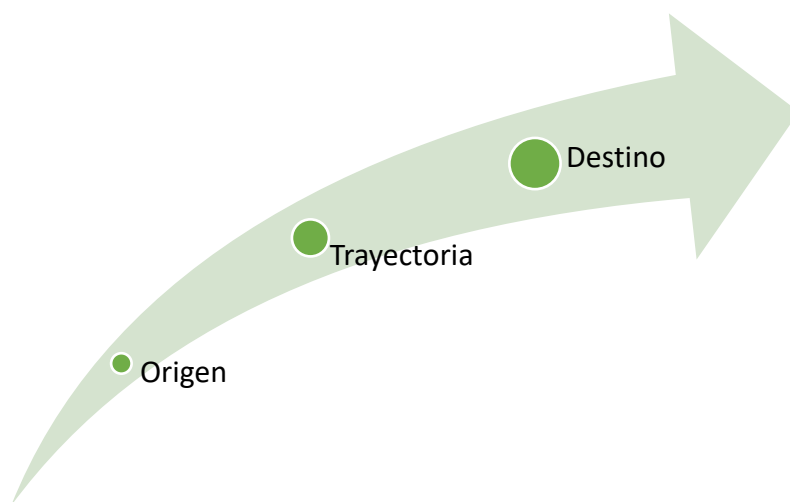


Figura 13. Proceso de la trayectoria de masas de aire

Se determinó las zonas de origen a través del modelo HYSPLIT para tres alturas iniciales sobre el nivel del suelo (1000, 1500 y 2000 m) de los valores máximos de AOD identificados en las fechas 11 de setiembre del 2016, 23 de setiembre del 2017, 10 de setiembre del 2018 y 14 de agosto del 2019. Para estos 4 casos de estudio el destino tiene como referencia las coordenadas latitud 10S y longitud 76W.

Para el 11 de setiembre del 2016 se determinó el origen de las masas de aire a través de trayectorias regresivas. En la *Figura 14* y *Figura 15* se puede observar a una altura sobre el nivel del suelo de 2000 m las masas de aire cargada de aerosoles de Madre de Dios se desplazan hacia Huánuco generado por la acción del viento, según Suárez et al. (2006) coincide con los incendios forestales que ocurren en temporada seca (agosto a noviembre) en la Amazonía siendo la fuente emisora representativa,

coincidente con escasas precipitaciones por tanto una mayor probabilidad de que los contaminantes lleguen a mayores distancias. Mientras que para una altura sobre el nivel del suelo de 1000 y 1500 m las masas de aire cargada de aerosoles son procedentes de Pasco, representa el transporte de masas de aire de fuentes de contaminación por extracción de minerales ya que es la más representativa de este departamento.

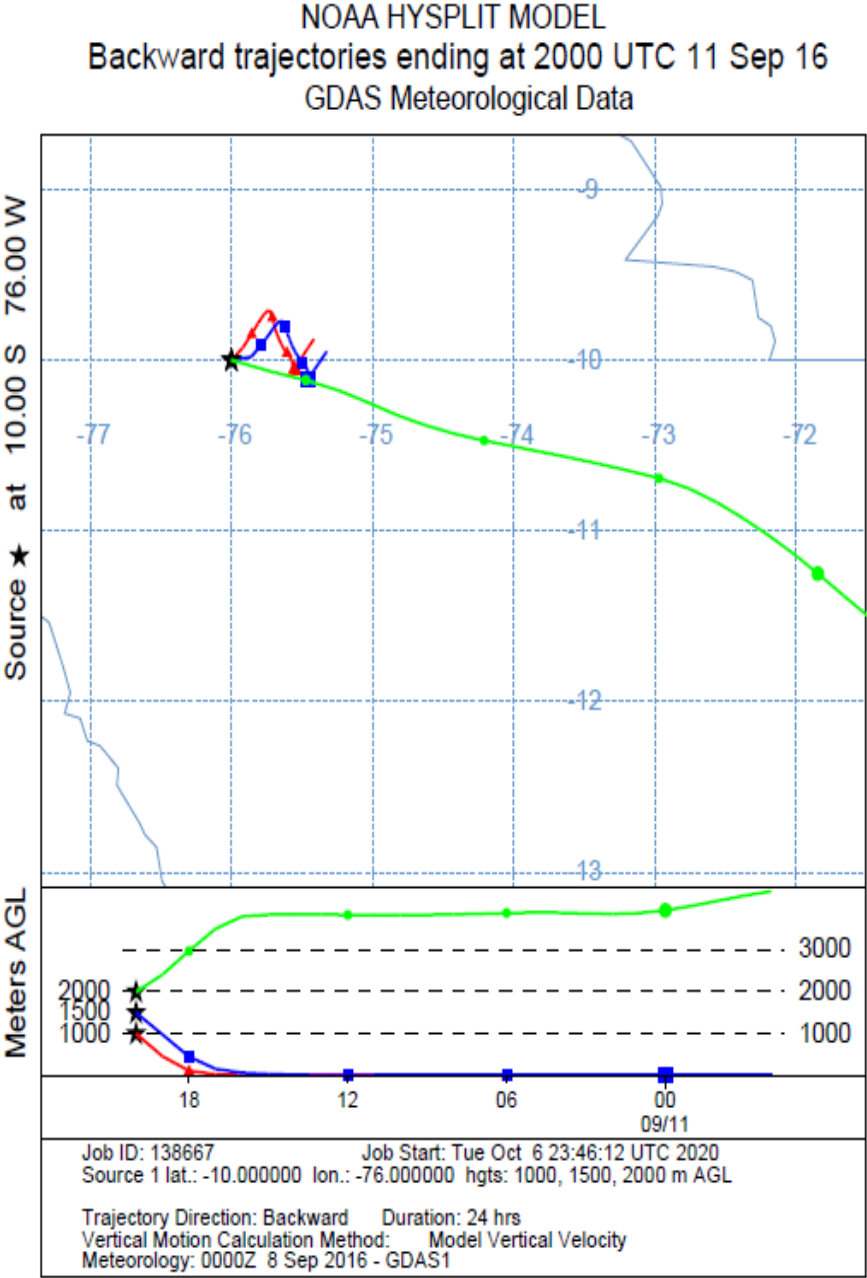


Figura 14. Trayectoria 11 de setiembre del 2016 en el modelo HYSPLIT

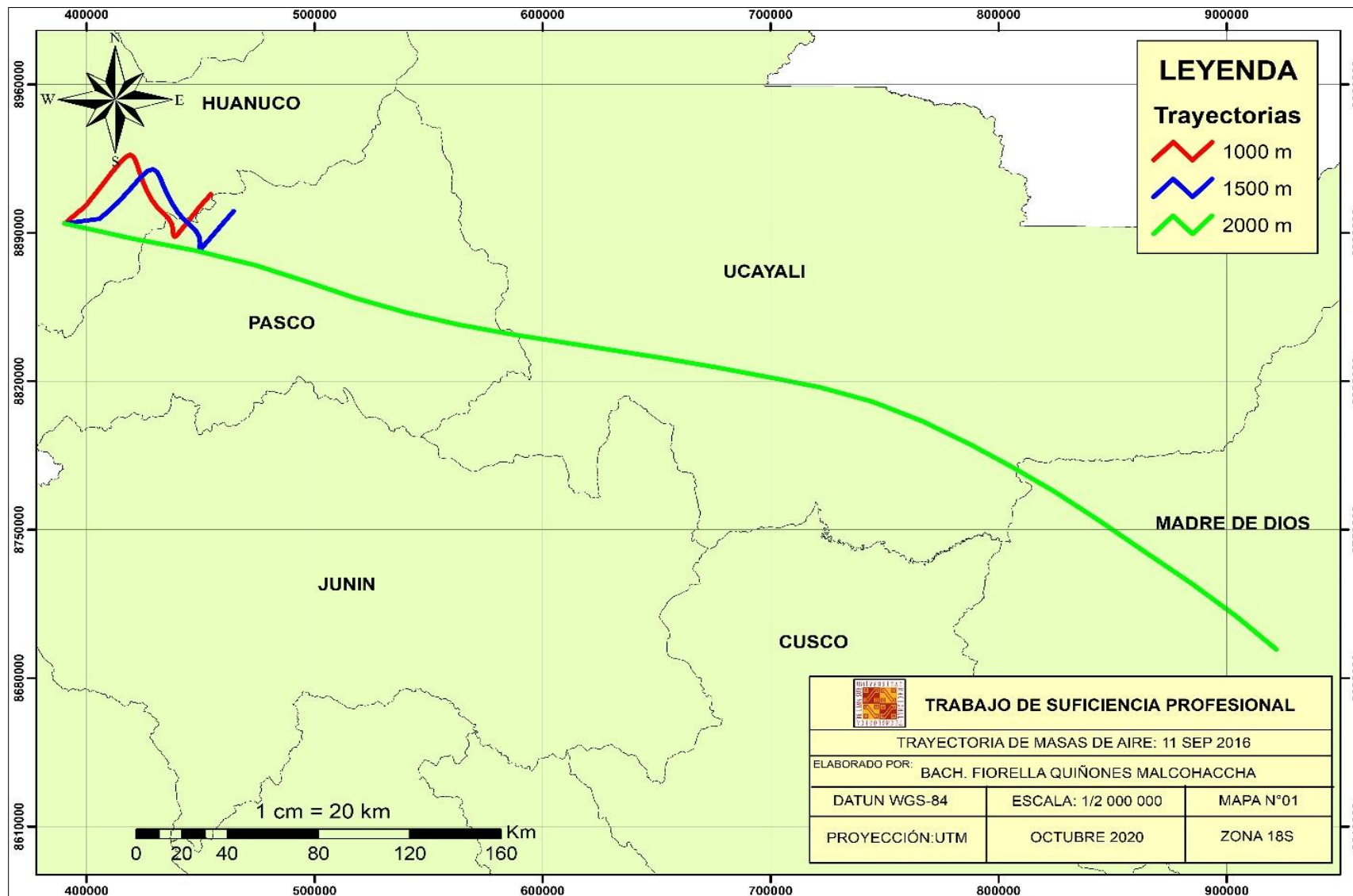


Figura 15. Trayectoria 11 de setiembre del 2016

Para el 23 de setiembre del 2017 se determinó el origen de las masas de aire a través de trayectorias regresivas. En la *Figura 16* y *Figura 17* se puede observar a una altura sobre el nivel del suelo de 1000, 1500, 2000 m las masas de aire cargada de aerosoles de Pasco se desplazan hacia Huánuco generado por la acción del viento, esto representa el transporte de masas de aire de fuentes de contaminación por extracción de minerales ya que es la más representativa de este departamento. También se observa la recirculación de las masas de aire esto ocurre normalmente cuando se produce altas concentraciones del contaminante.

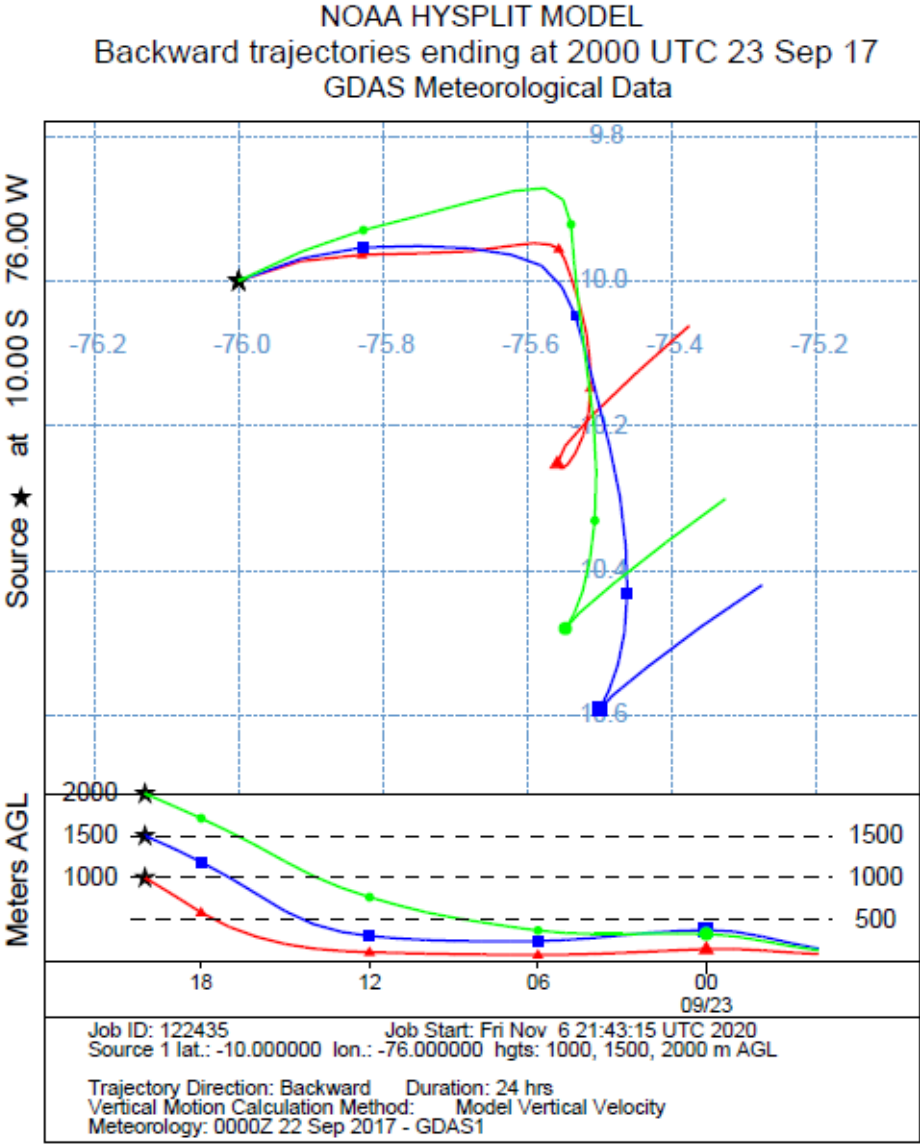


Figura 16. Trayectoria 23 de setiembre del 2017 en el modelo HYSPLIT

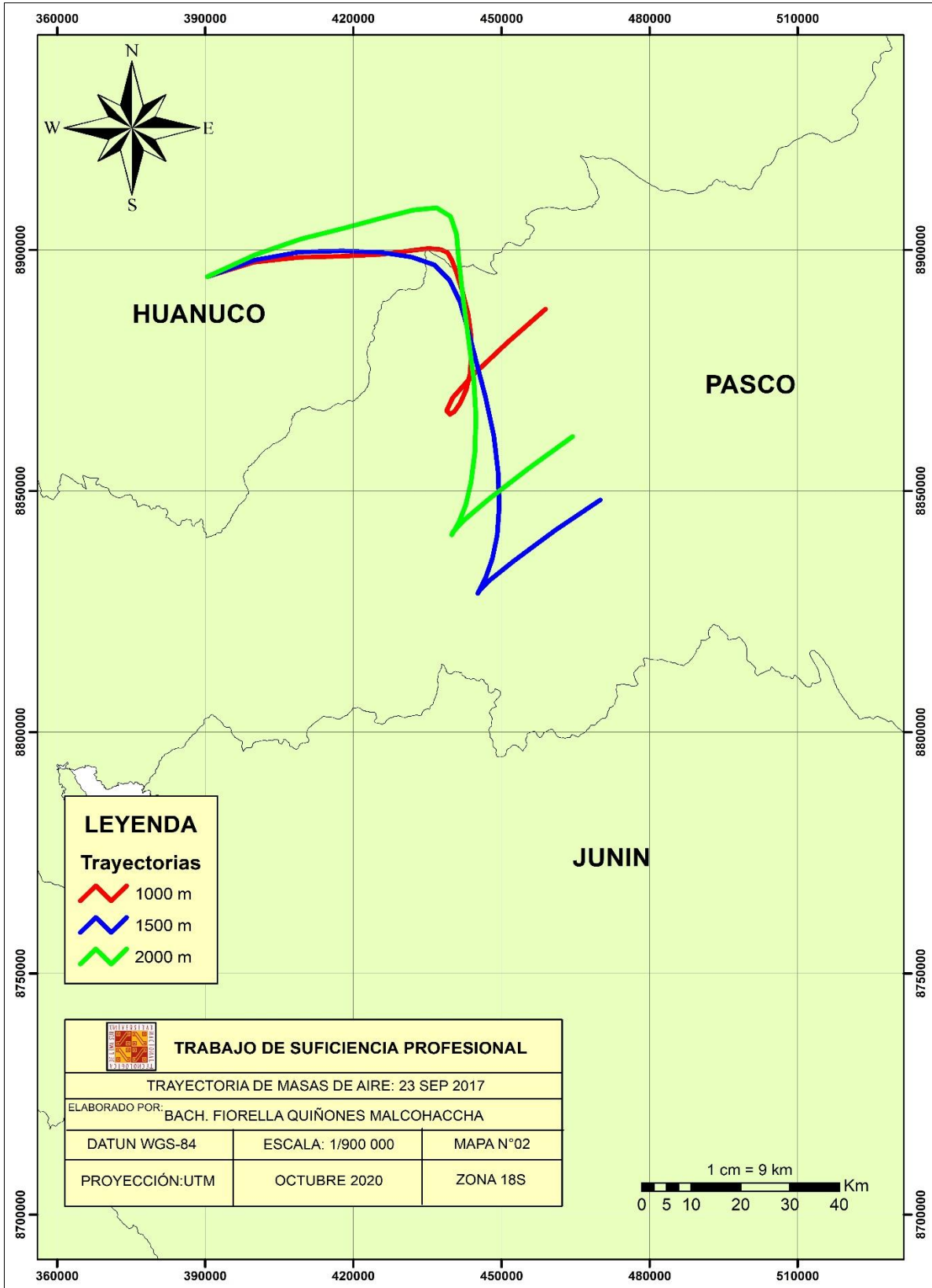


Figura 17. Trayectoria 23 de setiembre del 2017

Para el 10 de setiembre del 2018 se determinó el origen de las masas de aire a través de trayectorias regresivas. En la *Figura 18* y *Figura 19* se puede observar a una altura sobre el nivel del suelo de 2000 m las masas de aire cargada de aerosoles de Ucayali se desplazan hacia Huánuco generado por la acción del viento según Suárez et al. (2006) coincide con los incendios forestales que ocurren en temporada seca (agosto a noviembre) en la Amazonía siendo la fuente de contaminación representativa, coincidente con escasas precipitaciones por tanto una mayor probabilidad de que los contaminantes lleguen a mayores distancias. Mientras que para una altura sobre el nivel del suelo de 1000 y 1500 m las masas de aire cargada de aerosoles son procedentes del mismo lugar de destino esto representa el transporte de masas de aire de fuentes de contaminación del parque automotor y canteras ya que son las más representativa de este departamento. También se observa la recirculación de las masas de aire esto ocurre normalmente cuando se produce altas concentraciones del contaminante.

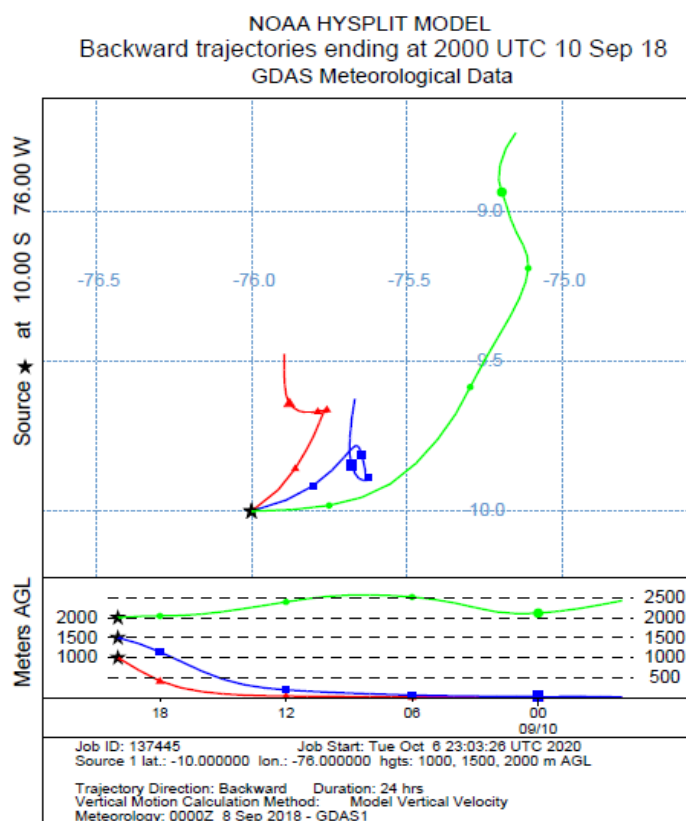


Figura 18. Trayectoria 10 de setiembre del 2018 en el modelo HYSPLIT

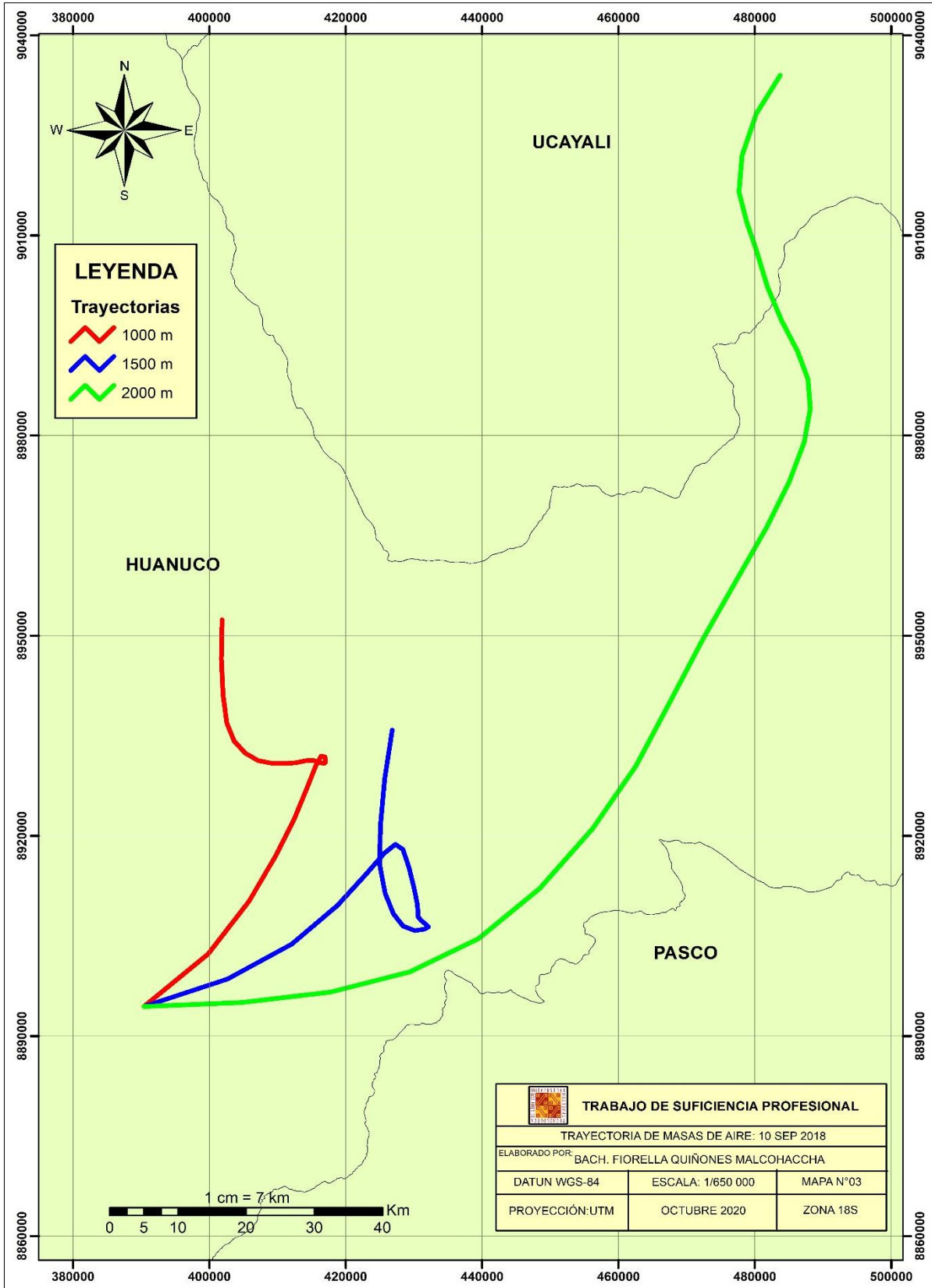


Figura 19. Trayectoria 10 de setiembre del 2018

Para el 14 de agosto del 2019 se determinó el origen de las masas de aire a través de trayectorias regresivas. En la *Figura 20* y *Figura 21* se puede observar para una altura sobre el nivel del suelo de 2000 m las masas de aire cargada de aerosoles de Madre de Dios se desplazan hacia Huánuco generado por la acción del viento, a una altura sobre el nivel del suelo de 1500 m se desplazan de Ucayali hacia el lugar de destino. Según Suárez et al. (2006) coincide con los incendios forestales que ocurren en temporada seca (agosto a noviembre) en la Amazonía siendo la fuente de contaminación representativa, coincidente con escasas precipitaciones por tanto una mayor probabilidad de que los contaminantes lleguen a mayores distancias. Mientras que para una altura sobre el nivel del suelo de 1000 las masas de aire cargada de aerosoles son procedente de Pasco, representa el transporte de masas de aire de fuentes de contaminación por extracción de minerales ya que esta es la más representativa de este departamento.

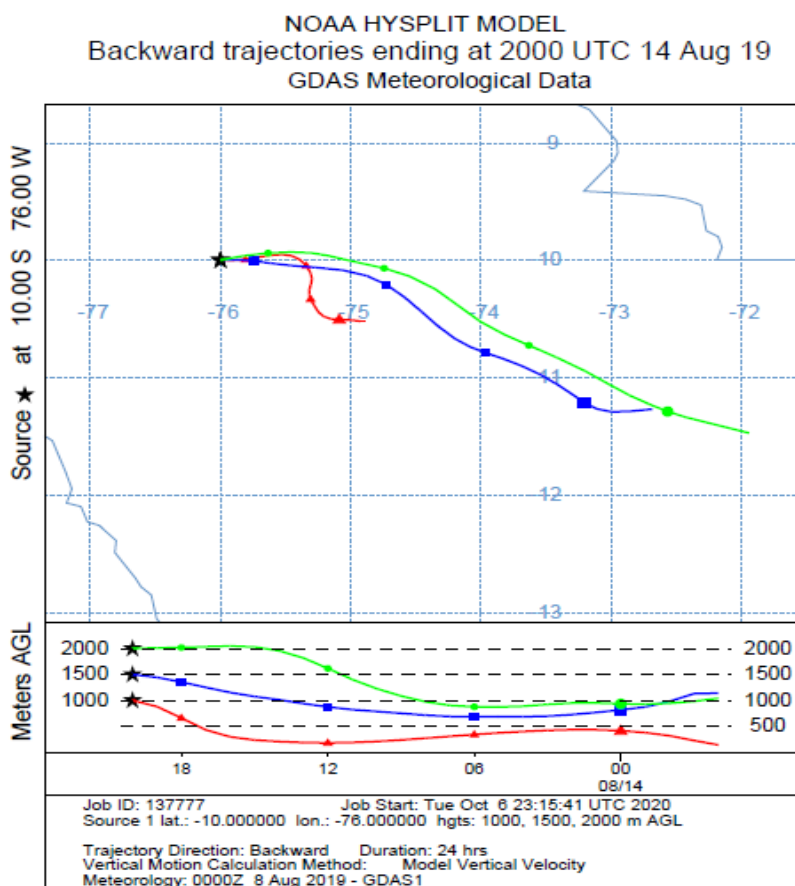


Figura 20. Trayectoria 14 de agosto del 2019 en el modelo HYSPLIT

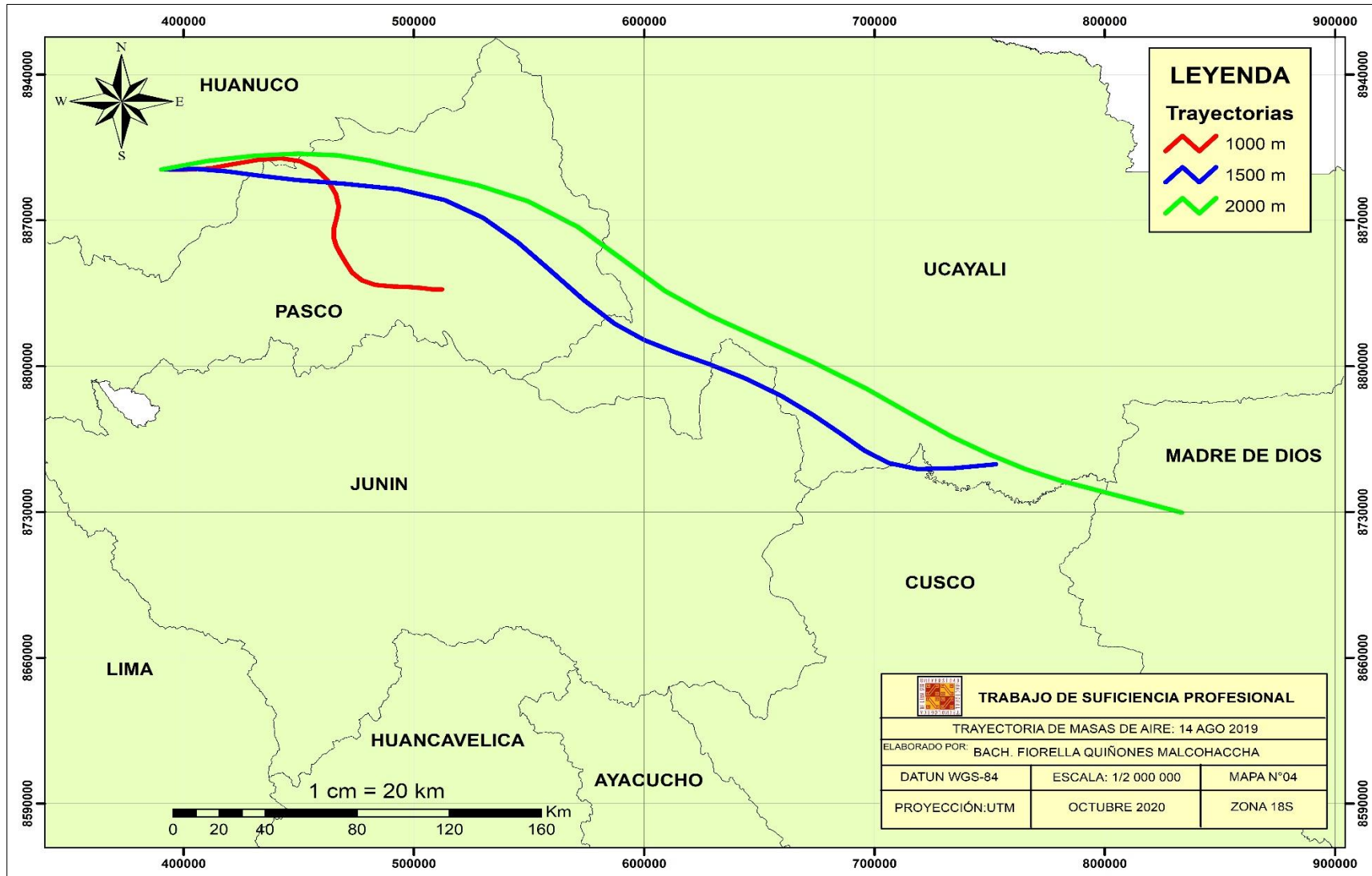


Figura 21. Trayectoria 14 de agosto del 2019

IV. CONCLUSIONES

La presente investigación evaluó la variabilidad temporal de la Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD) en el Perú del 2015 al 2019, haciendo uso de la AOD del conjunto de datos del sistema Giovanni del producto MODIS MYD08_D3 v6.1 a bordo del satélite *Aqua*, los valores oscilan entre 0.05 a 0.9, cabe resaltar que el sensor MODIS presenta limitaciones técnicas en relación a la presencia de nubes presentes en la atmósfera lo cual particularmente distorsiona el monitoreo de aerosoles en un tiempo determinado.

Mediante las series de tiempo de AOD se analizó la variabilidad temporal diaria de en el Perú, para el año 2015 los valores oscilan entre 0.08 a 0.4, en el 2016 entre 0.07 a 0.52, en el 2017 entre 0.07 a 0.71, en el 2018 entre 0.05 a 0.49 y en el 2019 entre 0.06 a 0.56. El año 2015 presentó una tendencia a una atmósfera limpia mientras que del 2016 al 2019 una atmósfera contaminada en relación al crecimiento del Perú significando una mayor carga de aerosoles afectando a la población y al ambiente. Del 2018 al 2019 los valores son menores en comparación del 2016 al 2017 debido a que en los últimos años se viene implementado acciones para abordar las causas directas e indirectas de la contaminación atmosférica.

Los valores máximos de AOD representan la máxima concentración de aerosoles por lo cual se identificó cuatro valores máximos durante el período del 2015 al 2019 estos corresponden a 0.8 para el 11 de setiembre del 2016, 0.9 para el 23 de setiembre del 2017, 0.6 para el 10 de setiembre del 2018 y 0.7 para el 14 de agosto del 2019. Los valores máximos ocurren en el mes de setiembre con excepción para el año 2019 que se da en el mes de agosto.

Mediante el modelo HYSPLIT se determinó las zonas de origen de la AOD a través de trayectorias de masas de aire para los cuatro valores máximos que llegan al destino de referencia (Huánuco). Para el 11 de setiembre del 2016 el transporte de masas de aire cargada de aerosoles se desplaza de Madre de Dios y Pasco, para el 23 de setiembre del 2017 se desplazan de Pasco, para el 10 de setiembre del 2018 se desplazan de Ucayali y Huánuco, finalmente el 14 de agosto del 2019 se desplazan de Madre de Dios, Ucayali y Pasco.

V. RECOMENDACIONES

Los datos a base de la percepción remota como MODIS a bordo del satélite Aqua y Terra tienen cobertura mundial, por ello se recomienda como una herramienta fundamental para realizar investigaciones futuras y complementarias sobre aerosoles atmosféricos así fomentar el uso de datos proporcionados por la NASA para aplicaciones ambientales.

Para la continuidad de la presente investigación se recomienda realizar una evaluación detallada en relación a la composición del aerosol y así identificar sus fuentes de origen, esto permitirá profundizar en este tema.

Al presente es costoso implementar una estación de monitoreo in situ que represente la calidad del aire de un área de estudio, una alternativa viable y económicamente factible es evaluar la variabilidad de la profundidad óptica de aerosoles ya que es un valor proporcional a la concentración de partículas atmosféricas y se viene utilizando para fines de monitoreo de calidad del aire.

Se debe seguir promoviendo acciones por parte de las autoridades competentes del estado peruano para abordar las causas directas e indirectas de la contaminación atmosférica por aerosoles por lo que es perjudicial para el ambiente y la salud de la población.

Se recomienda la implementar más fotómetros solares para la evaluación de AOD en el Perú para contrarrestar con datos obtenidos de MODIS, cabe resaltar que solo existe uno ubicado en la ciudad de Huancayo.

Para investigaciones con áreas de estudio menos extensas se recomienda trabajar con una resolución espacial de 1 km, 3 km, 6 km o 10 km dependiendo el caso.

VI. BIBLIOGRAFÍA

- Acker, J. G., Soebiyanto, R., Kiang, R., y Kempler SJ. (2014). Use of the NASA Giovanni Data System for Geospatial Public Health Research: Example of Weather-Influenza Connection. *ISPRS Int. J. Geo-Inf*, 3, 1372-1386. doi:10.3390/ijgi3041372
- Applied Remote Sensing Training, (2015). *Fundamentos de la percepción remota*. Obtenido de <https://go.nasa.gov/37qei5K>
- Bidegain, M. (2010). *Masas de aire y fuentes*. Recuperado de <https://bit.ly/2HBDdtP>
- Buseck, P. R., y Schwartz, S. E. (2003). Tropospheric Aerosols. *Elsevier Inc*, 4, 91-142. doi: 10.1016/B0-08-043751-6/04178-5
- Calvo, D., Molina, M. T., y Salvachúa, J. (2009). *Ciencias de la Tierra y Medioambientales*. 2°. España: Mc Graw Hill.
- Carnicer, J. M. (2008). *Contaminación Atmosférica*. España: Escuela de organización industrial. Recuperado de <https://www.eoi.es/es/file/18607/download?token=DQeBhR8t>
- Céspedes, J., Cuero, J. A., y Hernández, F. L. (2015). Metodología para medir las concentraciones de aerosoles atmosféricos usando técnicas de teledetección. *Puente Revista Científica*, 9(2), 61 - 77. doi: 10.18566/puente.v9n2.a07
- Chacón, L. M. (2015). *Efecto de los incendios forestales sobre la calidad del aire en dos ciudades colombianas* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Cholan, E. (2016). *Distribución espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles y del monóxido de carbono en el Perú relacionado con las quemadas de biomasa (2002-2014)* (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Chung, C. E. (2012). Aerosol Direct Radiative Forcing: A Review. *IntechOpen*. doi: 10.5772/50248
- De Nevers, N. (1998). *Ingeniería de control de la contaminación del aire*. Mexico: Mc Graw Hill.

- Earth Observing System (2013). *Missions: Aqua*. Recuperado de https://eosps.nasa.gov/sites/default/files/mission_handbooks/Aqua.pdf
- Earth Observing System (2013). *Missions: Terra*. Recuperado de https://eosps.nasa.gov/sites/default/files/mission_handbooks/Terra.pdf
- IQAir (2020). *World's most polluted countries 2019 (PM2.5)*. Recuperado de <https://www.iqair.com/world-most-polluted-countries>
- Levy, R., Mattoo, S., Munchak, L., Kleidman, R., Patadia, F., y Gupta P. (2014). Overview of Collection 6 Dark-Target aerosol product. Recuperado de <https://go.nasa.gov/2HV9L2n>
- Llorente, A. M. (2017). *Evaluación de la variabilidad espaciotemporal de la profundidad óptica de aerosoles en la zona carbonífera del Cesar a partir de observaciones satelitales* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.
- Manahan, S. E. (2007). *Introducción a la química ambiental*. Barcelona: Reverté S.A.
- Ministerio del Ambiente (2015). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2013-2014. Recuperado de <https://bit.ly/33DiDBY>
- Morales, R. G. E., y Leiva, M. (2006). Distribución y concentraciones críticas de material particulado en la ciudad de Santiago. En R. G. E. Morales. (Ed.) *Contaminación atmosférica urbana. Episodios Críticos de contaminación ambiental en la ciudad de Santiago (pp.121-209)*. Santiago de Chile: Universitaria. Recuperado de <https://bit.ly/2YH6kj2>
- National Aeronautics and Space Administration (2002). *MODIS*. Recuperado de <https://eosps.nasa.gov/sites/default/files/publications/MODIS.pdf>
- Núñez, D. M. (2017). *Caracterización de la variación diurna, mensual y estacional del espesor óptico de aerosoles, registrados en el observatorio de Huancayo, período marzo-2015 hasta julio-2016* (Tesis de pregrado). Universidad Continental, Huancayo, Perú.
- Oficina de información diplomática (2020). *Ficha país Perú*. Recuperado de http://www.exteriores.gob.es/Documents/FichasPais/PERU_FICHA%20PAIS.pdf
- Organización Mundial de la Salud (2018). *Calidad del aire y salud*. Recuperado de <https://bit.ly/2L8v6mf>

- Rojas, N. (2014). *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 de pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Rolph, G., Stein, A., y Stunder, B. (2017). Aplicaciones ambientales en tiempo real y sistem de visualización: LISTO. *Elsevier*, 95, 210-228.
- Sistema Regional de Visualización y Monitoreo de Mesoamérica (2009). *Aerosol optical depth (AOD)*. Recuperado de <https://bit.ly/2ZOjHN>
- Sistema Regional de Visualización y Monitoreo de Mesoamérica (2009). *Modelo HYSPLIT para trayectorias de masas de aire*. Recuperado de <https://bit.ly/36h6MLs>
- Suárez, L., Castillo, L., Marín, M., Carillo, G., Rimac, L., Pomalaya, J., y Menacho, R. (2006). Estudio de la variación estacional de ozono troposférico y aerosoles del Perú relacionado a las quemadas de vegetación en la Amazonía. *Mosaico Científico*, 3, 36-41.

VII. ANEXOS

Anexo 1: Sistema en línea Giovanni

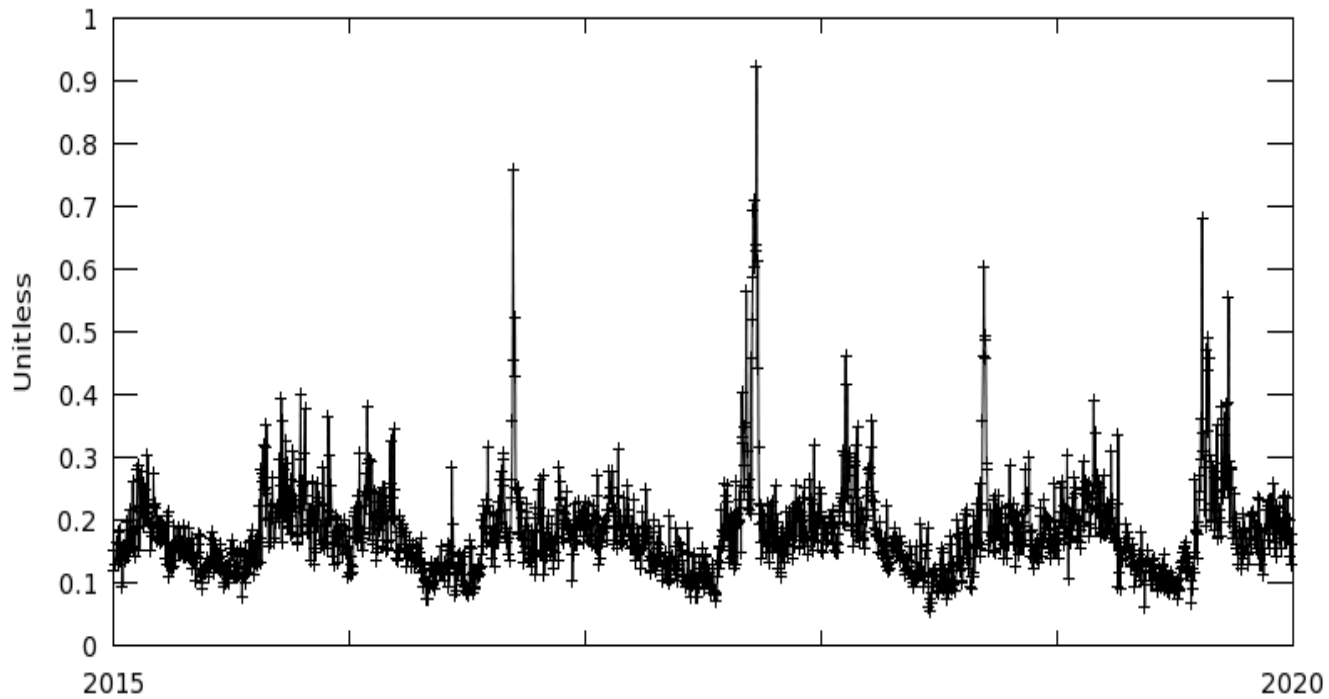
The screenshot shows the Giovanni web interface. At the top, it says "EARTHDATA Find a DAAC" and "GIOVANNI The Bridge Between Data and Science v 4.34". There are links for "Feedback", "Help", and "Login". The main area has three sections: "Select Plot" with a dropdown menu set to "Time Averaged Map"; "Select Date Range (UTC)" with two date pickers and a time selector; and "Select Region (Bounding Box or Shape)" with a text input field containing "-180, -90, 180, 90". Below these is a "Select Variables" section with two expandable lists: "Observations" (Model (945), Observation (662)) and "Disciplines" (Aerosols (266), Atmospheric Chemistry (207), Atmospheric Dynamics (598), Cryosphere (12), Hydrology (462), Ocean Biology (56), Oceanography (68), Water and Energy Cycle (580)). There is also a "Measurements" and "Platform / Instrument" section. A search bar with "Keyword:" is present. At the bottom, there is a "Reset" button and a green "Plot Data" button. The footer includes "Responsible NASA Official: Angela Li" and "Web Curator: M. Hegde".

Anexo 2: Modelo de trayectoria NOAA HYSPLIT

The screenshot shows the NOAA Air Resources Laboratory website. The header features the NOAA logo and the text "Air Resources Laboratory Advancing Atmospheric Science and Technology through Research". Below the header is a breadcrumb trail: "Inicio ARL > LISTO > Modelado de transporte y dispersión > HYSPLIT > Modelo de trayectoria HYSPLIT". The main content area has a large logo for "HYSPLIT Trayectorias" and "AIR RESOURCES LAB". To the right of the logo is a small icon with the word "READY" and a NOAA logo. Below the logo, there are two columns of links: "Calcular trayectorias de pronóstico", "Calcular trayectorias de archivo", "Recuperar resultados de modelos anteriores", and "Reiniciar la sesión del usuario (borrar las entradas del usuario)" on the left; and "Pronósticos actuales de trayectoria precalculados en EE.UU.", "Optimización de trayectoria para vuelos en globo", and "Volver a la página principal de HYSPLIT" on the right.

Anexo 3: Serie de tiempo de AOD obtenido de Giovanni

Time Series, Area-Averaged of Combined Dark Target and Deep Blue AOD at 0.55 micron for land and ocean: Mean daily 1 deg. [MODIS-Aqua MYD08_D3 v6.1] over 2015-01-01 - 2019-12-31, Region 83.4961W, 18.3281S, 67.5W, 0.6563N



- The user-selected region was defined by 83.4961W, 18.3281S, 67.5W, 0.6563N. The data grid also limits the analyzable region to the following bounding points: 82.5W, 17.5S, 67.5W, 0.5N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetted granules that went into making this visualization result.