

UNIVERSIDAD NACIONAL TECNOLÓGICA DE LIMA SUR

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL**



**“VARIABILIDAD TEMPORAL DE ESPECTRO ÓPTICO DE LOS
AEROSOLES SOBRE HUAYAO-HUANCAYO USANDO IMÁGENES
SATELITALES”**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de

INGENIERO AMBIENTAL

PRESENTADO POR EL BACHILLER

HERMOZA AYME, NILTON ALEXANDER

**Villa El Salvador
2017**

DEDICATORIA:

“A mis padres: Eusebio HermozaYapu y Fortunata
Ayme Quispe, y mis hermanos que siempre me
inculcaron valores necesarios y a Dios por habernos
cuidado y otorgarnos esta oportunidad para poder
culminar esta etapa satisfactoriamente”

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Tecnológica de Lima Sur, en especial al a plana de docentes de carrera de Ingeniería Ambiental por las experiencias compartidas y las enseñanzas bridadas durante periodo académico.

A mi asesor OdonSanchez por su ayuda constante durante todo el proceso de la investigación del presente trabajo de investigación.

Al instituto Geofísico del Perú, la doctora Yamila Silva Vidal y al Ingeniero Luis Suarez por proporcionar los datos de AERONET y mencionar que los valores de espesor óptico de aerosoles fueron calibrados a partir de noviembre del 2016.

A mis amigos Erik y Vanesa por su colaboración en la ejecución del presente trabajo.

A mis hermanos por el constante aliento y comprensión para poder concluir el presente trabajo.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	3
1.2. JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA	5
1.3. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.4. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	7
1.5. OBJETIVO.....	8

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO	10
2.1. ANTECEDENTES.....	10
2.2. BASES TEÓRICAS.....	20
2.2.1. Estudio de área.....	20
2.2.2. Contaminación de aire	23
2.2.3. Material particulado.....	25
2.2.4. Aerosoles	26
2.2.5. Detección Remota de Material Particulado	37
2.2.6. Técnicas de la Medición de Aerosoles	42
2.2.7. Red AERONET	44

2.3.	MARCO CONCEPTUAL.....	47
2.3.1.	APLICACIÓN GIOVANNI–MODIS.....	47
2.3.2.	MODIS	48
2.3.3.	TERRA-AQUA.....	49
2.3.4.	LAMAR	49
2.3.5.	AERONET	50
2.3.6.	BALANCE RADIATIVO.....	50
2.3.7.	NÚCLEOS DE CONDENSACIÓN	50
2.3.8.	ACCESO A LAS PANTALLAS DE DATOS	51

CAPÍTULO III

3.	ANÁLISIS DEL MODELO	52
3.1.	Recolección de datos del espesor óptico de los aerosoles.....	52
3.1.1.	Datos de superficie a partir de AERONET	53
3.1.2.	Datos del espacio a partir de la APLICACIÓN GIOVANNI	55
3.2.	Comparación de la variabilidad temporal de los datos del espesor óptico obtenidos de la APLICACIÓN GIOVANNI (MODIS Aqua y Terra).....	59
3.3.	Análisis de correlación de los datos del espesor óptico de aerosoles obtenidos de la APLICACIÓN GIOVANNI y medidos en superficie por AERONET.....	60
3.4.	Revisión de resultados.....	60

CONCLUSIONES.....	68
RECOMENDACIONES.....	69
BIBLIOGRAFÍA	70
ANEXOS	78

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
FIGURA 1. Ubicación de la estación Climatológica Principal de Huayao	Pg. 22
FIGURA 2: Ubicación del área de investigación.	Pg. 22
FIGURA 3: Rango de tamaño de partículas en la atmósfera y su importancia	Pg. 27
FIGURA 4: Canales MODIS y usos primarios para determinaciones de aerosoles.	Pg. 40
FIGURA 5: Esquemática de una medición directa del fotómetro solar de la extinción de la radiación solar a través de la atmósfera. El instrumento ilustrado es el instrumento CIMEL utilizado por AERONET.	Pg. 44
FIGURA 6: El fotómetro solar CE-318 es el aparato standard de la red.	Pg. 47
FIGURA 7: Características de los datos obtenidos a partir del AERONET- Huancayo.	Pg. 54
FIGURA 8: Grafica del espesor óptico de aerosoles a 500 nm del mes de junio del 2017.	Pg.54
FIGURA 9: Grafica del espesor óptico de aerosoles a 500 nm del 10 de junio del 2017.	Pg.55
FIGURA 10: APLICACIÓN GIOVANNI.	Pg.58
FIGURA 11: Variabilidad Interanual del EOA-550 con el sensor MODIS de la plataforma Terra, a lo largo de 13 años.	Pg. 61
FIGURA 12: Variabilidad Interanual del EOA-550 con el sensor MODIS de la plataforma Aqua, a lo largo de 13 años.	Pg. 62

FIGURA 13: Variabilidad Interanual del EOA-550 con el sensor MODIS de la plataforma Aqua y Terra, a lo largo de 13 años respectivamente.	Pg. 63
FIGURA 14: Correlación del promedio mensual del Espesor Óptico de Aerosol en 550 nm entre MODIS-Aqua y MODIS-Terra.	Pg. 65
FIGURA 15: Correlación del promedio diario del Espesor Óptico de Aerosol entre MODIS Aqua-Terra y AERONET.	Pg.66

LISTA DE TABLAS

TABLA	PÁGINA
TABLA N° 1. Composición de química de la atmosfera	Pg. 24
TABLA N° 2. Número de partículas por centímetro cúbico en diferentes tipos de localizaciones sobre la superficie terrestre	Pg. 31
TABLA N° 3: Comparación entre partículas finas y gruesas	Pg. 37
TABLA N° 4: Características de los datos del Espesor Óptico del Aerosol	Pg. 57

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación lleva por título “VARIABILIDAD TEMPORAL DE ESPESOR ÓPTICO DE LOS AEROSOLES SOBRE HUAYAO-HUANCAYO USANDO IMÁGENES SATELITALES”, para optar el título de “Ingeniero Ambiental”, presentado por el alumno NILTON ALEXANDER HERMOSA AYME.

En la actualidad producto de la contaminación generada por las diversas actividad humana, llevado a afectar la calidad del aire con la emisión de aerosoles principalmente el PM 2.5, que es uno de los más críticos por su efecto en el ambiente y en la población. Afectado la calidad del aire y además modifica el balance radiativo de nuestro planeta, debido a la composición química propiedades físicas que presentan los aerosoles, que son capaces de absorber y dispersar la radiación solar que índice sobre los aerosoles. Así modificando el balance de la radiación energética.

En el Perú la dirección general de Salud Ambiental (DIGESA), es una de las instituciones que estudia la calidad de aire y además que informa las concentraciones anuales de las partículas menores a 2.5 μm en Lima. Las concentraciones de las partículas superan de 4 a 5 veces el valor de referencia indicado por el ECA (Estándar de Calidad de Aire).

Esto demuestra que la presencia constante de los aerosoles en el ambiente, que son contante. Por ello tener en cuenta la presencia de los aerosoles en la atmosfera es

importante, por estar relacionada con el cambio climático. En la actualidad para poder obtener información sobre la concentración de aerosol, se utiliza la estación de monitoreo en diferentes lugares para brindar información precisa y confiable.

Pero cabe resaltar que la instalación de una estación de monitoreo de calidad de aire es muy costosa, tanto en su implementación y operación continua. Debido a ello se hace uso de la APLICACIÓN GIOVANNI para obtener información sobre el espesor óptico de aerosol, que representa una magnitud adimensional. Esta magnitud indica el poder que poseen las partículas de aerosol para atenuar la radiación a una cierta longitud de onda (Berrick et al, 2009; Almedia 2005).

El objetivo de este trabajo es analizar la variabilidad temporal del espesor óptico de aerosol en la región de Huayao-Huancayo. La estructura del trabajo de investigación comprende 3 capítulos. El primer capítulo comprende el planteamiento del problema, el segundo capítulo es el desarrollo del marco teórico y el tercer capítulo corresponde al desarrollo del proyecto de ingeniería.

NILTON ALEXANDER HERMOZA AYME

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA

En la actualidad el desarrollo industrial es una de los factores más importantes para los países, ya que es el principal motor para que un país desarrolle. Producto de la industrialización que consiste en la producción de bienes a gran escala, mediante la utilización de maquinaria accionada por fuentes de energía como el petróleo, gasolina y el gas. Como resultado obtienen energía que realiza trabajo, diferentes gases y aerosoles que se emiten al a atmosfera. También las fuentes naturales emiten contaminantes a la atmosfera, como las erupciones volcánicas, el polvo de los desiertos y las sales marinas pero en menor medida.

Los aerosoles son partículas sólidas y líquidas que se encuentran suspendidas en la atmosfera, con tamaños que oscilan entre centenas y milésimas de micras. La cantidad total de aerosoles que se encuentran suspendidas en el aire varían desde $1\mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que se observa sobre los casquetes polares o en la troposfera oceánica libre, hasta $1\text{mg}/\text{m}^3$ valor que se observa en las tormentas de arena o en los humos cargados de ceniza de los incendios forestales.

En estos tiempos donde el cambio climático es un problema serio para el planeta, es importante saber el rol que juegan los aerosoles en la atmosfera, ya que en la actualidad diferentes actividades productivas las emiten. Ahora se sabe que juegan un papel importante para la vida, ya que modifica el balance radiactivo de nuestro planeta.

Debido a diferentes características que presenta los aerosoles, son capaces de absorber y dispersar la radiación solar que incide sobre ellas, modificando el balance de radiación energética. La caracterización de las variaciones temporales de la contaminación por aerosoles es fundamental para un buen entendimiento completo de formación, el transporte y la acumulación en la atmosfera. Además la información es importante para el control y vigilancia de la variación de los aerosoles y realizar seguimiento de los acontecimientos que alteran sus concentraciones.

En la actualidad se encuentra en funcionamiento una estación CLIMATOLÓGICA PRINCIPAL, que está ubicada en observatorio de HUANCAYO-HUYAO. Esta estación se

realiza mediciones de fotómetro solar para la medición de aerosoles en Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR). Esto permitirá los estudios de las propiedades ópticas, microfísicas y radiactividad de los aerosoles y validar las mediciones de los registros satelitales. Los datos principalmente se enfocaran en detectar el posible transporte de aerosoles emitido por las quemas de la vegetación en la amazonia sobre la región andina.

1.2 JUSTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.

La concentración alta de aerosoles en el ambiente, producto de las actividades industriales nos ha llevado una situación crítica para la calidad de vida de la población. Además la falta de sensibilización de la población hacia los problemas ambientales, ha ocasionado que la contaminación se de en todo el mundo.

En vista de poder correlacionar los datos obtenidos de la APLICACIÓN GIOVANNI, para obtener datos accesibles y realizar diferentes estudios sobre la reactividad de los aerosoles y además que presenta la ventaja de ser compacto, fácil operación y descarga en línea.

El estudio plantea en este documento determinar la viabilidad temporal del espesor de aerosol y además encontrar la correlación que existe entre los datos obtenidos de la APLICACIÓN GIOVANNI y los datos tomados de la estación climatológica principal de Huayaosobre el espesor óptico de los aerosoles (EOA).

La obtención de los datos de la APLICACIÓN GIOVANNI, y además los datos medidos *in situ* en la estación climatológica principal de Huayao, se presenta como una alternativa para determinar la correlación que existen entre los 2 datos.

Para ello se tomará los datos de la APLICACIÓN GIOVANNI del periodo de enero del 2004 hasta abril del 2017, con el objetivo de observar la variabilidad del espectro óptico de los aerosoles.

1.3 DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Teórica: A partir de las investigaciones revisadas se encontró a Vivanco S. (2014). Universidad Continental. Variabilidad temporal de los aerosoles atmosféricos en Huancayo. Que plantea la presente investigación con el objetivo de identificar la variabilidad temporal del espesor óptico de los aerosoles atmosféricos en Huayao-Huancayo.

Espacial: Se realizará en la estación climatológica principal Huayao-Huancayo y además de los datos obtenidos a partir de la APLICACIÓN GIOVANNI.

Temporal: Comprende el período de: agosto 2004-2017

1.4 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.

Debido al deterioro que se está dando en el medio ambiente, ya sea por el consumo desmedido de los recursos naturales, las diferentes emisiones de las actividades industriales y por la quema de bosques (biomasa), que son fuente principal de la emisión de los aerosoles y oxidantes químicos como el CO, NO_x y partículas de carbono orgánico y elemental. La quema de biomasa es una práctica muy recurrente en América del sur, inclusive es una de las mayores fuentes de contaminación atmosférica a escala continental.

Cabe resaltar que en la actualidad es muy costoso instalar una estación de calidad de aire, debido al costo de equipamiento y el personal capacitado. Dado ello una alternativa viable y económicamente factible, es el análisis de imágenes satelitales obtenidas a partir de la APLICACIÓN GIOVANNI, para obtener una correlación de los datos medidos en el espacio y los datos medidos *in situ* (campo)

Se tiene evidencias del transporte transfronterizo de contaminantes del aire en la Amazonía del Perú debido a la quema de vegetación en Brasil, donde se evaluó datos de ozono troposférico, así como de aerosoles mediante la teledetección, usando técnicas de los sensores TOMS (total ozone mappingspectrometer) y MODIS. Se pudo establecer la significancia estadística del efecto de la quema en los niveles de ozono troposférico registrados en Huancayo, los aerosoles mostraron similar tendencia.

Debido a ello, ¿Cómo es el comportamiento de la variación temporal del espesor óptico de los aerosoles atmosféricos en Huayao-Huancayo? Este es el problema que da origen a nuestro estudio.

1.4.1 PROBLEMA GENERAL.

¿Cómo es el comportamiento de la variación temporal del espesor óptico de los aerosoles atmosféricos en Huayao-Huancayo?

1.4.2 PROBLEMAS ESPECÍFICOS.

- ¿Cuál son las fuentes confiables para la obtención de los datos del espesor óptico de aerosol de Huayao-Huancayo?

- ¿Cómo manejar los datos del espesor óptico de aerosol obtenidos de la APLICACIÓN GIOVANNI Y AERONET

- ¿Cuál es la relación entre los datos de espesor óptico de aerosol obtenidos con la APLICACIÓN GIOVANNI y los medidos en superficie en la estación de Huayao.

1.5 OBJETIVOS.

1.5.1 OBJETIVO GENERAL.

- Identificar variabilidad temporal del espesor óptico de los aerosoles atmosféricos en Huayao-Huancayo.

1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Recolectar los datos del espesor óptico usando la APLICACIÓN GIOVANNI y AERONET.
- Comparar la variabilidad temporal de los datos del espesor óptico de aerosoles obtenidos de GIOVANNI entre MODIS Agua y Terra.
- Analizar la correlación de los datos del espesor óptico de aerosoles entre los obtenidos de la APLICACIÓN GIOVANNI y los medidos en superficie en la estación Huayao.

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. ANTECEDENTES.

En el año 2014, Sthefany Vivanco de la Universidad Continental, realizo un estudio sobre la Variabilidad temporal de los aerosoles atmosféricos en Huancayo. El objetivo del estudio fue identificar la variabilidad temporal de los aerosoles atmosféricos en Huancayo mediante datos satelitales, tomando como parámetros de medición al espesor óptico de aerosol (EOA) y al índice de aerosol (IA), usando datos satelitales procedentes de los sensores MODIS(espectroradiómetro de imagen es de media resolución) y OMI (instrumento de monitoreo de ozono).

Investigación de alcance descriptivo, diseño longitudinal. Los datos utilizados fueron, el índice de aerosol (IA) tomados por el sensor OMI (ozone monitoring instrument) en el período 2005-2012; y el espesor óptico de aerosol (EOA) registrados por el sensor MODIS (moderate resolution imaging spectro radiometer) de las plataformas Aqua y Terra, en los períodos 2003 - 2012 y 2001-2012, respectivamente.

Los resultados obtenidos, el índice de aerosol registró el año 2012 un máximo interanual de 0,61; durante el período enero-marzo disminuyó a 0,30; abril-agosto aumentó a 0,75 y setiembre-diciembre disminuyó a 0,43. En cambio, el EOA reportó en el 2005 un máximo interanual de 0,22; en el período abril-junio disminuyó a 0,09; julio-setiembre aumentó a 0,30; octubre-diciembre disminuyó a 0,22, y enero-marzo aumentó a 0,20. El análisis estadístico reportó un coeficiente de correlación entre el IA del sensor OMI y el EOA del sensor MODIS de las plataformas Aqua y Terra, siendo 0,1041 y 0,0982 ($p < 0,05$), respectivamente. La misma correlación fue efectuada entre los datos del sensor MODIS, resultando más elevada 0,902 ($p < 0,05$). El IA mostró una tendencia de incremento a razón de 0,036 /año; el EOA de disminución, 0,003 /año.

Según a los resultados obtenidos, la conclusión se identificó un patrón de variación significativo entre las estaciones y los meses de ambos parámetros con elevados valores del IA en invierno y otoño, máximos en agosto; el EOA, en primavera y verano, máximos en septiembre. (Variabilidad temporal de aerosoles atmosféricos en Huancayo)

En el año 2013, Joel Rojas Acuña, Penélope Vargas Gargate, Flavio Carrillo Gómero de la Universidad Mayor de San Marcos, realizaron un estudio sobre la Variabilidad Espacial y Temporal del Espesor Óptico de los Aerosoles sobre Perú usando Imágenes de Satélite. El objetivo del trabajo es analizar la variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles sobre la región 0°-20°S de latitud y 90°-70°W de longitud, (Perú) y a la región 8°-3°S de latitud y 82°-79°W de longitud, (Costa Norte).

Los datos utilizados fueron, obtenidos el espesor óptico del aerosol promedio mensual procedente de los sensores MODIS y SeaWiFs, se recuperaron de las páginas Web, Nasa-Ocean. Los datos coeficiente de Angström promedio mensual procedentes del sensor MODIS se obtuvieron de la página Web Nasa-Ocean, (2017).

A partir de los datos obtenidos se graficaron todas las series temporales para analizar la variabilidad temporal del espesor óptico del aerosol. Se realizaron correlaciones entre los datos adquiridos de los sensores MODIS, a bordo de los satélites AQUA y TERRA, para verificar la confiabilidad de sus datos. Se realizaron gráficas del coeficiente de Angström vs espesor óptico del aerosol, de los datos procedentes del sensor MODIS (AQUA y TERRA) en la longitud de onda de 550 nm, para observar el tipo de partículas que se encuentran presentes en la atmósfera de la regiones en estudio.

Según los resultados obtenidos, se concluye que se estableció que La APLICACIÓN GIOVANNI es una herramienta importante para la investigación de la Ciencia de la Tierra, sus usuarios son capaces de extraer rápidamente los múltiples datos que posee.

Además observa una alta correlación entre los datos adquiridos provenientes de los sensores MODIS, a bordo de los satélites AQUA y TERRA. Esta precisión demuestra la confiabilidad de los productos de MODIS. Y también Las series de tiempo de los promedios temporales del espesor óptico del aerosol, en diferentes longitudes de onda y de diferentes sensores, demuestran un comportamiento cíclico observándose máximos en los meses de verano. (Variabilidad Espacial y Temporal del Espesor Óptico de los Aerosoles sobre Perú usando Imágenes de Satélite).

En el año 2006, Mohammad Al-Hamdan de las Universidades de la Asociación de Investigación Espacial en la NASA / MSFC, realizaron un estudio sobre la utilidad de la Profundidad Óptica del Aerosol de MODIS para Estimar la exposición PM2.5 en la Vigilancia de Salud Pública. Con el objetivo Vincular datos ambientales (MODIS) relacionados con PM2.5 a nivel del suelo con datos de salud relacionados con el asma.

Los datos ambientales se obtuvieron del Sistema de Calidad del Aire EPA de los Estados Unidos (AQS): Medidas PM2.5 diarias y NASA EOS Data Gateway: Profundidad óptica de Aerosol MODIS (AOD), utilizada para estimar las concentraciones de PM2.5 en el nivel del suelo. A partir del estudio de concluyo que el este método de estimar las concentraciones de PM2.5 mediante la fusión de los datos de detección remota MODIS con las observaciones superficiales de PM2.5 no sólo proporciona una representación diaria más completa de PM2.5 que el conjunto de datos solo permitiría, sino que también reduce los errores en las superficies estimadas PM2.5 Con respecto a las observaciones. Este estudio ha demostrado la viabilidad de vincular los datos ambientales (MODIS PM2.5

estimaciones y observaciones en el suelo) con los datos de salud (asma). La aplicabilidad de este método para estimar las concentraciones de PM2.5 en otras partes del país y del mundo merece un estudio más profundo.

En el año 2006, Christopher J. Paciorek del Departamento de Bioestadística de la Escuela de Salud Pública de Harvard, Boston, realizaron un estudio sobre Integración de los datos de satélites y monitoreo para estimar mensualmente las concentraciones mínimas de PM2.5 en el estado de los Estados Unidos. Con el objetivo de formular un modelo estadístico para relacionar las observaciones con un proceso espacio-tiempo latente que representa la PM2.5 verdadera de una manera que explica el desajuste espacial y temporal y la naturaleza del error y sesgo.

A partir del estudio se concluyó que el espesor óptico de aerosoles obtenidos del satélite tiene alguna promesa para mejorar las predicciones de PM2.5, pero es probablemente más útil a escala mensual o anual. Además, la capacidad del satélite AOD para mejorar las predicciones relativas a los modelos basados en PM2.5 datos, el tiempo y las variables de SIG es una cuestión clave.

En el año 2006, Aaron van Donkelaar del Departamento de Física y Ciencias Atmosféricas de la Universidad de Dalhousie, Halifax, Nueva Escocia, Canadá, Randall V. Martin del Centro Harvard-Smithsonian de Astrofísica, Cambridge, Massachusetts, EE.UU y Rokjin J. Park de la Universidad de Harvard, Cambridge, Massachusetts, EE.UU.

Realizaron una investigación sobre la Estimación de PM_{2.5} a nivel del suelo con profundidad óptica de aerosol determinada a partir de la detección remota por satélite. Se Evaluó la relación de las concentraciones de partículas finas en el suelo (PM_{2.5}) medidas como parte de la red canadiense nacional de vigilancia de la contaminación atmosférica (NAPS) y el sistema de calidad del aire de los Estados Unidos (AQS), frente a las PM_{2.5} de sensores remotos determinados a partir de (AOD) medido por el espectro radiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) y los instrumentos de satélite Spectroradiometer (MISR). Un modelo global de transporte químico (GEOS-CHEM) se utiliza para simular los factores que afectan a la relación entre AOD y PM_{2.5}.

El perfil vertical de la extinción de aerosoles es el factor más importante que afecta la relación espacial entre las mediciones de satélites y superficiales de PM_{2.5}; la omisión de este parámetro reduciría la correlación espacial a 0,29. Por el contrario, la variación temporal en espesor óptico de aerosol, es el parámetro más influyente que afecta la relación temporal entre las mediciones de satélite y superficiales de PM_{2.5}; El descuido de la variación diaria en este parámetro disminuiría la correlación en el este de Norteamérica de 0,7 a 0. Otras propiedades simuladas de aerosoles, como el radio efectivo y la eficiencia de extinción tienen un papel menor. La cartografía global de PM_{2.5} de MODIS y MISR revela concentraciones medias anuales de 40-50 ug / m³ sobre el norte de la India y China.

En el año 2013, X. Hu. del Departamento de Salud Ambiental, Escuela de Salud Pública Rollins, Universidad de Emory, A. Waller, A. Lyapustin, Y. Wang y Y. Liu. Realizaron una investigación sobre las Tendencias espaciales y temporales a 10 años de las

concentraciones de PM2.5 en el sur-este de Estados Unidos, utilizando datos satelitales de alta resolución.

La exposición a largo plazo de PM2.5 se ha asociado con varios resultados adversos para la salud. Sin embargo, la mayoría de los monitores terrestres están ubicados en áreas urbanas, lo que conduce a una representación potencialmente sesgada de verdaderos niveles regionales de PM2.5. Para facilitar los estudios epidemiológicos, es importante contar con estimaciones exactas de la distribución espacio y tiempocontinuo de las concentraciones de PM2.5.

El espesor óptico de aerosol obtenido por satélite (EOA) se ha utilizado cada vez más para la estimación de la concentración de PM2.5 debido a su amplia cobertura espacial. En este trabajo se utilizó un nuevo producto EOA con 1km de resolución espacial recuperado por el algoritmo de corrección atmosférica (MAIAC) basado en las mediciones MODIS. Se desarrolló un modelo en dos etapas para explicar la variabilidad espacial y temporal en la relación PM2.5-EOA al incorporar el MAIAC-EOA, los campos meteorológicos y las variables del uso de la tierra como predictores. El área de estudio se encuentra en el sureste de los EE.UU. centrado en el área metropolitana de Atlanta, y los datos de 2001 a 2010 se recogieron de diversas fuentes. El modelo se instaló anualmente y se obtuvo un modelo R^2 que variaba de 0.71 a 0.85, un error de predicción media (MPE) de 1.73 a $2.50\mu\text{gm}^3$ y un error de predicción cuadrático medio (RMSPE) de 2.75 a $4.10\mu\text{gm}^3$. Además, se encontró la validación cruzada R^2 que van desde 0,62 a 0,78, MPE de 2,00 a $3,01\mu\text{gm}^3$, y RMSPE de 3,12 a $5,00\mu\text{gm}^3$, lo que indica un buen acuerdo entre los valores estimados y

observados. Las tendencias espaciales mostraron que los altos niveles de PM_{2.5} se producían en áreas urbanas ya lo largo de carreteras importantes, mientras que las bajas concentraciones aparecieron en áreas rurales o montañosas. Nuestro análisis de series de tiempo mostró que, para el período de estudio de 10 años, los niveles de PM_{2.5} en el sureste de Estados Unidos han disminuido en ~ 20%. La disminución anual ha sido relativamente constante de 2001 a 2007 y de 2008 a 2010, mientras que se produjo una caída significativa entre 2007 y 2008. Un aumento observado en los niveles de PM_{2.5} en el año 2005 se atribuye a concentraciones elevadas de sulfato en el área de estudio en meses cálidos de 2005.

En el año 2011, H. J. Lee, Y. Liu, B. A. Coull, J. Schwartz, y P. Koutrakis del Departamento de Salud Ambiental, Escuela de Salud Pública de Harvard, Boston. Realizaron una investigación con un nuevo enfoque de calibración de datos MODIS EOA para predecir las concentraciones de PM_{2.5}.

Los estudios epidemiológicos que investigan los efectos de las PM_{2.5} sobre la salud humana son susceptibles a errores de medición de exposición, una forma de sesgo en las estimaciones de la exposición, ya que se basan en datos de un número limitado de monitores PM_{2.5} dentro de su área de estudio. Los datos satelitales pueden utilizarse para ampliar la cobertura espacial, aumentando potencialmente nuestra capacidad de estimar exposiciones específicas a la PM_{2.5}, pero algunos han informado de un poder predictivo deficiente. Se desarrolló una nueva metodología para calibrar los datos de profundidad óptica de aerosol obtenidos del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada

(MODIS). Posteriormente, este método se utilizó para predecir las concentraciones diarias de PM2.5 en la región de Nueva Inglaterra.

Se utilizó un modelo de efectos mixtos que permite la variabilidad día a día en las relaciones PM2.5-EOA diarias para predecir los niveles de PM2.5 específicos de la localización. Las concentraciones de PM2.5 medidas en los sitios de monitoreo fueron comparadas con las predichas para las celdas de cuadrícula correspondientes. Tanto las comparaciones transversales como las longitudinales entre las concentraciones observadas y las predichas sugirieron que el nuevo enfoque de calibración propuesto hace que los datos MODIS EOA sean un predictor potencialmente útil de las concentraciones de PM2.5. Además, se examinaron los niveles estimados de PM2.5 dentro del dominio del estudio en relación con las fuentes de contaminación del aire. Nuestro enfoque permitió investigar los patrones espaciales de las concentraciones de PM2.5 dentro del dominio del estudio.

A partir de la investigación se concluyó que los datos de EOA del satélite se utilizaron cada vez más para los estudios de contaminación atmosférica de PM2.5. Las tecnologías de teledetección tienen un gran potencial para ampliar las actuales redes de monitoreo PM2.5 en el nivel del suelo. Hasta la fecha, la aplicación de datos satelitales a estudios de efectos sobre la salud se ha limitado debido principalmente al poder insuficiente de la EOA para predecir PM2.5 ya la alta frecuencia de días de no recuperación. Hemos introducido un método de calibración para EOA que permitió determinar los patrones temporales y espaciales de PM2.5 en un amplio dominio de estudio que comprende los estados de Massachusetts, Connecticut y Rhode Island. Un acercamiento a la predicción PM2.5 para los días de no recuperación será presentado en nuestro próximo trabajo.

Se prevé que las futuras tecnologías de satélites proporcionarán datos con mejores resoluciones espaciales y temporales y una recuperación más precisa de los datos. Además, la capacidad avanzada de discriminar por las especies de aerosoles en las tecnologías de satélites contribuirá aún más a los estudios de efectos sobre la salud que investiguen las implicaciones para la salud de especies específicas. Dado que los datos de satélites están fácilmente disponibles, las concentraciones de PM_{2.5} se pueden predecir de una manera rentable. Teniendo en cuenta las escasas redes de monitoreo de PM_{2.5} a nivel del suelo, nuestro método ayudará a investigar las asociaciones entre exposiciones específicas de sujetos a PM_{2.5} y sus efectos sobre la salud.

En el año 2015, N. Rojas y J. Rojas de la facultas de Ciencias Físicas, de la Universidad Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Realizaron una investigación sobre el Estudio de la dinámica del espesor óptico de los aerosoles en Perú y América del Sur a partir de las imágenes satelitales Terra y Aqua en el periodo de 200-2013.

El objetivo de esta investigación estudia la dinámica d de loa aerosoles y América del Sur entre las latitudes 4 °N - 24°S y las longitudes 83°W -33°, a partir de las imágenes de los promedios mensuales del espesor óptico de Aerosoles (EOA) en la longitud de onda 550 nm medidos por el sensor MODIS (Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada), a bordo de los satélites Aqua y Terra. En un periodo de 14 años. Se ha usado los datos EOA *in-suti* en 6 estaciones de América del Sur. AERONET que incluyen 4 de Brasil (Rio Branco, Paramá Ji, Alta Foresta y Campo grande), uno de Chile (Estación de

Arica), uno de Bolivia (Estación la Paz); además se incorporó 166 imágenes EOA-MODIS-TERRA mensuales obtenido del periodo del 2002 al 2013 estimados a partir de la herramienta de visualización y análisis, GIOVANNI con un resolución $1^\circ \times 1^\circ$.

La serie de tiempo EOA-MODIS-TERRA tiene valores máximos y mínimos entre 0.499 y 0.0. Los valores máximos se ubican en la temporada seca del hemisferio sur, entre agosto a noviembre. La serie de tiempos EOA-AERONET en las 4 estaciones de Brasil muestran una variación estacional con máximos en la estación seca durante 14 años, mientras en las estaciones de Chile y Bolivia se muestra variación estacional muy diferente, que no estable una relación clara entre el espesor óptico de aerosol del satélite y los datos tomados en superficie, debido a los pocos registros que existen.

Las gráficas de dispersión de las series de tiempo AOT-MODIS vs AOT-AERONET muestran una alta correlación de 0.8 a 0.9 en cuatro estaciones de Brasil y una correlación baja de 0.33 a 0.39 en la estación de Chile y de 0.13 a 0.19 en la estación de Bolivia.

2.2. BASES TEÓRICAS.

2.2.1. Estudio de área.

Este estudio se basa en investigaciones previas para establecer si MODIS-espesor óptico de aerosol (EOA) es una herramienta válida para estimar el EOA para una región urbana en el

centro del Perú, y específicamente para el Área de Huayao-Huancayo, una región con una topografía heterogénea, superficie Cobertura y clima. En cuanto a la ubicación Huayao-Huancayo en este caso se refiere específicamente a la estación climatológica de Huayao que se encuentra al oeste del a capital de Huancayo.

Huayao pertenece a la distrito de Huachac, provincia Chupaca y de departamento de Junín. Esta área presenta una población 3888 habitantes. (Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda).

Pocos estudios similares utilizando MODIS-EOA para estimar el espesor óptico de los aerosoles se han realizado. También hay un sistema desarrollado de monitoreo en la estación climatología principal de Huayao en tierra mantenida por Instituto Geofísico del Perú (IGP) y Nasa (NationalAeronautics and SpaceAdministration)

El área Huayao- Huancayo tiene un clima templado. La temperatura máxima es de 23°C y la mínima de 4°C. La temporada de lluvia inicia a mediados de octubre y termina por el mes de abril, así que la temporada seca es de mayo a septiembre. La temporada más fría de Huancayo se registra entre los meses junio a agosto.

La figura N° 1 muestra un mapa del área de estudio y la ubicación de la estación Climatológica principal de Huayao. Las coordenadas del área de estudio están comprendidas entre los 12° 02' 8 latitud sur y 75° 19' 22 longitud oeste. Y la figura 2 muestra el área de trabajo para la investigación.

Figura N°1: Ubicación de la estación Climatológica Principal de Huayao.



Fuente: google.es/maps

Figura N°2: Ubicación del área de investigación.



Fuente: google.es/maps

2.2.2. CONTAMINACIÓN DEL AIRE

La contaminación del aire es la presencia de material indeseable en la atmosfera, en cantidades grandes pueden producir efectos nocivos. Los materiales indeseables pueden incluso perjudicar la salud humana, la vegetación, los bienes humanos o el medio ambiente global (Nevers, N. 1998.).

El aire tiene una composición variable debido a que hay varias sustancias que tiene su origen principal en las actividades humanas que afecta la composición en la atmósfera. Sin embargo a nivel troposférico, la composición promedio del aire es como se muestra en el cuadro N°1 (NEVERS, 1998 y KIELY, 1999).

Tabla N°1: Composición química de la atmósfera

	ppm (volumen)	ug/m ³ (peso)
N ₂	780000	8.95 x 10 ⁸
O ₂	209400	2.74 x 10 ⁸
Ar	9300	1.52 x 10 ⁷
CO ₂	315	5.67 x 10 ⁵
Ne	18	1.49 x 10 ⁴
He	5.2	8.95 x 10 ⁸
CH ₄	1.0-1.2	6.56 – 7.87 x 10 ²
Kr	1.0	3.43 x 10 ³
N ₂ O	0.5	9x 10 ⁸
H ₂	0.5	4.13 x 10
Xe	0.08	4.29 x 10 ²
NO ₂	0.02	-
COV _s	0.02	-
O ₃	0.01-0.04	-

Fuente: (NEVERS, 1998 y KIELY, 1999)

2.2.3. Material Particulado

El material particulado es una mezcla de partículas sólidas y líquidas suspendidas en el aire (aerosoles) y generalmente se clasifica en dos modos distintos según su diámetro aerodinámico: el modo fino ($<2,5 \mu\text{m}$) y el modo grosero ($2,5 - 10,0 \mu\text{m}$).

Las partículas finas y gruesas difieren en el origen y las propiedades físico-químicas (Kaufman et al., 2002). Las partículas finas (PM_{2.5}), también conocida como material particulado respirable, suele estar relacionada con la contaminación antropogénica (Tandon et al., 2008). PM_{2.5} es el material particulado que se compone de iones sulfato, amonio y nitrato, carbono elemental, compuestos de carbono orgánico, agua y una pequeña cantidad de polvo del suelo, y especies de trazas (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe, etc.). Su vida varía de días a semanas.

Por otra parte, el material particulado (PM₁₀) están formadas principalmente por fuerzas mecánicas tales como trituración, molienda y abrasión de materiales de origen geológico. Generalmente, las partículas gruesas consisten en aluminosilicato y otros óxidos de elementos de cristal, y las fuentes principales incluyen el polvo de carreteras, industria, agricultura, construcción y demolición. (Roelofs et al., 2001, Tasić et al., 2006, Roelofs, 2012).

Los resultados de varios estudios han demostrado que la emisión de aerosoles de origen natural supera la emisión de fuentes antropogénicas a escala mundial en un factor de 4 a 5 (Hobbs, 2000). Sin embargo, de acuerdo con algunas estimaciones, la emisión de fuentes antropogénicas alcanzará hasta 2040 el nivel de emisión natural principalmente como consecuencia de la combustión de combustibles fósiles con una mayor tasa de incremento en China e India (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2003).

2.2.4. Aerosoles

Los aerosoles son partículas sólidas o líquidas suspendidas en la atmósfera terrestre. Ellas presentan diferentes propiedades físicas, químicas y además presenta tamaños que oscilan entre 0.001–100 μm , es decir, desde agregados moleculares hasta partículas que por su tamaño solo pueden permanecer suspendidas en la atmósfera durante unas pocas horas (Esteve, 2011).

También son conocidos como partículas en suspensión en el aire o material particulado (PM), que son componentes de la niebla de humo y la contaminación del aire (USEPA, 2003; Chen et al, 2002; Dickerson et al. 1997).

La cantidad total de masa de los aerosoles presente en una unidad de volumen de aire varía desde 1 ug/m^3 , valor que se observa sobre los casquetes polares o en la tropósfera oceánica libre, hasta 1000 ug/m^3 en las tormentas de arena o en los humos cargados de ceniza de los incendios forestales (Díaz, 2005).

Junge, (1952) clasificó y dividió el rango de tamaños en tres zonas de tal manera que la dimensión lineal más grande se denota por “r”, donde se tiene que las partículas con $r < 0,1 \mu\text{m}$ se llaman núcleos de AITKEN, las partículas grandes son aquellas que cumplen con $0,1 < r < 1,0 \mu\text{m}$ y las gigantes satisfacen con $r > 1,0 \mu\text{m}$.

En la Figura 4 se observa el rango de tamaño de partículas en la atmósfera y su importancia (Díaz, 1999). La presencia de aerosoles en la atmósfera se debe a diversas causas, tanto de origen natural como antropogénico. (Raghava et al, 2009). Estas partículas son eliminadas de la atmósfera mediante distintos procesos como la sedimentación, la coagulación, la condensación y su posterior precipitación, etc.

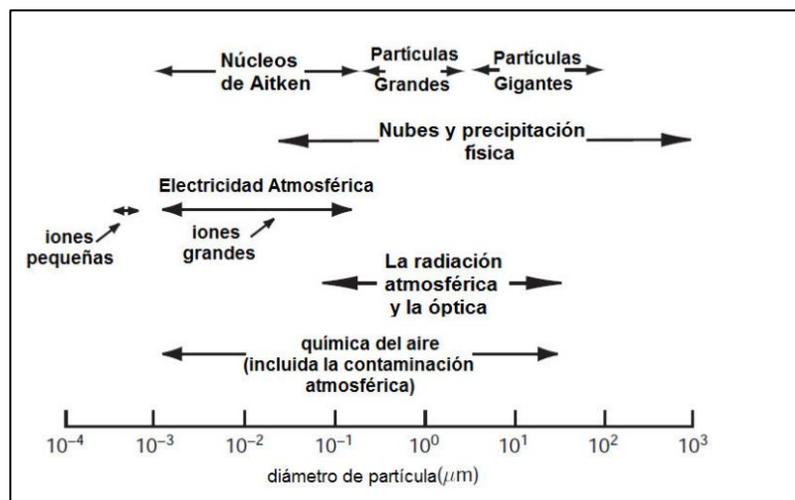


Figura N°3: Rango de tamaño de partículas en la atmósfera y su importancia

Fuente:(Díaz, 1999).

Todo ello implica un tiempo de vida en la atmósfera de estas partículas que puede oscilar entre minutos y semanas en la tropósfera, o llegar incluso a años si las partículas alcanzan la estratósfera (fenómeno común tras las erupciones volcánicas), ya que los procesos de

eliminación por condensación o precipitación no se producen en las capas altas de la atmósfera (Esteve, 2011).

Además los aerosoles son constituyente importante en la atmósfera, que interaccionan de forma directa e indirecta con la radiación del sol y terrestre, afectando al balance radiativo de la Tierra–Atmósfera. De forma directa, los aerosoles absorben y dispersan la radiación proveniente del sol en su paso al atravesar la atmósfera. Como el tamaño de estas partículas es similar al de la longitud de onda de la radiación del Sol, los aerosoles pueden interactuar eficazmente con ésta, reduciendo la irradiancia solar total que alcanza la superficie de la Tierra (Díaz, 2005).

De forma indirecta, los aerosoles actúan como núcleos de condensación (CCN) en la formación de nubes, lo que produce un aumento de la reflectividad de la nube para la radiación de onda corta, pero muy poca o ninguna variación para la radiación de onda larga. Además, los procesos de formación de lluvia disminuyen el tiempo que están presentes los aerosoles en la atmósfera, aumentando la vida media de la nube (Toon y Rosenfeld, 2000) y el albedo mundial (Twomey, 1977). Esta influencia de los aerosoles sobre el balance radiativo Tierra – Atmósfera se conoce como forzamiento radiativo de los aerosoles, y su efecto puede ser de la misma magnitud pero de sentido opuesto que el forzamiento radiativo debido a los gases de efecto invernadero (IPCC, 2007). Los aerosoles de aproximadamente 2,5 micrómetros de diámetro (conocido como PM 2.5) pueden afectar negativamente a la salud humana al ser ingerido en los pulmones (Samet et al., 2000) o acompañar a la enfermedad (Mims et al., 1997).

A diferencia de los gases de invernadero, los aerosoles no están bien mezclados en la atmósfera. Debido a que ellos son espacial y temporalmente no homogéneos, y por lo general se concentran cerca de la superficie de la Tierra. La altura de escala para la masa de aerosol es del orden de 2-3km, en comparación con 8 kilómetros de la atmósfera molecular. Dependiendo de su fuente, su tamaño, y su capacidad de reacción dentro de la atmósfera, los aerosoles pueden encontrarse cerca o lejos de sus fuentes (Kaufman y Remer, 1994).

- **Propiedades de los aerosoles**

Los aerosoles experimentan cambios físicos y químicos mientras están en la atmósfera, sobre todo dentro de las nubes, y son eliminados, en gran medida y relativamente rápido, por las precipitaciones. Debido a este breve tiempo de residencia y a la falta de homogeneidad de las fuentes, los aerosoles se distribuyen de modo heterogéneo en la tropósfera, con sus máximos cerca de las zonas de emisión (Díaz, 2005).

A partir de las medidas de radiancia del cielo así como de irradiancia directa en cielos despejados, en longitudes de onda debidamente seleccionadas fuera de las bandas de absorción fuerte, puede obtenerse información acerca de propiedades ópticas de los aerosoles tales como el espesor óptico, la función de fase de dispersión, albedo de dispersión simple y el coeficiente de angstrom (Sánchez-Oliveros, 2000).

1. Propiedades ópticas del aerosol

Los aerosoles son importantes para el clima y la radiación de la Tierra debido a su tamaño. La teoría de Mie (más apropiadamente como la teoría de Lorenz-Mie-Debye) (Mie, 1908 y Chandrasekhar, 1950), indica que las partículas afectan más fuertemente el campo de radiación cuando su tamaño es más similar a la longitud de onda de la radiación. Los aerosoles en el modo fino (0,1 a 1,0 μm) son similares en tamaño a las longitudes de onda de la radiación solar en la atmósfera, y son también los mayores contribuyentes a los aerosoles de superficie (ver Tabla N° 2). La radiación incidente sobre los aerosoles pueden ser absorbida, reflejada o transmitida, dependiendo de la composición química (índice de refracción complejo, m) y la orientación de las partículas de aerosol (si no es esférica).

1.1.Espesor óptico de los aerosoles

Una de las principales propiedades ópticas de los aerosoles que puede ser medida con precisión desde satélite es el espesor óptico de aerosoles. El espesor óptico de aerosoles (EOA), es una magnitud adimensional que indica el poder que poseen las partículas de aerosol para atenuar la radiación a una cierta longitud de onda al atravesar un medio material, en este caso la atmósfera (Toledano et al, 2004).

El espesor óptico de aerosol (EOA) es el parámetro fundamental y primario en el estudio de las propiedades de los aerosoles. No es sólo un indicador del contenido vertical de la cantidad (índice de turbiedad) de aerosoles en la atmósfera, sino que a partir de él, y a través de la teoría de scattering de Mie, se utiliza toda una metodología de algoritmos de inversión para obtener la distribución de tamaños de los aerosoles. Se puede encontrar

diversos algoritmos de inversión, como por ejemplo el de King, (1999) que solo utiliza la información del espesor óptico, o bien aquellos que utilizan conjuntamente medidas de la aureola solar y radiancia del cielo, estos últimos utilizados en la red AERONET.

2. Propiedades físicas de los aerosoles

2.1. Distribución global y vertical

De la tabla N°2 se observa que la concentración total de partículas sobre la superficie, sin distinguir los aerosoles por su composición química, varía entre 10^3 y 10^5 partículas/cm³. En las zonas de grandes ciudades las concentraciones pueden llegar a ser del orden de 10^6 partículas/cm³ mientras que en zonas rurales, tanto cerca de zonas oceánicas como de montaña, las concentraciones medidas son del orden de unas cuantas miles de partículas por cm³ (Junge, 1969; Ludwing et al., 1971).

Tabla N° 2.- Número de partículas por centímetro cúbico en diferentes tipos de localizaciones sobre la superficie terrestre

Tipo de localidad	N° de muestras	Concentraciones promedios	Máximos promedios	Mínimos promedios
Gran ciudad	2500	147.000	379.000	49.100
Pequeña ciudad	4700	34.300	114.000	5.900
Ciudad interior	3500	9500	66.500	1.050
Ciudad costera	2700	9500	33.400	1.560
Montaña				
500-1000 m	870	6000	36.000	1.390
1000-2000 m	1000	2130	9.830	450
2000 m	190	950	5.300	160
Islas	480	9200	43.600	460

Fuente: (Díaz, 1999).

La determinación del número de partículas por encima de la tropopausa presenta grandes incertidumbres. Diversos trabajos manifiestan que por encima de esta altura las partículas con radios menores de 0,1mm, decrece rápidamente hasta valores de 1 a 10 partículas/cm³ permaneciendo en torno a estos registros hasta los 28-30 km. Mientras otros proponen que en estas zonas de la atmósfera las concentraciones de este tipo de partículas pueden fluctuar en varios ordenes de magnitud (Cadle, 1976 y Podzimek et al., 1975).

En contraste con las partículas más pequeñas, las grandes son las que tienen tamaños entre 0,1 y 1 mm, y decrecen en la tropósfera hasta un valor mínimo que fluctúa entre 10 y 20 x 10⁻³ partículas/cm³. Mientras en la baja estratósfera estas partículas empiezan a crecer con la altura hasta alcanzar un máximo entre los 15 y los 25 km con valores de concentración de partículas que fluctúan entre las 50 y las 200 x 10⁻³ partículas/cm³. Esta capa de aerosoles se presenta a nivel global y recibe el nombre de capa de aerosoles de Junge (Díaz, 1999).

3. Propiedades químicas de los aerosoles

Dependiendo del tipo de aerosol, se puede identificar entre las diferentes partículas como: minerales, sulfatos, nitratos, partículas biológicas tales como bacterias y polen, partículas orgánicas, hollín, sal de mar, etc. Estas partículas son muy pequeñas con tamaños típicamente alrededor de 100nm. Por lo tanto, no son visibles a simple vista.

Sin embargo, las partículas de aerosoles reducen considerablemente la visibilidad, influyen en el clima, y pueden causar problemas de salud en los seres humanos (Kokhanovsky, 2008).

Tal y como se ha indicado en el punto anterior, las propiedades físicas y químicas de los aerosoles atmosféricos dependen de su fuente y procesos de formación. Atendiendo al origen se distinguen dos grupos de aerosoles: naturales y antropogénicas. Entre los primeros se encuentran la sal marina, el polvo y las partículas volcánicas, mientras que los antropogénicos resultan de la quema de biomasa y combustibles fósiles, entre otras.

Algunos aerosoles, como el polvo mineral del desierto, se emiten directamente hacia la atmósfera, pero la mayoría se originan a partir de la transformación físico-química de los precursores: desintegración y dispersión de material sólido, tales como la erosión del material de la corteza terrestre, la desintegración y la dispersión de biomasa o la producción y dispersión de sal marina en pequeñas gotas. En la Figura N° 5 se resume la información química para los modos fino y grueso.

- Fuente mineral: Constituidas principalmente por desiertos y zonas continentales en las que los procesos erosivos son capaces de degradar y dispersar el material que las forma. La composición química varía de una región a otra, generalmente se compone de: calcita (CaCO_3), cuarzo (SiO_2), dolomita [$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$], arcillas (sobre todo caolinita, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, e illita, $\text{K}(\text{Al,Mg})_3\text{SiAl10}(\text{OH})$), feldespatos [KAlSi_3O_8 y $(\text{Na,Ca})(\text{AlSi})_4\text{O}_8$] y cantidades inferiores de sulfato cálcico ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y óxidos de

hierro (Fe_2O_3), entre otros (Glaccum y Prospero, 1980; Schütz y Sebert, 1987; Adedokun et al., 1989; Avila et al., 1997; Caquineau et al., 1998).

- Fuente marina: Los aerosoles marinos se generan por la pulverización de las olas del mar cuando la velocidad del viento es muy alta y por la explosión de las burbujas de aire durante la formación de la espuma. Las emisiones de aerosoles por parte de los océanos a la atmósfera son de alrededor de 1.3 billones de toneladas cada año. Sus principales componentes son los iones: Cl^- , SO_4^{2-} , Br^- , HCO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , K^+ . Aunque, la fracción primaria del aerosol marino está principalmente compuesta por cloruro sódico (NaCl), existen otras formas de cloruros y sulfatos (ejemplo, MgCl , MgSO_4 o Na_2SO_4). También se tiene que el fitoplancton emite azufre en forma de DMS. Este a su vez puede reaccionar con compuestos atmosféricos formando el dióxido de azufre (SO_2).
- Fuente extraterrestre: Cierta cantidad de materia del sistema solar entra en nuestra atmósfera, quemándose la gran mayoría en la parte alta de la atmósfera, pero otras partículas llegan a la superficie terrestre. Estas últimas, de tamaño inferior a 0.5 mm, se denominan micrometeoritos y contienen fundamentalmente los siguientes elementos: Fe, Si, Mg, S, Ar, Ca, Ni, Al, Na, Cr, Mn, Cl, K, Ti y Co. Se estima que al menos varios miles de toneladas al año de esta materia cósmica alcanza el suelo.
- Fuente biológica: compuesta principalmente por hongos, las bacterias, los virus. Otro origen es el de los incendios forestales que liberan partículas en nuestra atmósfera.

- Fuente volcánica: Las erupciones volcánicas inyectan grandes cantidades de gases y aerosoles en la atmósfera. Al contrario que otras fuentes de aerosoles, las cenizas volcánicas son inyectadas capas altas de la Atmósfera, por ejemplo, las cenizas del Pinatubo llegaron a alcanzar los 40 km de altura. Estos aerosoles suelen estar formados por partículas de polvo de diferentes compuestos como: SiO_2 , Al_2O_3 , o Fe_2O_3 , además de gases reactivos como H_2S , SO_2 , HCl , etc., los cuales mediante procesos de conversión de gas a partícula generan posteriormente nuevos aerosoles.
- Fuente antrópica: Dentro de éstas se engloban las partículas emitidas en las actividades humanas. Las fuentes antropogénicas producen partículas tanto en modo fino como grueso. La composición química es muy amplia desde polvo mineral de las carreteras, carbono de la combustión de combustibles fósiles, de la fundición de metales como cinc o cobre, arcillas de la producción de cerámicas, etc. A las mencionadas anteriormente hay que sumar sulfatos, nitratos y aerosoles orgánicos secundarios procedentes principalmente de la oxidación del SO_2 .
- Conversión de gas a partícula (gtp): constituyen la segunda gran fuente de aerosoles en la atmósfera y tiene su origen en reacciones químicas entre diferentes sustancias. La mayor parte de estas sustancias provienen de fuentes naturales, tales como la flora marina, la biota terrestre y las erupciones volcánicas. Sus principales precursores son los sulfatos como el dióxido de azufre SO_2 , sulfuro de hidrógeno H_2S , disulfuro de carbono CS_2 , sulfuro de dimetilo CH_3SCH_3 o el disulfuro de dimetilo CH_3SSCH_3 ; los

derivados del nitrógeno como el óxido nitroso N_2O , el dióxido de nitrógeno NO_2 , óxido nítrico NO , trióxido de nitrógeno NO_3 , trióxido de dinitrógeno N_2O_3 o el pentóxido de nitrógeno N_2O_5 ; y los compuestos orgánicos primarios, i.e., aquellos que son emitidos directamente a la atmósfera. Uno de los ejemplos más importantes es la conversión del sulfuro de dimetilo, DMS, a núcleos de condensación mediante la oxidación de dicho compuesto y la formación de sulfatos no procedentes de la sal marina, especialmente útiles como indicadores del nivel de contaminación industrial.

Tabla N° 3.- Comparación entre partículas finas y gruesas

	Partículas finas	Partículas gruesas
Proceso de formación	Reacciones químicas	Interrupción mecánica
	Nucleación	Polvo mineral en suspensión
	Condensación	
	Coagulación	
	Proceso de formación de nubes.	
Composición	Sulfato	Polvo mineral en suspensión.
	Nitrato	Cenizas
	Ion hidrogeno	Elementos crustales: óxidos de Si, Al, Ti y Fe.
	Carbono elemental	CaCO ₃ , NaCl, polen esporas
	Compuesto orgánicos	Desecho de animales y plantas.
	Agua	
	Metales (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe, etc.)	
Solubilidad	Altamente soluble, higroscópico	Altamente insolubles, hidrófobas.
Fuentes	Combustión (carbón, petróleo, gasolina, madera)	Resuspension de polvo y áridos industriales
	Conversión de gas (NO _x , SO ₃ y COV _s) a partículas.	Suspensión de áridos procedentes de granjas, carreteras.
	Productos de fundición y cerrajerías.	Fuentes biológicas, construcción y demolición
Tiempo de vida	Días- semanas	Minutos-días
Distancia transportada.	Cientos a miles de kilómetros.	Menos de 10 kilómetros.

Fuente: (Wilson y Shun, 1997; EE.UU. EPA, 1996)

2.2.5. Detección Remota De Material Particulado

Uno de los instrumentos actualmente utilizados en la detección remota de material en partículas es el espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS). MODIS es un sensor a bordo de los satélites Terra y Aqua de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA). Ambos satélites están en órbita polar, con Terra sobre una órbita descendente (hacia el sur) sobre el ecuador alrededor de las 10:30 hora local del sol, y Aqua sobre una órbita ascendente (hacia el norte) sobre el ecuador alrededor de las 13:30 hora local del sol. MODIS observa el globo terráqueo casi diariamente y repite las órbitas cada 16 días (Salomonson y otros, 1989, Barnes et al., 1998).

MODIS escanea continuamente la tierra desde 705 km sobre la superficie con un campo de visión de 110° a través de la vía. Cada exploración MODIS, aproximadamente perpendicular a la dirección de movimiento de la pista terrestre por satélite, es de 2330 km (a través de la vía) por 10 km (a lo largo de la vía). Cada exploración está cubierta por 1354 píxeles con una resolución de 1 km al nadir. La órbita MODIS se divide en secciones de 5 minutos llamadas "gránulos". Cada gránulo es aproximadamente 2030 km (203 exploraciones de 10 km) a lo largo de la trayectoria orbital. Cada gránulo es 1354 (a través de la trayectoria) para 2030 (a lo largo del camino) píxeles en la resolución de 1 km (Remer et al., 2005).

MODIS mide continuamente el resplandor reflejado y emitido desde la atmósfera en 36 canales desde el ultravioleta cercano a la parte infrarroja térmica del espectro electromagnético (0,405 μ m - 14,385 μ m) a tres resoluciones espaciales diferentes: 250 m, 500 m y 1 km. Estas mediciones de radiancia calibradas se procesan para generar un

producto de profundidad óptica de aerosol (EOA). Profundidad óptica de aerosol es una medida de la columna (superficie a parte superior de la atmósfera) la extinción de luz integrada (absorción más dispersión). Existe una correlación directa entre la carga de aerosol en la atmósfera y la EOA: cuanto mayor sea la concentración de aerosol en la atmósfera, mayor será la profundidad óptica del aerosol.

Las mediciones de radiancia se generan sólo durante las condiciones diurnas, por lo que el tiempo máximo entre observaciones que cubren la misma ubicación, para un solo sensor de satélite, es aproximadamente 24 horas sobre la mayor parte de los EE.UU., Pero aumenta hasta aproximadamente 48 horas para los puntos al sur de $\sim 30^\circ$ N (Hutchison et al..., 2008). Por lo tanto, hay al menos una medición diaria por satélite (Terra y Aqua) para ubicaciones en latitudes mayores de 30° N, aunque a veces se pueden registrar dos mediciones en diferentes momentos en un período de 24 horas. MODIS proporciona así un método conveniente para la detección remota de aerosoles ya que tiene una cobertura global casi diaria.

De los 36 canales disponibles, el algoritmo MODIS-EOA utiliza siete canales (ver FiguraN° 6) sobre el océano (466nm - 2119nm) y dos canales sobre tierra (466nm y 646nm) junto con tablas de consulta pre-calculadas para generar el AOD (Kaufman et al., 1997). Los canales 8 - 36 tienen otros usos como la determinación del vapor de agua atmosférico, el ozono, la biogeoquímica oceánica y la temperatura superficial, entre otros. (Gao and Kaufman, 1995)

MODIS-EOA es generada por dos algoritmos independientes, uno para derivar los aerosoles sobre la tierra (Kaufman et al., 1997) y el segundo para los aerosoles sobre el océano (Tanré et al., 1997). Ambos algoritmos fueron concebidos y desarrollados antes del lanzamiento de Terra en 1999 (Kaufman et al., 2002).

Figura N° 4: Canales MODIS y usos primarios para determinación de aerosoles

Table 1.1 MODIS channels and primary uses for aerosol determinations (Guenther 1996; Levy et al., 2009).

Primary Use	Channel	Bandwidth (nm)	Weighted Central Wavelength (nm)	Resolution (m)
Land/Cloud/Aerosol Boundaries	1	620 - 670	646	250
	2	841 - 876	855	250
Land/Cloud/Aerosol Properties	3	459 - 479	466	500
	4	545 - 565	553	500
	5	1230 - 1250	1243	500
	6	1628 - 1652	1632	500
	7	2105 - 2155	2119	500

Fuente: (Guenther 1996).

Los algoritmos MODIS-EOA usan la "reflectancia" espectral, una función de la radiación espectral medida, el ángulo del cenit solar y la irradiación solar (flujo radiativo) en una banda o canal de longitud de onda dada (ver Figura N° 6).

Los algoritmos de recuperación aplican la detección a un área de análisis de 10x10km. El proceso de selección elimina ciertos píxeles que no tienen características de reflectancia adecuadas para evitar la contaminación por las nubes, el agua del interior, la nieve, el hielo y el deslumbramiento solar sobre el océano (Hutchison et al., 2005). Una vez que estos píxeles de reflectancia han sido seleccionados, los valores se promedian y la recuperación

de EOA se realiza usando relaciones empíricas y valores de búsqueda. Estas correlaciones empíricas y valores de búsqueda tienen en cuenta el brillo de los píxeles, el recuento de píxeles no seleccionados (buenos) utilizados en el cálculo, el canal utilizado, la geografía, la vegetación, el ángulo de observación del instrumento y el modo (partículas gruesas o finas) . El producto MODIS-EOA resultante es adimensional y tiene una resolución espacial horizontal de 10 km, lo que produce un gránulo de 135×203 píxeles.

MODIS-EOA ha sido ampliamente validado (Chu et al., 2002, 2003; Remer et al., 2005; Levy et al., 2005, 2009) mediante observaciones a través de la Red Aerosol Robótica (AERONET), una red de fotómetros solares que miden las propiedades de los aerosoles atmosféricos (Holben et al., 1998). Casi un récord de diez años de datos de aerosoles ya está disponible casi globalmente. Estos datos se están utilizando en varias aplicaciones, incluyendo el clima y la calidad del aire (Christopher et al., 2010).

Desde su creación en 1997 (Kaufman et al., 1997), el algoritmo de recuperación MODIS ha experimentado varias mejoras. Remer (2005) y Liang et al. (2006) han mejorado los algoritmos de recuperación de EOA de MODIS mediante la inclusión de diferentes filtros que corrigen las reflectancias según el tipo de superficie y la vegetación. El algoritmo original de recuperación de aerosoles MODIS se basa en el enfoque de "Objetivo Oscuro" y, como resultado, proporciona datos menos confiables o de recuperación sobre el desierto y otras superficies terrestres altamente reflectantes.

Wang et al. (2007) evaluaron el algoritmo de recuperación de MODIS-EOA sobre diferentes ecosistemas. Los resultados de la evaluación mostraron diferentes resultados en la recuperación de MODIS-EOA entre diferentes ecosistemas y localizaciones geográficas (áreas rurales o urbanas) cuando se validaron usando lidar. Encontraron que el algoritmo de la recuperación de MODIS-EOA funciona bien sobre superficies "oscuras", pero mal sobre superficies "brillantes". Para mejorar la calidad de las recuperaciones de superficies brillantes, el equipo de aerosol ha implementado el algoritmo de recuperación "Deep Blue" que complementa el método Dark Target existente. En 2008 todos los productos preexistentes fueron reprocesados con este algoritmo actualizado.

Los productos de aerosol MODIS se han utilizado para analizar la variabilidad temporal y espacial de los aerosoles en una amplia área de interés que van desde el presupuesto de radiación, la microfísica en nubes (Castleman, 1974), el análisis de la calidad del aire (Lyapustin et al., 2004, Gupta et al., 2006), y el forzamiento climático de aerosoles antropogénicos (Charlson et al., 1992).

2.2.6. Técnicas de la medición de Aerosoles

Existen muchas técnicas que son usadas para observar y cuantificar las propiedades físicas y químicas de los aerosoles, ya sea in-situ o por teledetección (Seinfeld y Pandis, 1998).

Cada una de las técnicas que se mencionaron puede ser activa (en condiciones perturbadas) o ser pasivas (funciona bajo condiciones ambientales). Mezclando las mediciones desde el

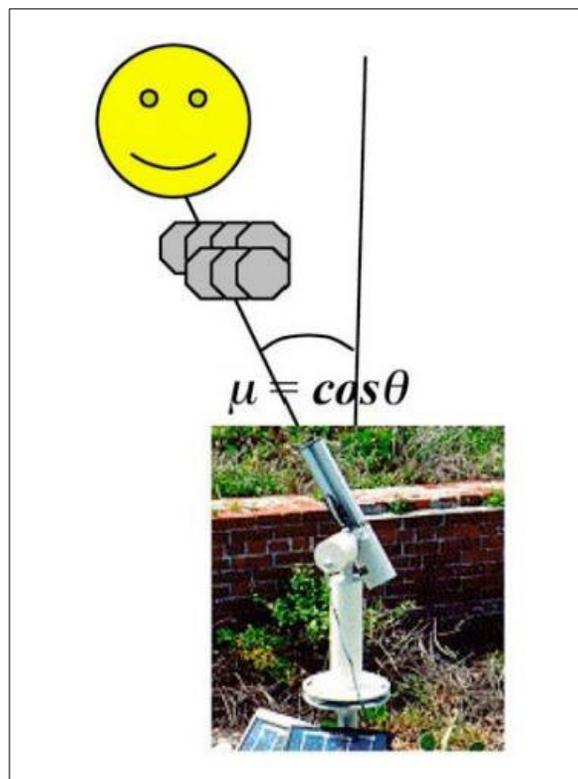
aire o espacio y las de la superficie del suelo, proporcionan perfiles de las propiedades de los aerosoles tal como: la distribución de tamaño, composición química y carga. Por ejemplos en los Estados unidos se realizan monitoreo de las concentraciones de la masa de aerosoles en la superficie al ponderar la masa de aerosoles (perturbado) colectado en filtros que proporcionan PM, donde $n=1,2,5, 10\mu\text{m}$ dependiendo de las partículas más grandes medidas. Las distribuciones del tamaño de los aerosoles puede ser determinado al establecer los tamaños de los filtros para coleccionar selectivamente los aerosoles de ciertos diámetros (menor $2.5 \mu\text{m}$).

Otras técnicas in-situ se basan en mediciones ópticas, y miden la dispersión de aerosol dentro de una cavidad para determinar los coeficientes de extinción y retro dispersión (Nefelómetros). La absorción por aerosoles es comúnmente monitoreado utilizando fotómetros de absorción. Sin embargo debido a que casi todos los instrumentos in-situ recolectan los aerosoles sobre un filtro o dentro de una cavidad, ellos perturban a los propios aerosoles (Kokhanovsky, 2009).

En cambio en la teledetección, los sensores observan un campo de radiación a medida que interactúa con la atmosfera y la superficie. La teledetección activa, utiliza su propia luz, mientras que la teledetección pasiva utiliza como fuente la radiación electromagnética del sol. Al igual que las técnicas in-situ, la teledetección también incluye las mediciones en el suelo y en aviones. Los radiómetros también pueden estar a bordo de los satélites en órbita, ejemplo MODIS-TERRA, para recuperar la información continua sobre las escalas regionales y mundial (Kaufman et al., 1997a; King et al., 1999; Kaufman et al., 2002).

Figura N° 5: Esquemática de una medición directa del fotómetro solar de la extinción de la radiación solar a través de la atmósfera. El instrumento ilustrado es el instrumento

CIMEL utilizado por AERONET.



Fuente: (Levy, 2007).

2.2.7. RED AERONET

La red AERONET (Aerosol Robotic Network, Fuente <http://aeronet.gsfc.nasa.gov> (Holben ,1998)) fue establecida por el GSFC-NASA(Centro de vuelo Espacial de la NASA) y

el Laboratoire d'Optique Atmosphérique (LOA) de la Universidad de Lille (Francia) como una federación de redes de ámbito regional o nacional basada en instrumentos localizados en Tierra (estaciones) para monitorear los aerosoles atmosféricos.

Actualmente existe unos 450 instrumentos de medición de espesor óptico de aerosol, gestionados por 4 subredes principalmente: AERONET, PHOTONS, AEROCAN de Canadá y RIMA (Fuente <http://www.rima.uva.es>). Según los enunciados propios de AERONET, el programa debe proveer series continuas en el tiempo de medidas de aerosoles y sus propiedades microfísicas y radiativas dedicadas a la caracterización de los aerosoles y a la validación de datos obtenidos mediante satélite (Fuertes, 2012).

Los datos de la red AERONET proporcionan observaciones globales y prácticamente en tiempo real de los parámetros que definen las características de los aerosoles (más de 40 parámetros) a nivel de columna, siendo el espesor óptico de aerosoles (EOA) el índice básico de estos datos. La importancia de la red está en la variedad de estaciones con condiciones y tipos de aerosoles muy diversos: marítimos, desérticos, árticos, contaminación urbana e industrial, etc (Fuertes, 2012).

El fotómetro solar CE-318 es el aparato standard de la red (existen varios modelos con ciertas diferencias) desarrollado por la empresa francesa Cimel Electronique. Se trata de un instrumento totalmente autónomo que mediante el uso de un panel solar y una antena satelital no necesita de una infraestructura previa. El propósito principal de este instrumento es medir la radiación directa del sol y la difusa del cielo para derivar de éstas las

propiedades de los aerosoles y el vapor de agua en columna usando una combinación de filtros espectrales y un robot acimutal/cenital controlado por un microprocesador (Fuentes, 2012).

El fotómetro realiza dos medidas básicas, la de radiación directa (irradiancia solar) y la difusa (radiancia del cielo), ambas dentro de una serie de medidas programadas según los estándares de AERONET. Esta secuencia de medidas es calculada por el instrumento a partir de la hora solar verdadera (TST: "true solar time") y realiza medidas desde la salida hasta la puesta del Sol cada 15 minutos en el caso de medidas directas y unas 10 secuencias de medidas de todo el cielo (Figura N° 8)

Uno de los principales objetivos de la red de radiómetros de AERONET es la caracterización de las propiedades ópticas de los aerosoles para que se pueda estimar el papel de estos en los cambios climáticos globales (Holben et al., 2002).

La red de radiómetros de AERONET es también utilizada para la validación de las propiedades ópticas obtenidas por satélite, especialmente del espesor óptico de aerosoles ($0,55 \mu m$) estimados con el sensor MODIS (Remer et al., 2002).

Figura N° 6.- El fotómetro solar CE-318 es el aparato standard de la red (existen varios modelos con ciertas diferencias) desarrollado por la empresa francesa CimelElectronique.



Fuente: (Fuentes, 2012)

2.3.- MARCO CONCEPTUAL.

2.3.1. APLICACIÓN GIOVANNI – MODIS

GIOVANNI es una aplicación web desarrollada por GES DIS (Centro de Servicios de Datos e Información de GoddardEarthSciences) de la Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio (NASA), que proporciona una forma sencilla e intuitiva para

visualizar, analizar y acceder a grandes cantidades de datos científicos de teledetección de la Tierra sin tener que descargar los datos.

Desde el punto de vista del investigador, GIOVANNI se compone de una serie de interfaces, cada una diseñada para satisfacer las necesidades de los campos específicos de la investigación de la Tierra. Cada interfaz, proporciona las funciones y parámetros aplicables a esa área específica de la ciencia de la Tierra (GIOVANNI, 2017).

2.3.2. MODIS

Es un instrumento clave a bordo de los satélites Terra y Aqua. La órbita de Terra alrededor de la Tierra se cronometra que pasa por el norte hacia el sur a través del Ecuador en la mañana, en cambio el satélite Aqua pasa del sur hacia el norte sobre Ecuador en la tarde.

Terra MODIS y Aqua MODIS están recorriendo la superficie de la tierra cada 1 a 2 días, adquiriendo datos en 36 bandas espectrales o grupos de longitudes de onda. Estos datos mejoraran muestras de comprensión de las dinámicas y procesos globales que ocurren en la Tierra, en los océanos y la atmósfera inferior.

MODIS está desempeñando un papel vital en el desarrollo de modelos de sistemas terrestres globales e interactivos, capaces de predecir el cambio global con la suficiente precisión como para ayudar a los responsables de la formulación de políticas y toma de

decisiones acertadas en relación con la protección del ambiente (<https://modis.gsfc.nasa.gov/about>).

2.3.3. TERRA Y AQUA

Los satélites Aqua y Terra, pertenecen al sistema de observación de la Tierra (EOS). Terra fue lanzado el 18 de diciembre de 1999, y Aqua fue lanzado el 4 de mayo del 2002. Ambos satélites se encuentran sincronizados con el sol, realizando una órbita polar, casi circular a 705 km sobre la superficie Terrestre, con una velocidad de exploración de 20,3 rpm. Repite esta orbita cada 16 días. TERRA desciende sobre el Ecuador (se dirige hacia el sur), alrededor de las 10.30 hora local, y Aqua asciende sobre el Ecuador (se dirige hacia el norte) , alrededor de las 13:00 hora local (Levy, 2007).

2.3.4. LAMAR

El Laboratorio de Microfísica Atmosférica y Radiación (LAMAR) del IGP del Perú tiene como objetivo mejorar la comprensión de los procesos físicos que afecta el clima de los andes y mejorar la capacidad de modelado necesario para la evaluación de los impactos futuros del cambio climático, así como apoyar en la validación de técnicas de sensoramiento remoto.

Se basa en la serie climática larga de la estación meteorológica de Huayao como en sofisticado instrumentos especializados, como un radar perfilador de vientos,

radiómetros de onda corta y larga, un anemómetro sónico, entre otros (<http://www.met.igp.gob.pe/huayao/>).

2.3.5. AERONET

Las mediciones del fotómetro solar de la radiación solar directa, proporciona información para calcular la profundidad óptica de aerosol (EOA). EOA se puede utilizar para calcular el vapor de agua columnar (PrecipitableWater) y estimar el tamaño del aerosol usando la relación de parámetro de Angstrom. Existen dos versiones de datos (versiones 1 y 2) y tres niveles de calidad (niveles 1.0, 1.5, 2.0) para cada producto.

2.3.6. BALANCE RADIATIVO

La composición de la atmósfera terrestre y los flujos de energías entrantes, salientes, son los principales factores que controlan el clima terrestre. Con una aproximación de primer orden, el clima terrestre se halla en un estado estacionario, de modo que todos los flujos energéticos del sistema están en equilibrio. Los forzamientos internos y externos del sistema pueden perturbar este balance energético y conducir a los cambios climáticos. (Trenberth et al., 2009).

2.3.7. NUCLEOS DE CONDENSACION

Partículas sobre las que se producen la condensación del vapor de agua existente en la atmósfera. Los núcleos se pueden presentar en estados sólidos o líquidos (<https://www.estruplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2118>).

2.3.8. ACCESO A LAS PANTALLAS DE DATOS

- Nivel 1.0- Datos sin cribado pero no se pueden aplicar la calibración final.
- Nivel 1.5- Datos de la proyección de la nube, pero no se pueden tener la calibración final aplicada.
- Nivel 2.0- Calibración antes y después, datos de calidad garantizada.

CAPITULO III

DISEÑO METODOLÓGICO

III. ANÁLISIS DEL MODELO

Para el cumplimiento de los objetivos planteados se llevó a cabo una metodología de tipo deductivo bajo un énfasis descriptivo.

2.4. Recolección de datos del espesor óptico de los aerosoles.

Existen muchas técnicas que son usadas para observar y cuantificas las propiedades físicas y químicas de los aerosoles, ya sea in-situ o por teledetección (Seinfeld y Pandis, 1998).

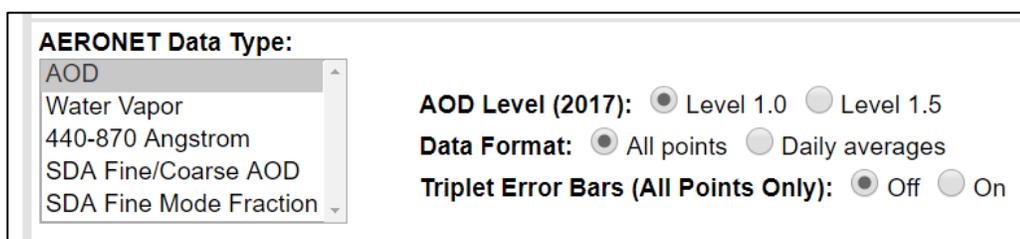
Cada una de las técnicas que se mencionaron puede ser activa (en condiciones perturbadas) o ser pasivas (funciona bajo condiciones ambientales). Mezclando las mediciones desde el aire o espacio y las de la superficie del suelo, proporcionan perfiles de las propiedades de los aerosoles tal como la distribución de tamaño, composición química y carga.

2.4.1. Datos de superficie a partir de AERONET

Por muchos años se han utilizado, los instrumentos proporcionados por AERONET (Holben et al., 1998) que son considerados, como el estado del arte para los datos de espesor óptico de los aerosoles espectrales consistentes, calibrados y útiles. Operando en cientos de sitios a nivel mundial, los fotómetros de AERONET (producidos por CimelElectronique en Francia).

Nuestra región de estudio incluye las ciudades de Huayao y Huancayo ubicados en el centro de la sierra del Perú. Para la obtención de los datos del espesor óptico de aerosoles tomados en superficie se descargaron de la página oficial de AERONET (Aerosol Robotic Network)-Huancayo. El parámetro que se eligió es espesor óptico de aerosoles (EOA), con características como las siguientes en la figura N° 9.

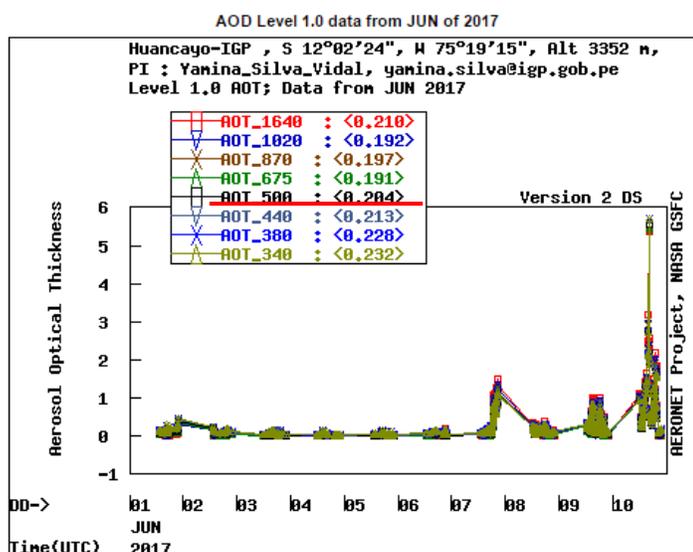
Figura N° 7: Características de los datos obtenidos a partir del AERONET- Huancayo.



Fuente: (<https://aeronet.gsfc.nasa.gov/>)

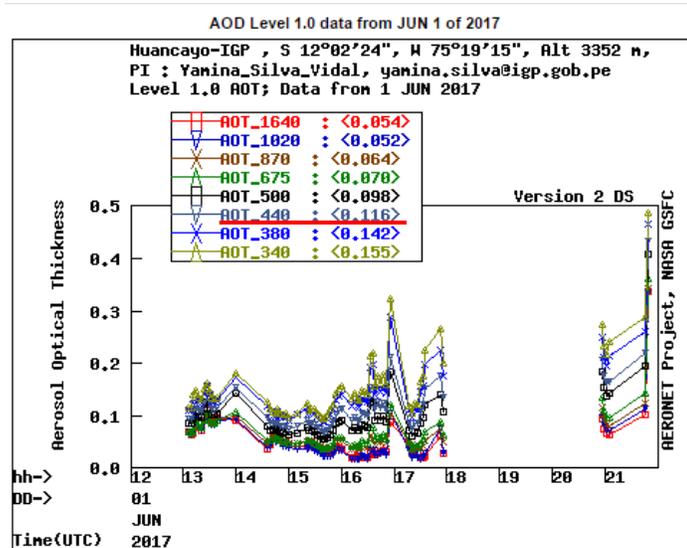
Se descargaron los datos mensuales de espesor óptico de aerosoles desde el mes de noviembre del 2016 hasta el mes de abril de 2017, además se descargó datos diarios en el mismo periodo. El periodo se estableció debido la continuidad de los datos, que por lo cual se consideró muy objetivo para la investigación. Dado que los datos descargados de AERONET del espesor óptico de aerosoles se medían a diferentes longitudes de onda se estableció que la longitud de onda para este estudio es de 500 nm.

Figura N°8: Gráfica del espesor óptico de aerosoles a 500 nm del mes de junio del 2017.



Fuente: GIOVANNI (2017)

Figura N°9: Grafica del espesor óptico de aerosoles a 500 nm del 10 de junio del 2017.



Fuente: GIOVANNI (2017)

Los datos requeridos para la investigación se descargaron para luego ordenarlos los datos en programa de Excel office. Para su luego análisis.

2.4.2. Datos del espacio a partir de la APLICACIÓN GIOVANNI

Existen muchos métodos para la recuperación de los aerosoles obtenidos por las imágenes MODIS, por ejemplo: Recuperación de las propiedades de los aerosoles sobre el suelo a partir de la inversión de la reflectancia espectral observada por el sensor MODIS – Algoritmo operacional de Segunda Generación y el algoritmo simplificado para la recuperación de los aerosoles de imágenes MODIS.

Además existe otros métodos más sencillos obtener los datos de espesor óptico de los aerosoles a partir de la aplicación de GIOVANNI. GIOVANNI es una herramienta que explora fácilmente los datos multisensor de la Ciencia de la Tierra usando solo el navegador web (Berrick et al, 2008, Berrick et al. 2009).

Desde el punto de vista de la mayoría investigadores, GIOVANNI está compuesto de un número de interfaces, cada uno vigilante de encontrar las necesidades de los campos específicos de las investigaciones en Ciencia de la Tierra. Cada interface diseñando para la investigación, específicamente para esta investigación es los aerosoles.

Para la descarga de datos en primer lugar se selecciona “Area-Averaged Time Series”, en segundo lugar se ubica el área de investigación colocando las coordenadas según el orden (Oeste, Sur, Este, Norte) y por último se coloca la variación temporal (tiempo). Luego se dirige a la selección de variables, que para el caso de nuestra investigación es “Aerosoles”. En cuanto a los parámetros se selecciona la “Aerosol OpticalDepth” (profundidad óptica del aerosol), Total AOD Climatology Anomaly (Anomalía Climatológica Total AOD) y Total Aerosol OpticalDepth (Profundidad Óptica de Aerosol Total).

Para la investigación los datos necesarios son: el espesor óptico de aerosoles promedio, mensuales y diarios procedentes de los sensores MODIS, se recuperaron de las páginas web, Nasa-Ocean 2017.

Tabla N° 4 Características de los datos del Espesor Óptico del aerosol.

Satélite	Sensor		Periodo	Región (oceánica)
Aqua	Modis	550	2004-2017	12°14`-12°S, 75°42`-75°10` W (Perú)
Terra	Modis	550	2004-2017	12°14`-12°S, 75°42`-75°10` W (Perú)

Fuente: Elaboración propia

Los satélites están operando a una altitud de aproximadamente 700 km, proporcionando datos sobre características de la atmosfera cada día o dos días. Sin embargo, los datos de los aerosoles a menudo faltan debido a las nubes, a la alta reflectancia superficial (por ejemplo, cubierta de nieve y hielo). Los satélites Terra y Aqua atraviesan el ecuador alrededor de las 10:30 am (órbita descendente) y 1:30 p.m. (Órbita ascendente), respectivamente, con una franja de barrido de 2330 km (cross-track) por 10 km (a lo largo de la pista en el nadir).

Figura N°10: (a) y (b) son parte de la APLICACIÓN GIOVANNI.

(a)

GIOVANNI The Bridge Between Data and Science
v 4.23 [Release Notes](#) [Browser Compatibility](#) [Known Issues](#)
MODIS OPeNDAP server continuing problem ... [1 of 2 messages] [Read More](#)

Select Plot

Maps: Time Averaged Map Comparisons: Select... Vertical: Select... Time Series: Select...
 Miscellaneous: Select...

Select Date Range (UTC)
YYYY-MM-DD. HH:mm to - - 23:59

Select Region (Bounding Box or Shape)
Format: West, South, East, North

Variación temporal

Ubicación de la investigación

(b)

Selección de variables

Select Variables

- Disciplines**
 - Aerosols (36)
 - Atmospheric Chemistry (5)
- Measurements**
 - Aerosol Index (1)
 - Aerosol Optical Depth (33)
 - Angstrom Exponent (10)
 - Scattering Angle (4)
 - Statistics (12)
 - Total AOD Climatology Anomaly (3)
 - Total Aerosol Optical Depth (21)
- Platform / Instrument**
- Spatial Resolutions**
 - 0.25 ° (5)
 - 0.5 ° (26)
 - 0.5 x 0.625 ° (18)
 - 1 ° (36)
 - 25 km (4)

Fuente: (GIOVANNI 2017)

2.5. Comparación de la variabilidad temporal de los datos del espesor óptico obtenidos de la APLICACIÓN GIOVANNI (MODIS Aqua y Terra).

A bordo de los satélites del Sistema de Observación de la Tierra (EOS) de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) que son Terra y Aqua, se utilizó para recuperar datos de espesor óptico de aerosol (EOA) entre el año 2004 - 2017. Los satélites Terra y Aqua Lanzado en diciembre de 1999 y en mayo de 2002, respectivamente. Se realizaron los análisis estadísticos de los datos obtenidos de la APLICACIÓN GIOVANNI y AERONET.

Para el cumplir con los objetivos se planteó una metodología. En primer lugar, utilizamos programas estadísticos usados en las ciencias exactas, sociales y aplicadas, como el Excel 2016. Este programa son estadístico que presenta las funciones principales necesarias para realizar el proceso analítico de principio a fin.

Para ello se utilizó la APLICACIÓN GIOVANNI proporcionada por la NASA(<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). Y se realizó el análisis estadístico que contemplo gráficos sobre correlación entre los datos de MODIS-AQUA y MODIS-TERRA obtenidos de la aplicación GIOVANNI.

Además se determinó promedio, máximos y mínimos del espesor óptico de aerosol a partir de la APLICACIÓN de GIOVANNI y AERONET con el objetivo de observar el comportamiento de los datos.

2.6. Análisis de la correlación de los datos del espesor óptico de aerosoles obtenidos de la APLICACIÓN Giovanni y medidos en superficie por AERONET.

Para la ejecución de los objetivos, no vamos a usar el programa Excel-2016. En primer lugar, se graficaron las series temporales de MODIS AQUA-AERONET y MODIS TERRA-AERONET para analizar la viabilidad temporal del espesor óptico de aerosol.

2.7. REVISIÓN DE RESULTADOS.

Durante el periodo de la investigación se analizó la variabilidad interanual, la variabilidad mensual y el análisis de correlación entre MODIS Aqua y Terra. Los análisis que se realizaron a los datos obtenidos de la APLICACIÓN GIOVANNI y AERONET, obteniendo los siguientes resultados.

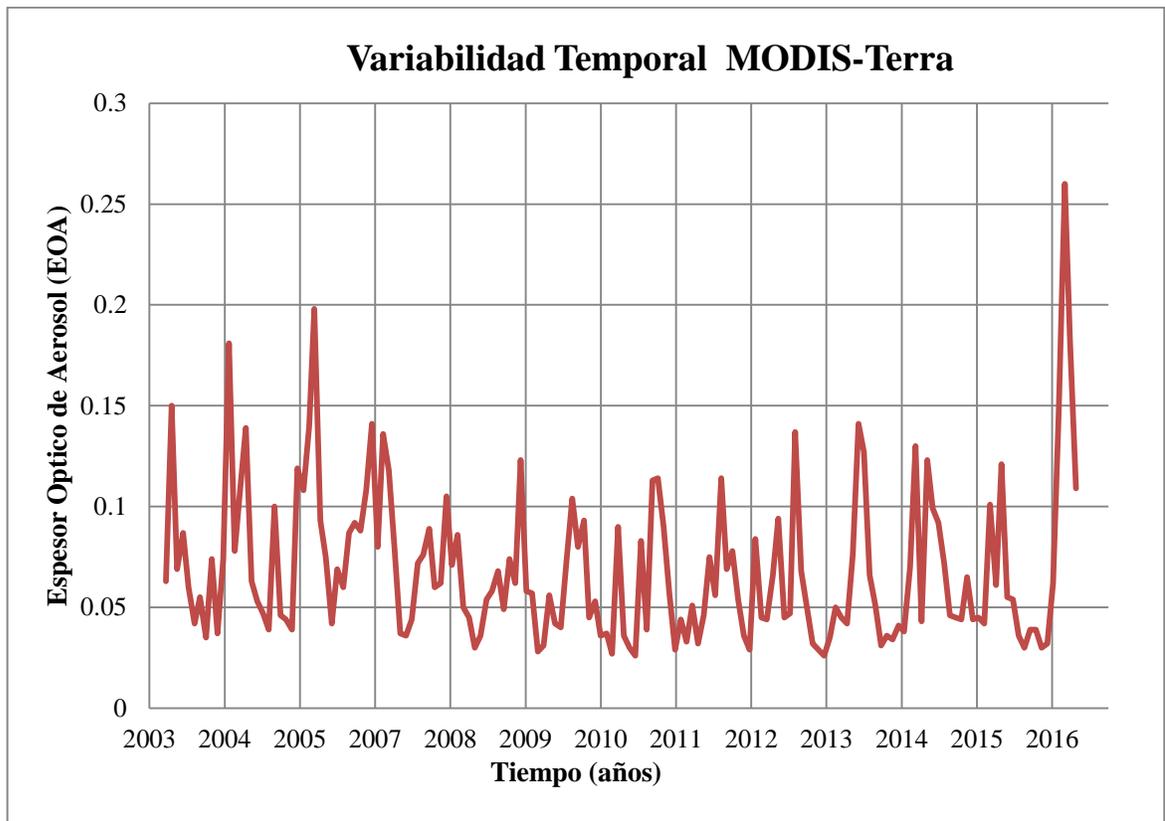


Figura N° 11: Variabilidad Interanual del EOA-550 con el sensor MODIS de la plataforma Terra, a lo largo de 13 años.

En la figura N° 13 muestra los datos mensuales del espesor óptico de aerosol (EOA), medido por el sensor MODIS de la plataforma Terra durante 13 años (desde el 1 de enero del 2004 hasta el 1 de abril del 2017). La serie de tiempo están definidas con por ascensos y descensos, de manera repetida durante todos los años. Con un promedio de 0.065 ± 0.12 . Los valores de espesor óptico de aerosoles presentan un máximos de 0.26 y 0.196 en los meses de abril 2017 y marzo 2005 respectivamente, y mínimos de 0.029 en junio y julio 2013 respectivamente.

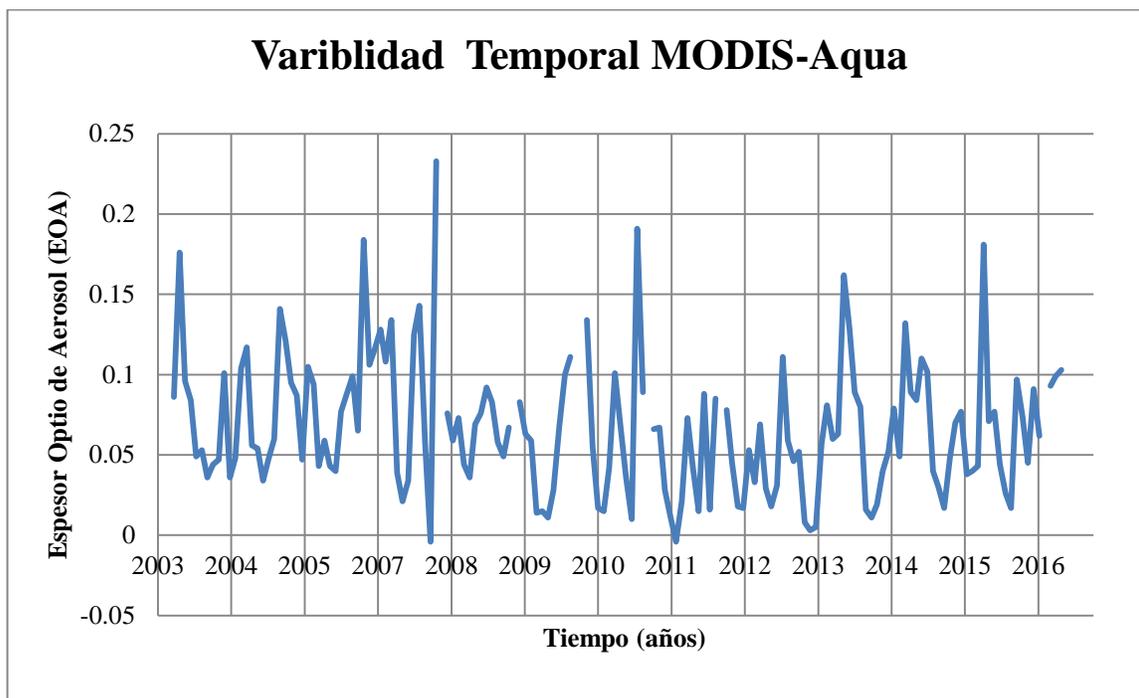


Figura N° 12: Variabilidad Interanual del EOA-550 con el sensor MODIS de la plataforma Aqua, a lo largo de 13 años.

En la figura N° 14 muestra los datos mensuales del espesor óptico de aerosol (EOA), medido por el sensor MODIS de la plataforma Aqua durante 13 años (desde el 1 de enero del 2004 hasta el 1 de abril del 2017). La serie de tiempo están definidas con por ascensos y descensos, de manera repetida durante todos los años. Con un promedio de 0.071 ± 0.12 . Los valores de espesor óptico de aerosoles presentan un máximos de 0.23 y 0.19 en los meses de agosto 2008 y mayo del 2011 respectivamente, y mínimos de 0.004 en junio y abril del 2008 y 2012 respectivamente.

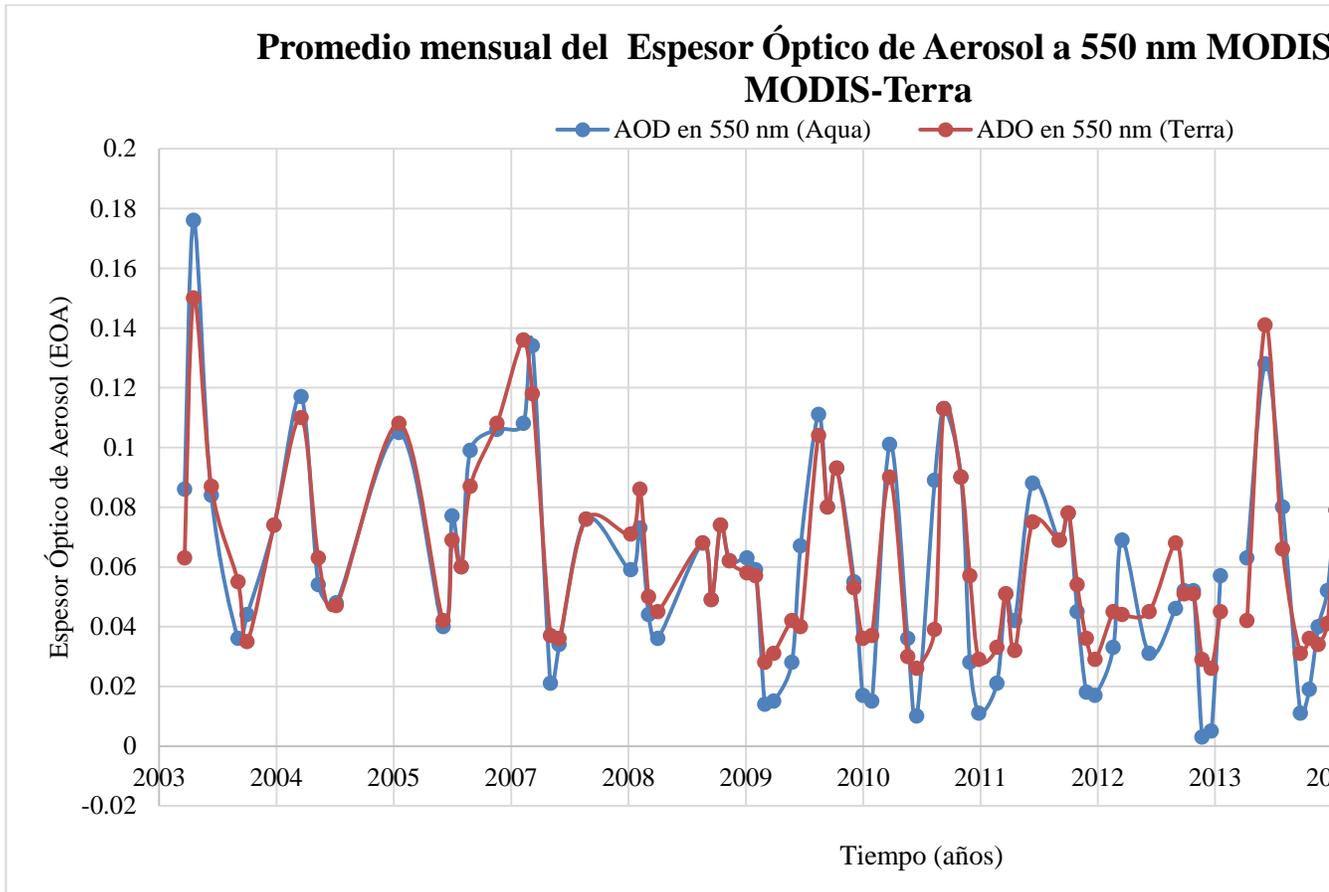


Figura N°13: Variabilidad Interanual del EOA-550 con el sensor MODIS de la plataforma Aqua y Terra, a lo largo de 13 años respectivamente.

En la Figura N° 15, se muestra la evolución interanual del EOA-550 (adimensional) medida por el sensor de plataforma Aqua (línea azul) y Terra (línea rojo) durante 13 años, observando una oscilación que varía entre 0.18- 0.004 y 0.15-0.026, entre los meses de agosto a diciembre respectivamente.

Los valores máximos observados en la oscilación fueron entre agosto a diciembre, que tiene mucha relación con los incendios forestales generados por los agricultores en la región amazónica. Es muy común en cada año debido a que la temporada seca que abarca desde agosto hasta noviembre. El cambio de uso de suelo, se realiza quemando grandes extensiones para la explotación agrícola, ello genera concentración de aerosoles sobre la región amazónica de Brasil se desplaza hacia Perú por los vientos alisios (L. Suarez, L. Castillo, M. Marín, G. Carrillo, Instituto de Investigación para el desarrollo Tecnológico, ININTEC, Huancayo, Perú 2006). La diferencia entre los satélites TERRA Y AQUA se basa en la diferencia de tiempo en que pasa estos satélites sobre el mismo lugar.

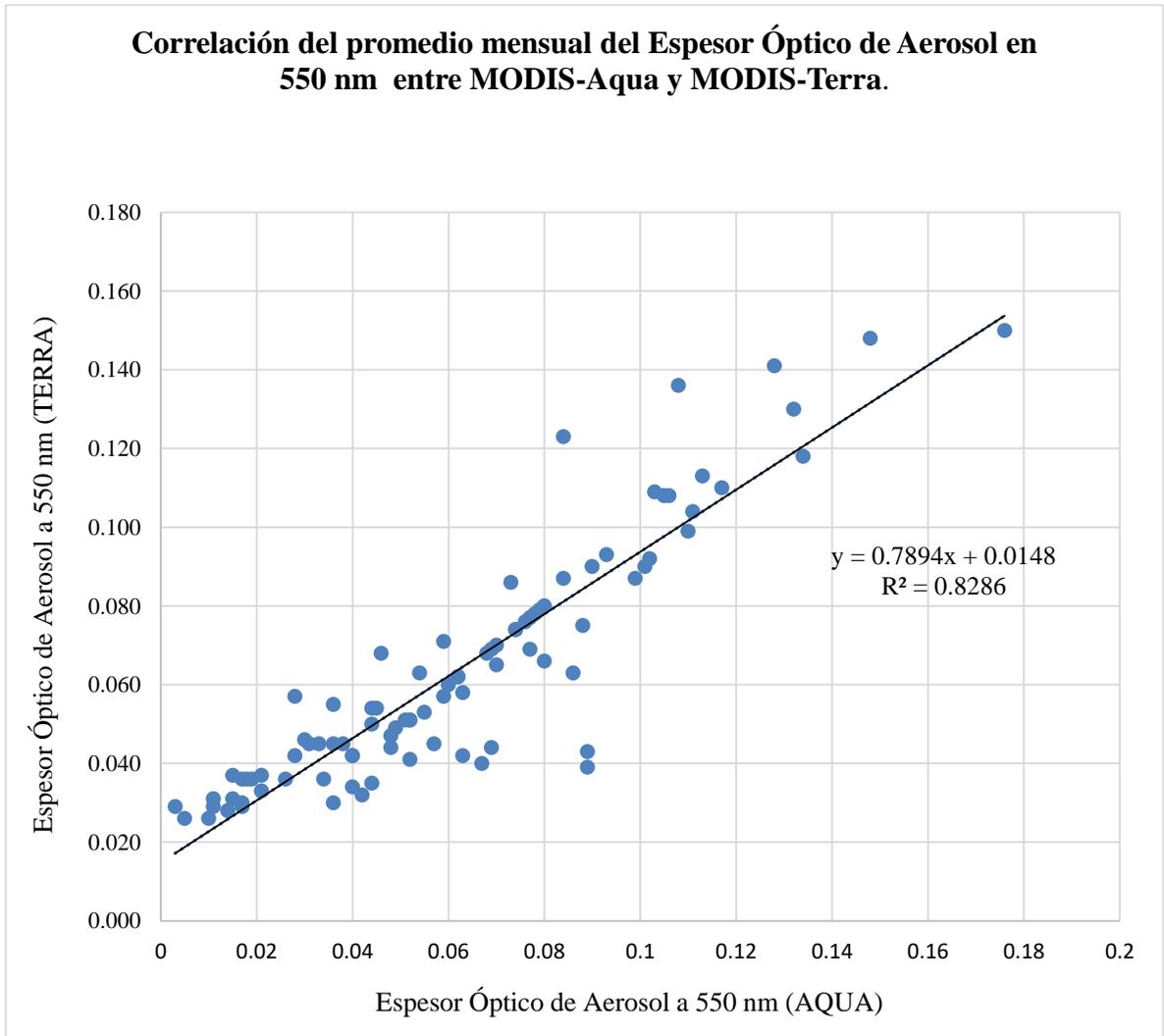


Figura N° 14: Correlación del promedio mensual del Espesor Óptico de Aerosol en 550 nm entre MODIS-Aqua y MODIS-Terra.

En la figura N° 16 se muestra la correlación de los datos de espesor óptico de aerosol, correspondiente al sensor MODIS Aqua y Terra, es regular ($R=0.8286$). En el estudio

de S. Vivanco et al., la correlación alcanzo $r = 0.902$ y en el estudio de Rodríguez et al (4) la correlación llego a 0.935.

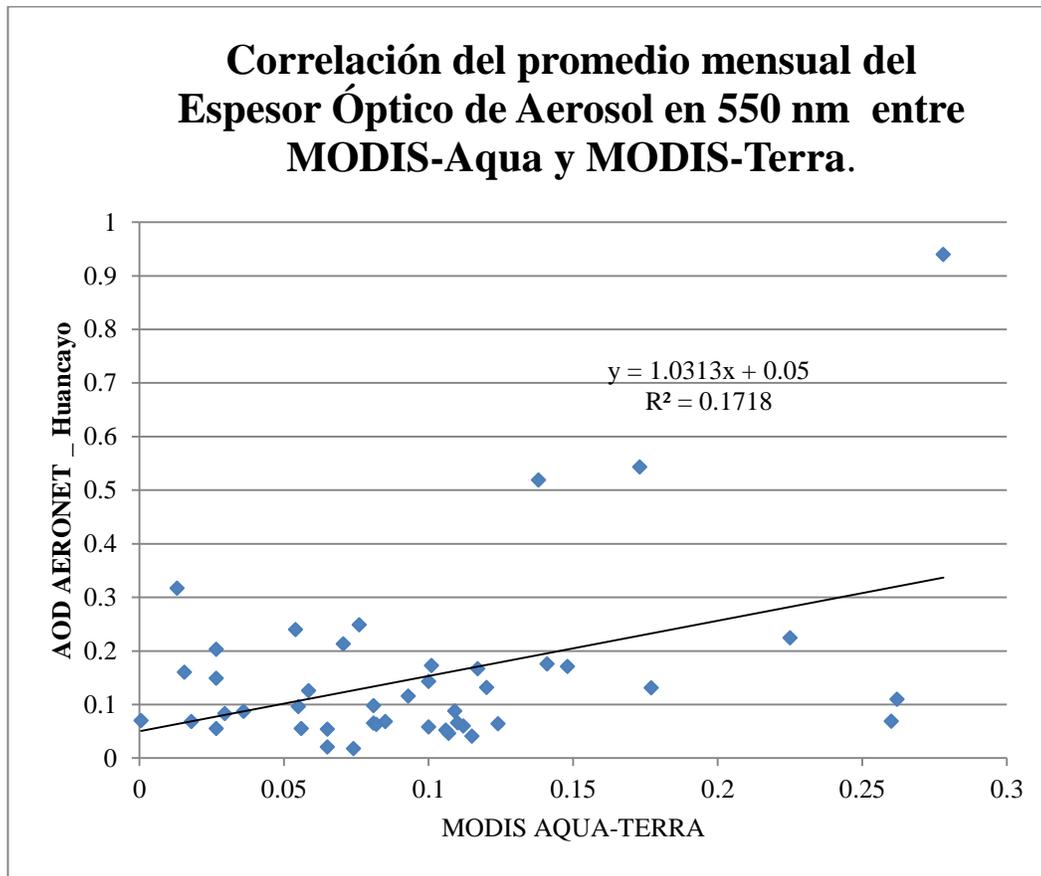


Figura N° 15: Correlación del promedio diario del Espesor Óptico de Aerosol entre MODIS Aqua-Terra y AERONET.

En la figura N° 17 se muestra la correlación entre los datos obtenidos del espesor óptico de aerosol mediante los sensores MODIS de las plataformas Aqua y Terra con los datos obtenidos *in situ* en la estación de AERONET ubicado en Huayao. Esto lleva a pensar que existen pocos incendios forestales, pero como se menciona

anteriormente los niveles de PM 2.5 sobrepasan los estándares de calidad ambiental. Por lo cual en el análisis llegamos a observar que la cantidad de datos poco para establecer una correlación en MODIS Aqua-Terra con AERONET. La cantidad de datos es poco debido a que el equipo de espesor óptico de aerosol fue calibrado en noviembre del 2016.

Los resultados se corroboran con estudios anteriores que han obtenido una correlación baja como Chile-Arica $R= 0.3357$ (MODIS-TERRA y AERONET), $R= 0.392$ (MODIS-Aqua y AERONET) y Bolivia- La Paz $R= 0.1907$ (MODIS-Terra y AERONET) y $R=0.1394$ (MODIS Aqua y AERONET). En cambio en la región de Brasil se obtiene una alta correlación en las 4 estaciones que tiene entre datos a MODIS Aqua y Terra y los datos de AERONET (Rojas N., Rojas J., 2015.)

Al tratarse de que los datos analizados y obtenidos de la APLICACIÓN GIOVANNI y AERONET corresponden a un nivel 1.5, en los cuales no se considera la corrección de nubes que influye en la cuantificación del espesor óptico de aerosol.

CONCLUSIONES

3. La variabilidad temporal del espesor óptico de aerosol en Huayao-Huancayo presenta valores elevados entre agosto – setiembre y los valores mínimos se presenta entre enero - febrero, debido a la época de lluvias que influyen en la dispersión de aerosoles.
4. La APLICACIÓN GIOVANNI y AERONET son una herramienta importante para la extracción múltiple de datos, debido al procesamiento de partir de imágenes satelitales y la medición en campo, ambas establecidas por la NASA.
5. La Variabilidad temporal entre MODIS Aqua y Terra presenta el mismo comportamiento de valores ascendentes y descendentes en el tiempo, con ligera variación en los valores cuantitativos del espesor óptico de aerosol debido al MODIS Aqua y Terra no pasaran a la misma hora por el área de investigación (Huayao – Huancayo).
6. La correlación entre los datos del espesor óptico de aerosol obtenidos de la APLICACIÓN GIOVANNI y los medidos en superficie es baja ($R=0.01718$) debido a la poca cantidad de datos para el análisis.

RECOMENDACIONES

7. Mejorar la calidad de datos obtenidos de la APLICACIÓN GIOVANNI y AERONET hasta level 2, para realizar análisis que se ajusten más a la realidad.
8. Realizar más investigaciones acerca del espesor óptico de aerosol obtenidos a partir de la APLICACIÓN GIOVANNI.
9. Mejorar el monitoreo de datos en la estación de Huayao del espesor óptico de aerosoles para futuras investigaciones.
10. Incentivar las investigaciones sobre los aerosoles y el papel que cumplen en ambiente.
11. Diseñar un estudio la variabilidad temporal del espesor óptico de aerosol en el departamento de Lima.

BIBLIOGRAFÍA.

Berrick, S., G. Leptoukh, Z. Liu, L. Pham, H. Rui, S. Shen, W. Teng, T. Zhu (2008).
Multi-sensor Distributive on line Processing Visualization and Analysis System.
Multi-sensor distributivo en línea Proceso de visualización y análisis del sistema.

Almeida Castanho, A. Dardes (2005) Dardos de Propiedades ópticas de las partículas
de aerosol y una nueva metodología para la obtención de espesor óptico vía satélite
sobre São Paulo. Tesis de doctorado presentada al Instituto de Física.

Nasa-Ocean, 2017: reason.gsfc.nasa.gov/ops/Giovanni/ocean.aqua.shtml

Vargas P. (2009). Variabilidad espacial y temporal del espesor óptico de los aerosoles
sobre Perú usando imágenes de satélite. Monografía de la Tesis de Licenciatura en
Física. Facultad de Ciencias Físicas. Universidad Mayor de San Marcos.

Vivanco S. (2014). Variabilidad temporal de los aerosoles atmosféricos en Huancayo.
Obtención de bachiller en Ingeniería Ambiental. Vol. 4. Pág. 57-68

Rojas J., Vargas P., Gomero C. (2013). Variabilidad Espacial y Temporal del Espesor
Óptico de los Aerosoles sobre Perú usando Imágenes de Satélite. Vol. 12. Pág. 8

Mohammad Al-H. (2006). La utilidad de la Profundidad Óptica del Aerosol de MODIS para Estimar la Exposición PM2.5 en la Vigilancia de Salud Pública. IEEE International Geoscience & Remote Sensing Symposium & 27th Canadian Symposium on Remote Sensing "Remote Sensing: La Asociación Global Global"

Christopher J. (2006). Estudio sobre Integración de los datos de satélites y monitoreo para estimar mensualmente las concentraciones mínimas de PM2.5 en el estado de los Estados Unidos.

www.biostat.harvard.edu/~paciorek/research/presentations/presentations.html.

Donkelaar A.(2006). Estimación de PM2.5 a nivel del suelo con profundidad óptica de aerosol determinada a partir de la detección remota por satélite. Vol. 12. Pág. 25.

X. Hu(2003) Tendencias espaciales y temporales a 10 años de las concentraciones de PM2.5 en el sudeste de Estados Unidos, utilizando datos satelitales de alta resolución. Vol. 14. Pag. 14.

H. J. Lee, Y. Liu, B. A. Coull, J. Schwartz, y P. Koutrakis (2011). Un nuevo enfoque de calibración de datos MODIS EOA para predecir las concentraciones de PM2.5. Vol. 11. Pág. 14.

N. Rojas y J. Rojas (2015) Estudio de la dinámica del espesor óptico de los aerosoles en Perú y América del Sur a partir de las imágenes satelitales Terra y Aqua en el periodo de 200-2013. Vol.18. pág. 20.

INEI. Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda. 2017.
<http://inei.inei.gob.pe/microdatos/>

Nevers, N. 1998. Ingeniería de control de la contaminación del aire. 1 era edición. México. McGraw – Hill. Interamericana editor, S.A de C.V.p. 437 – 472.

Nevers, N. 1998. Ingeniería de control de la contaminación del aire. 1 era edición. Mexico. McGraw – Hill. Interamericana editor, S.A de C.V.p. 546.

KIELY, G. Ingeniería Ambiental. Fundamentos, entornos, Tecnología y sistema de gestión. Vol. II. Editorial McGraw Hill.España.841 p. 1999.

KAUFMAN, Y.J., N. GOBRON, B. PINTY, J.L. WIDLowski y M.M. VERSTRAETE, 2002: Relationship between surface reflectance in the visible and mid-IR used in MODIS aerosol algorithm – theory, Geophys. Res. Lett., 29(18), art.no.-2116.

Hobbs PV. Introduction to Atmospheric Chemistry. Cambridge University Press; 2000.

Roelofs GJ, Kasibhatla P, Barrie L, Bergmann D, Bridgeman C, Chin M, Christensen J, Easter R, Feichter J, Jeuken A, Kjellstrom E, Kock D, Land C, Lohmann U, Rasch P. Analysis of regional budgets of sulphur species modeled for the COSAM exercise. *Tellus* 2001; 53: 673 – 94.

Roelofs GJ. Aerosol lifetime and climate change. *AtmosChemPhys Discuss* 2012; 12: 16493 – 514.

Tasić M, Rajšić S, Novaković V, Mijić Z. Atmospheric aerosols and their influence on air quality in urban areas. *FactaUniv Ser PhysChemTechn* 2006; 4(1): 83 – 91.

ESTEVE A., 2011: Estudio de los aerosoles atmosféricos en valencia mediante medidas del nefelómetro de integración. Tesis Doctoral. Departament de Física de la Terra i Termodinàmica Universitat de València.

DÍAZ GONZALES J., 1999: Propiedades radiativas de los aerosoles atmosféricos en la región de canarias, Universidad de la Laguna – España.

DIAZ, A., 2005/06: Caracterización de los aerosoles atmosféricos y su influencia en los niveles de radiación UV en la región de Canarias. Tesis de Doctorado en la Atmósfera. Universidad La Laguna – España.

JUNGE, C.E., 1969: Chemical properties of CCN, Proceedings of the International Conference on condensation and ice nuclei, 31-33, Praga y Viena, Checoslovaquia, Academia de Ciencias.

RAGHAVA R. KOMMALAPATI y KALLIAT T. VALSARAJ, 2009: Atmospheric Aerosols and their Importance. Division of Environmental Chemistry, American Chemical Society. vol. 1005.p. 1-10.

SAMET, J. M., F. DOMINICI, F. C. CURRIERO, I. COURSAK y S. L. ZEGER, 2000: Fine particulate air pollution and mortality in 20 US Cities, 1987-1994. N. Engl. J. Med., 343, 24, 1742-1749.

KAUFMAN, Y.J., N. GOBRON, B. PINTY, J.L. WIDLowski y M.M. VERSTRAETE, 2002: Relationship between surface reflectance in the visible and mid-IR used in MODIS aerosol algorithm – theory, Geophys. Res. Lett., 29(18), art.no.-2116.

TWOMEY, S., 1977: Atmospheric Aerosols. Elsevier Press. New York - EE.UU.

MIE, G., 1908: A contribution to the optics of turbid media: Special colloidal metal solutions (in German: Beitrage zur Optik trüber Medien speziell kolloidaler Metallösungen). Ann. Phys. 25: 377-445.

CHANDRESEKHAR, S., 1950: Radiative Transfer, Clarendon Press, London.

SÁNCHEZ OLIVEROS, C., 2000: Estimation of aerosol optical properties from sky radiance measurements, Doctoral Thesis, University of Granada.

KING, M.D., Y.J. KAUFMAN, W.P. MENZEL, y D. TANRÉ, 1992: Remote-sensing of cloud, aerosol, and water vapor from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS). IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens., 30(1), 2–27.

LUDWING, J.H., G.B. MORGAN y T.B. MCMULLEN, 1971: Man's impact on the climate, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA.

CADLE, R.D., 1976: Particle in the atmosphere and space, Reinhold Publication, New York, USA.

PODZIMEK, J., J.B. HABERL y W.A. SEDLACEK, 1975: Stratospheric particles, Conference on climate impact assessment, Cambridge, Massachussets, USA.

KOKHANOVSKY A. A., 2008: Aerosol Optics Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere, SPRINGER–PRAXIS BOOKS IN ENVIRONMENTAL SCIENCES, chichester, UK.1-2.

GIOVANNI, 2010 (<http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni>).

GLACCUM, R.A. y J.M. PROSPERO, 1980: Saharan aerosols over the tropical North Atlantic Mineralogy. Mar. Geol., 37, 295-321.

WILSON, W.E. y H.H. SUH, 1997: Fine particles and coarse particles: Concentration relationships relevant to epidemiologic studies. J. of the Air and Waste management Association, 47 (12), 1238-1249.

EPA, 1996: Air Quality Criteria for Particulate Matter. EPA.Vol. 1.EE.UU.

SEINFELD, J.H., y S.N. PANDIS, 1998: Atmospheric chemistry and physics: From air Pollution to climate change, xxvii, 1326 pp., John Wiley, New York.

LEVY, R.C., L.A. REMER, D. TANRE', S. MATTOO, E. F. VERMOTE, y Y.J.

KAUFMAN, 2007: Second-generation operational algorithm: Retrieval of aerosol properties over land from inversion of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer spectral reflectance. Journal of geophysical research. Vol 112.

AERONET (2017)<http://aeronet.gsfc.nasa.gov>.

HOLBEN, B. N., T. F. ECK, et al. 1998: AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, Remote Sens. Environ. 66(1), 1-16.

REMER, L. A., Y. J. KAUFMAN, et al., 2005: The MODIS aerosol algorithm, products, and validation, J. Atmos. Sci., 62(4), 947-973.

HOLBEN, B. N., T. F. ECK, et al. 1998: AERONET - A federated instrument network and data archive for aerosol characterization, Remote Sens. Environ. 66(1), 1-16.

Diccionario Meteorológico (2017)

<http://www.estrucplan.com.ar/Producciones/entrega.asp?IdEntrega=2118>.

L. Suarez, L. Castillo, M Marín, G. Carrillo, L. Rimac, J. Pomalaya, R. Menacho; Instituto de Investigación para el desarrollo Tecnológico, ININTEC, Huancayo, Perú (2006).

ANEXOS.

ANEXO N°1

LABORATORIO DE MICROFÍSICA ATMOSFÉRICA Y RADIACIÓN (LAMAR).

UBICADO EN EL OBSERVATORIO DE HUANCAYO-HUYAO



LAS ESTACIONES DE AERONET EN TODO EL PLANETA

