



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

Monitoreo satelital de aerosoles mediante datos AOD de MODIS: Análisis de tendencias de calidad del aire asociadas a la exportación de concentrado de cobre en Puerto Bolívar, Ecuador.

**RAMIREZ BERMEO CARLOS DANIEL
INGENIERO AMBIENTAL**

**GONZABAY GALARZA ALLAN EDUARDO
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA
2025**



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Monitoreo satelital de aerosoles mediante datos AOD de MODIS:
Análisis de tendencias de calidad del aire asociadas a la exportación
de concentrado de cobre en Puerto Bolívar, Ecuador.**

**RAMIREZ BERMEO CARLOS DANIEL
INGENIERO AMBIENTAL**

**GONZABAY GALARZA ALLAN EDUARDO
INGENIERO AMBIENTAL**

**MACHALA
2025**



UTMACH

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CARRERA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN

**Monitoreo satelital de aerosoles mediante datos AOD de MODIS:
Análisis de tendencias de calidad del aire asociadas a la
exportación de concentrado de cobre en Puerto Bolívar, Ecuador.**

**RAMIREZ BERMEO CARLOS DANIEL
INGENIERO AMBIENTAL**

**GONZABAY GALARZA ALLAN EDUARDO
INGENIERO AMBIENTAL**

VARGAS COLLAGUAZO LUIS ANGEL

**MACHALA
2025**



GONZABAY y RAMIREZ TESIS

9%
Textos sospechosos



< 1% Similitudes
< 1% similitudes entre comillas
< 1% entre las fuentes mencionadas
8% Idiomas no reconocidos

Nombre del documento: GONZABAY y RAMIREZ TESIS.docx
ID del documento: 9cf259064ff30a723b615e3e811e9112d28eb850
Tamaño del documento original: 4,75 MB

Depositante: LUIS ANGEL VARGAS COLLAGUAZO
Fecha de depósito: 25/7/2025
Tipo de carga: interface
fecha de fin de análisis: 25/7/2025

Número de palabras: 13.352
Número de caracteres: 88.280

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes de similitudes

Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	dspace.ucuenca.edu.ec Estudio de la contaminación del aire ambiente por mat... http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/40969 18 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (52 palabras)
2	Documento de otro usuario #2e92a4 Viene de de otro grupo 6 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (49 palabras)
3	www.revista-redi.es https://www.revista-redi.es/redi/article/view/713 4 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (32 palabras)
4	www.siiia.unam.mx SIIIA Público https://www.siiia.unam.mx/siiia-publico/c/busqueda_individual.php?id=114738 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (21 palabras)
5	kunikair.com Calidad del aire en los puertos, una cuestión de imagen y salud - ... https://kunikair.com/es/calidad-aire-puertos-maritimos/	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (35 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	strathprints.strath.ac.uk La Agenda 2030 y los objetivos para el desarrollo sost... https://strathprints.strath.ac.uk/61212/1/Salzmann_Pigrau_RED1_2017_La_agenda_2030_y_los...	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (33 palabras)
2	oficinac.es Calidad del aire: avances y mejores prácticas https://oficinac.es/es/informes-c/calidad-del-aire	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (25 palabras)
3	www.mdpi.com GIS-Based Spatial Analysis and Strategic Placement of Fine Dus... https://www.mdpi.com/2076-3417/14/22/10610	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (27 palabras)
4	developers.google.com MCD19A2.061: Terra & Aqua MAIAC Land Aerosol Optic... https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MCD19A2_GRANU...	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (29 palabras)
5	core.ac.uk https://core.ac.uk/download/pdf/84146769.pdf	< 1%		Palabras idénticas: < 1% (23 palabras)

Fuentes mencionadas (sin similitudes detectadas)

 Estas fuentes han sido citadas en el documento sin encontrar similitudes.

1	https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/
2	https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/
3	https://repositorio.oefa.gob.pe/handle/20.500.12788/937
4	https://www-who-int.translate.goog/publications/i/item/9789241511353?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
5	https://www.puertobolivar.gob.ec/rendicion-de-cuentas-2023/

Puntos de interés

RESUMEN

La calidad del aire está fuertemente influenciada por factores climáticos y antrópicos, siendo fundamental regular el impacto de las actividades al aire. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia de la exportación de concentrado de cobre en la calidad del aire en Puerto Bolívar. Se utilizaron datos del producto MCD19A2 de MODIS para recopilar el AOD en el período 2014–2024, así como información sobre las exportaciones de concentrado de cobre, obtenida del informe preliminar 2023, para determinar una correlación entre ambas variables. Además, se recopiló información sobre la velocidad y dirección del viento de la estación Granja Santa Inés para elaborar una rosa de vientos que permitiera identificar la dirección potencial de dispersión del material particulado. Los resultados obtenidos mediante la regresión segmentada y el modelo ARIMA indicaron que no existe un cambio de tendencia del AOD, dado que no se identificaron puntos de quiebre durante el período analizado.



La prueba ADF arrojó un estadístico de -9.1393 y un valor p igual a 0, confirmando una estacionariedad del AOD.

Por su parte, el análisis de regresión lineal entre las exportaciones de concentrado de cobre y el AOD reveló la ausencia de una correlación entre estas variables, respaldada por los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, que fueron de -0.010 y -0.096, respectivamente. Finalmente, la rosa de vientos mostró una tendencia de dispersión hacia el norte; sin embargo, la velocidad del viento predominante resultó insuficiente para transportar el material particulado a largas distancias.

Palabras clave: Calidad del aire, Puerto Bolívar, material particulado,



aerosoles, teledetección, MCD19A2, AOD

ABSTRA

CT

Air quality is strongly influenced by climatic and anthropogenic factors, and regulating the impact of outdoor activities is essential. In this context, this research aimed to evaluate the influence of copper concentrate exports on air quality in Puerto Bolívar. Data from the MODIS MCD19A2 product were used to compile the AOD for the period 2014–2024, as well as information on copper concentrate exports, obtained from the 2023 preliminary report, to determine a correlation between both variables. Additionally, information on wind speed and direction was collected from the Granja Santa Inés station to develop a wind rose to identify the potential dispersion direction of particulate matter. The results obtained using segmented regression and the ARIMA model indicated no change in the AOD trend, given that no break points were identified during the analyzed period. The ADF test yielded a statistic of -9.1393 and a p-value of 0, confirming stationarity of the AOD. Linear regression analysis between copper concentrate exports and AOD revealed an absence of correlation between these variables, supported by the Pearson and Spearman correlation coefficients, which were -0.010 and -0.096, respectively. Finally, the wind rose showed a northward dispersion trend; however, the prevailing wind speed was insufficient to transport the particulate matter over long distances.



Keywords: Air quality, Puerto Bolívar, particulate matter, aerosols, remote sensing, MCD19A2, AOD

INTRODUCCIÓN

La calidad del aire es un indicador esencial para el bienestar ambiental y humano, debido a su relación directa con la salud pública y la biodiversidad. En áreas urbanas e industriales, los contaminantes de aerosoles como el material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) abarcan un riesgo significativo para la salud humana, enfocándolo en zonas cercanas a actividades industriales y portuarias. Para ello, la utilización de tecnologías avanzadas como son las imágenes satelitales y modelos de calidad del aire, permiten un monitoreo más preciso de estas concentraciones, facilitando la implementación de estrategias para la correcta gestión ambiental ante este problema [1][2].

La buena gestión de la calidad del aire se encuentra vinculado con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como el Objetivo número 3, que es referente a la salud y bienestar de las personas, y el objetivo número 11, que busca ciudades sostenibles. Garantizar un aire limpio en entornos urbanos e industriales como Machala contribuye al cumplimiento de estas metas globales, mejorando la calidad de vida y reduciendo las desigualdades en salud derivadas de la contaminación atmosférica [3].

En Ecuador, la calidad del aire ha sido un tema de creciente preocupación, especialmente en ciudades costeras con alta actividad comercial e industrial. Estudios recientes muestran que los niveles de material particulado en regiones urbanas pueden exceder los límites establecidos por organismos internacionales, afectando de manera desproporcionada a comunidades vulnerables [4][5]. En el contexto regional, otros países de América Latina también enfrentan retos similares, destacándose la necesidad de fortalecer el monitoreo y regulación ambiental [6].

Machala, conocida como una de las principales ciudades costeras de Ecuador, cuenta con una infraestructura portuaria clave en Puerto Bolívar. Este puerto se especializa en la gestión de productos exportados como el banano, cuya exportación representa una parte significativa de la economía nacional. Sin embargo, la actividad portuaria también puede generar emisiones contaminantes relacionadas con el transporte marítimo y terrestre, así como el manejo de materiales industriales, incrementando la concentración de aerosoles en el área [4][7].

La gestión de concentrados de cobre en los puertos representa un desafío tanto logístico como ambiental, ya que este material, proveniente de actividades mineras, requiere de procesos con buenas técnicas de almacenamiento y transporte que permitan mitigar su dispersión en el aire. La exposición a concentrados de cobre puede ser causante de la emisión de material particulado fino, afectando la calidad del aire y generando riesgos para las zonas urbanas cercanas al puerto y a las rutas de transporte [8].

La exposición prolongada a altos niveles de aerosoles, incluyendo PM_{2.5} y PM₁₀, está asociada con un aumento en la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, como hipertensión y ataques al corazón, debido a su capacidad de inducir inflamación sistémica. En regiones portuarias como Machala, donde las actividades industriales y de transporte generan emisiones significativas, la población enfrenta un mayor riesgo de padecer estas enfermedades. Estudios realizados en ciudades con características similares han demostrado correlaciones claras entre la concentración de material particulado y la prevalencia de estas afecciones [2][5].

El monitoreo de material particulado en los años de estudio proviene del instrumento MODIS, en concreto el producto MCD19A2 el cual capta el espesor óptico de aerosoles en tierra por medio del algoritmo (MAIAC) con la colección 6.1 [9], la cual permite medir de forma cualitativa el comportamiento de las concentraciones de material particulado en el área de estudio.

La aplicación de mecanismos de teledetección para identificar contaminantes es una herramienta útil cuando no se poseen estaciones de monitoreo para medir los diferentes compuestos perjudiciales en el ambiente, por ello direccionar un estudio en relación con el comportamiento del material particulado en relación con las exportaciones de concentrados de cobre permitirá comprender la relación de sus operaciones y la calidad del aire.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad del aire en el cantón Machala ha sido poco estudiada, a pesar de ser el cantón más poblado de la provincia de El Oro. Representa el 41% de la población en la provincia [10]. Esta falta de información sobre la calidad del aire impide conocer el grado de contaminantes presentes en el ambiente y sus efectos en la salud de las personas. Uno de estos contaminantes es el material particulado, que de acuerdo con la AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE (EEA) es uno de los cinco contaminantes atmosféricos más nocivos [11], en elloradica la importancia de cuantificar el grado de exposición.

Existen varias fuentes de material particulado que pueden incrementar las concentraciones en la ciudad de Machala, una de ellas se considera que viene del Puerto Bolívar durante el almacenamiento y exportación de concentrados de cobre. El concentrado de cobre está formado por partículas muy finas, el 26% del concentrado húmedo cuenta con un tamaño de hasta 47 µm, siendo el material más fino capaz de suspenderse en el aire con la fuerza del viento [7].

Un caso relacionado con la influencia del material particulado proveniente de la actividad de exportación de concentrado de cobre se da en la ciudad Ilo en Perú, donde se analizan las concentraciones de cobre en el material particulado de tamaño 10 µm, resultando en un rango de 0.04 a 0.30 µg/m³ [12]. Por lo tanto, se deduce que en Puerto Bolívar siendo también exportador de concentrado de cobre, los niveles de las concentraciones de material particulado aumenten debido a la manipulación del concentrado de cobre.

El aumento de la exposición en ambientes contaminados con material particulado está relacionado con un aumento de las hospitalizaciones [6], las enfermedades que pueden llegar a desarrollarse son la arritmia, hipertensión arterial, enfermedad cerebrovascular y cardiopatía isquémica [13]. De acuerdo con [6] estos efectos nocivos deben ser mitigados dentro de la región de América latina, debido que, si se reducen los niveles de contaminación, se podrá ver una reducción en los costos de salud pública.

En el Ecuador se realizan monitoreos de la calidad del aire, contando con ciudades como Quito, Guayaquil y Cuenca. Un estudio que lleva a cabo un análisis comparativo de Ecuador, Venezuela y Barcelona, en el cual recomienda que se cuente con registros de monitoreo continuo que permitan establecer concentraciones anuales de los contaminantes [14]. Por ello, es necesario evaluar la calidad del aire en la ciudad de Machala en relación con

las concentraciones de material particulado, lo que permitirá identificar si existe una correlación entre el aumento en la exportación de concentrado de cobre y las concentraciones de material particulado

Antecedentes

La calidad del aire es un tema de creciente interés debido a sus implicaciones para la salud pública y el medio ambiente. A nivel global, estudios han demostrado que el material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) está asociado con enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neurológicas, además de contribuir al cambio climático y la degradación ambiental. Este contexto refuerza la importancia de implementar estrategias de monitoreo y mitigación para abordar los impactos de la contaminación atmosférica [15][16]. En América Latina, el crecimiento urbano e industrial ha incrementado las emisiones de contaminantes atmosféricos. En muchos países de la región, las normativas ambientales no se aplican de manera estricta, y la falta de infraestructura de monitoreo complica la evaluación de los niveles de contaminación. Por ejemplo, en Ecuador, la calidad del aire se encuentra influenciada por actividades industriales, tráfico vehicular y quema de biomasa, factores que han generado un aumento significativo de los aerosoles en áreas urbanas [17][18]. En ciudades como Quito y Guayaquil, se han realizado esfuerzos para evaluar la calidad del aire utilizando estaciones de monitoreo y herramientas de teledetección. La ciudad de Guayaquil posee estaciones de monitoreo en las cuales los niveles de material particulado generalmente cumplen la norma nacional; sin embargo, al comparar con el umbral que establece la OMS en el 2021 es superado por un 48% [19]. Por otro lado, investigaciones realizadas en Quito han identificado la necesidad de incorporar tecnologías de monitoreo más accesibles y adaptativas para ampliar la cobertura de datos y mejorar las políticas públicas [20]. La ciudad de Machala, ubicada en la provincia de El Oro, presenta una situación diferente. A pesar de ser una de las ciudades portuarias de importancia nacional, carece de infraestructura adecuada para monitorear la calidad del aire de manera constante. Históricamente, las exportaciones desde el Puerto Bolívar se han centrado en productos agrícolas y acuícolas como el banano y el camarón respectivamente. Tras el inicio de las exportaciones de concentrado de cobre por el Puerto Bolívar se han generado preocupaciones sobre su impacto ambiental, debido a que la manipulación de este mineral produce partículas finas que pueden ser suspendidas en el aire [21][17]. En Machala se ha demostrado que más del 50% del material particulado sedimentable recolectado en el casco urbano no cumple con las normativas nacionales, y solo el 7% se ajusta a las recomendaciones de la OMS, lo que evidencia una gestión ambiental insuficiente [17]. Este panorama destaca la necesidad de implementar herramientas alternativas para evaluar la calidad del aire, especialmente en áreas donde no existen estaciones de monitoreo tradicionales. La teledetección se presenta como una solución viable para abordar estas limitaciones. Tecnologías como los instrumentos MODIS y Tropomi permiten analizar las concentraciones de aerosoles de manera espacial y temporal. En el caso de Machala, estas herramientas son fundamentales para identificar patrones de contaminación asociados a las actividades portuarias y para generar datos que respalden la formulación de políticas públicas orientadas a mitigar los impactos en la salud y el ambiente. La utilización de la variable de Profundidad óptica de Aerosol (AOD) para el estudio, es de objeto fundamental para la determinación de la situación ambiental en Puerto Bolívar, ya que nos permite valorar la calidad del aire, como nos indica (61) el AOD que se deriva por satélite, en este caso de Aqua/Terra, demuestra una fuerte correlación con los niveles de contaminación del aire superficial, y esto a la vez convierte al AOD en una herramienta valiosa para monitorear la calidad del aire en área donde no exista una cobertura de estaciones terrestres, como pueden ser las estaciones fijas, sensores de detección de contaminantes y demás métodos para monitorear la calidad del aire.

III. JUSTIFICACIÓN

El monitoreo de la calidad del aire es un proceso técnico-científico continuo que permite conocer las concentraciones de gases y aerosoles que pueden causar efectos adversos en la salud de la población. Este monitoreo se realiza por medio de estaciones equipadas para cuantificar las concentraciones de material particulado. En el área de estudio, debido a que no se cuenta con este equipo ni con su infraestructura para la medición de gases, se recurre al uso de imágenes satelitales por medio de sensores para la identificación de estos contaminantes. Permitiendo de esta manera elaborar análisis multitemporales, lo que facilita comparar la situación previa al inicio de las actividades de exportación de concentrado de cobre. El monitoreo de las concentraciones de aerosoles en la zona de estudio contribuye a mejorar la comprensión de la influencia de las exportaciones de concentrado de cobre con los niveles de material particulado. Para ello es necesario realizar investigaciones acerca de la calidad del aire de la ciudad y que las autoridades promuevan la instalación de redes de estaciones de monitoreo para la cuantificación de contaminantes como el material particulado, monóxidos de carbono, ozono troposférico, entre otros agentes contaminantes. El estudio pretende proporcionar información sobre la calidad del aire que posee la ciudad Machala por medio del uso de imágenes satelitales. Por lo que, a través del producto MCD19A2 de MODIS en los satélites AQUA y TERRA, se obtuvo información para cuantificar las concentraciones de contaminantes en Puerto Bolívar de una manera integral y regional.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar la influencia de la exportación de concentrado de cobre en la calidad del aire en Puerto Bolívar durante el periodo 2014-2024, mediante el análisis de tendencias temporales obtenidas a través de sensores remotos con el fin de identificar posibles afectaciones al recurso aire.

B. Objetivos específicos

Obtener y analizar datos de AOD del producto MCD19A2 de MODIS para la parroquia Puerto Bolívar en el periodo 2014-2024.

Analizar los cambios de tendencia del AOD en el periodo 2014-2024 mediante un análisis multitemporal.

Evaluar la correlación entre AOD y las exportaciones de concentrado de cobre mediante un análisis estadístico.

VI. MARCO TEÓRICO

Calidad del aire

La calidad del aire en entornos urbanos es resultado de la interacción entre las condiciones del ambiente, las fuentes naturales y antropogénicas [22]. La dinámica cambiante de estas condiciones genera variaciones en la composición, concentración y distribución de los contaminantes atmosféricos a lo largo del tiempo, lo que puede llevar a incrementos locales en las concentraciones y, consecuentemente, al deterioro de la calidad del aire.

La relación que tiene la calidad del aire con la salud pública se basa en la susceptibilidad de la población a desarrollar enfermedades respiratorias. Esta problemática afecta particularmente a los sectores de bajos recursos, donde la calidad del aire tiende a ser inferior, lo que incrementa el riesgo de impactos negativos en la salud [23].

El deterioro de la calidad del aire puede atribuirse tanto a procesos ambientales como a prácticas sociales [24]. Por ejemplo, el uso de combustibles fósiles es una fuente significativa de contaminación [25]. Por ello, es fundamental investigar los factores que influyen en la contaminación atmosférica para comprender sus mecanismos y desarrollar estrategias de mitigación [26].

Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica, es la amenaza ambiental más importante para la salud humana. Su presencia en áreas densamente pobladas implica una exposición constante de la ciudadanía [27], lo que favorece el desarrollo de enfermedades respiratorias. No obstante, esta contaminación también puede originarse a partir de fuentes naturales, como las erupciones volcánicas y la descomposición de materia orgánica.

Según [28] se evidencia que el 99% de la población respira un aire con concentraciones de contaminantes superiores a los límites aceptables por la OMS. Este hecho aclara la magnitud de la contaminación atmosférica como un problema global con implicaciones en la salud. La acumulación de contaminantes como material particulado, gases a partir de la quema de biomasa, emisiones industriales, entre otros, se conoce como carga de aerosoles, siendo este un parámetro vital para estimar su intervención en la contaminación en la atmósfera [25]. Las actividades humanas constituyen la principal fuente de contaminación del aire en zonas urbanas e industriales. Procesos comunes, como el transporte, la generación de energía y las actividades industriales, emiten una variedad de contaminantes, entre los que destacan el material particulado, los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), que contribuyen significativamente al deterioro de la calidad del aire.

Óxidos de azufre (SO_x)

Los óxidos de azufre presentes en la atmósfera tienen su origen de forma natural como antropogénica. De forma natural se emiten en incendios forestales o erupciones volcánicas, mientras por las fuentes antropogénicas se dan por la quema de biomasa, combustibles fósiles, minería y procesos industriales [29]. Siendo las fuentes antropogénicas las principales fuentes de óxidos de azufre que se emiten a la atmósfera a nivel mundial [30].

Este proceso ocurre en el ciclo atmosférico del azufre, en donde los sulfuros de hidrógeno (H₂S), sulfuro de dimetilo (DMS) y disulfuro de carbono (CS₂) proveniente de fuentes naturales y antrópicas reaccionan con los gases de la atmósfera formando sulfuro de carbonilo (OCS), dióxido de azufre (SO₂) y otros gases. El primer gas por fotólisis (hv) en la tropopausa forma dióxido de azufre que reacciona con un hidroxilo (OH) formando sulfato (SO₄) que vuelve para depositarse en la superficie. Sin embargo, el dióxido de azufre y otros gases pueden ser absorbidos por nubes y formar hidrosoles formando las lluvias ácidas que descienden a la superficie, como se representa en (Fig. 1).

□

Fig. 1. Ciclo atmosférico de los compuestos del azufre. [31].

Este gas que se encuentra presente en las áreas pobladas como las ciudades es perjudicial para la salud de su población. La capacidad para causar desde síntomas leves como irritaciones en nariz y garganta y enfermedades como la broncoconstricción y disnea, especialmente en individuos asmáticos cuando se exponen a niveles altos de óxidos de azufre [16], lo convierte en un contaminante que se debe controlar.

La generación de energía convencional, como el transporte también producen otros contaminantes igual de importantes. Los óxidos de nitrógeno son uno de ellos, teniendo la misma importancia que los óxidos de azufre por su impacto en la salud y la calidad del aire.

Óxidos de nitrógeno (NO_x)

Parte de los óxidos de nitrógeno que se encuentran en el ambiente de las áreas pobladas provienen de actividades como la quema de combustibles fósiles y de biomasa, dando lugar a las reacciones como se muestran en (Fig. 2). Siendo estas dos acciones las que producen entre el 5% y el 15% de los óxidos de nitrógeno total (NO_x) [5]. Este aporte es sostenido en el tiempo por la necesidad de transportarse de la población y que puede aumentar en horas con mayor afluencia de vehículos, exponiendo a la población a los efectos que se pueden generar.

Como se puede observar en la (Fig. 2) en el ciclo del nitrógeno convergen varios procesos de transformaciones a partir del nitrógeno, desde que este se encuentra de forma natural en la atmósfera, el óxido nitroso (N₂O), gas que por su larga vida media en la atmósfera eventualmente se transporta hasta la estratosfera, en donde por reacciones con rayos ultravioletas (UV), Ozono (O₃) y radicales de hidroxilo (OH), se transforman en ácido nítrico (HNO₃), gas que se transporta de regreso hacia la troposfera y luego se deposita en los suelos y océanos como ion nitrato (NO₃⁻), en donde suceden varios procesos químicos a partir de este ion,



como la amonificación, la nitrificación y la desnitrificación,

proceso por el cual con la ayuda de bacterias anaerobias reducen los iones de nitrato y nitrito a gases, regresando de esta manera a la atmósfera.

□

Fig. 2. Ciclo atmosférico de los compuestos de nitrógeno. [31].

Los óxidos de nitrógeno representan una alerta por sus efectos en la salud y por su capacidad de generar otros compuestos químicos en el ambiente. La excitación que puede tener por la radiación solar en la superficie terrestre le permite interactuar con otros gases como por ejemplo los compuestos orgánicos volátiles [16].

Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Los compuestos orgánicos volátiles al igual que los óxidos de azufre y nitrógeno tienen un origen natural y antrópico. Este último tiene sus principales fuentes en las industrias y vehículos, lo que representa más del 28% en relación con el total de compuestos orgánicos volátiles presente en el ambiente en las áreas suburbanas [32].

En la industria, el uso de insumos que a temperatura ambiente tiende a volatilizarse permite su generación de los COVs [16]. Insumos como combustibles, fertilizantes o disolventes pueden volatilizarse, contribuyendo a las concentraciones de aerosoles suspendidas en el aire, lo que representa un riesgo tanto para la salud como para el ambiente.

Aerosoles



Los aerosoles son partículas ultrafinas en estado sólido, líquido o gaseosos dispersos en la atmósfera que se originan de fuentes naturales o antrópicas [33].

Entre las fuentes naturales se encuentran la evaporación del agua, la actividad volcánica y la quema de biomasa, como se muestra en (Fig. 3). Entre las fuentes antrópicas se encuentran la quema de combustibles fósiles, las actividades industriales y la generación de energía.

□

Fig. 3. Esquema idealizado de la distribución del área de superficie de partículas de un aerosol atmosférico. Los modos principales, las fuentes y la formación de partículas y los mecanismos de eliminación están indicados. [31].

La interacción de los aerosoles con la atmósfera puede afectar el comportamiento climático por medio de varios mecanismos. La capacidad de los aerosoles de absorber y dispersar la radiación reduce la energía que llega al suelo, pueden reaccionar con otros compuestos dispersos en el aire [34], lo que afecta la concentración y disposición en la atmósfera.

Los aerosoles están categorizados en dos tipos. Los primarios son provocados por fuentes naturales como las erupciones volcánicas y antropogénicos como la quema de biomasa [26].

Los secundarios en cambio, se originan a través de procesos de conversión de gas a partículas, en procesos naturales como la nucleación, condensación y reacciones químicas heterogéneas y multifásicas [26]. Estas categorías de aerosoles están conformadas principalmente por un contaminante en común, el material particulado.

Material particulado (PM)

El material particulado se puede clasificar según el origen y tamaño. De acuerdo con su formación, se dividen en primarias y secundarias, como se observa en (Fig. 4), las primarias son liberadas directamente a la atmósfera, mientras que las secundarias se forman por medio de reacciones[35].

□

Fig. 4. Características, fuentes y composición del material particulado. [36].

El material particulado de acuerdo con su composición y tamaño puede representar riesgo a la salud. Su capacidad para penetrar profundamente en el sistema respiratorio las hace especialmente peligrosas, ya que pueden causar o agravar enfermedades respiratorias y cardiovasculares [16].

De acuerdo con el tamaño pueden depositarse o suspenderse en el aire, permitiéndoles transportarse grandes distancias [27]. Las más conocidas son el PM₁₀ y 2.5, debido a la susceptibilidad a ser respirados, permitiéndoles ingresar a las vías respiratorias. Siendo el material particulado un problema significativo para la salud a nivel mundial, su control es clave para poder alcanzar los Objetivos de desarrollo Sostenible (ODS).

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Nacido en la Conferencia de las Naciones Unidas

 **strathprints.strath.ac.uk** | La Agenda 2030 y los objetivos para el desarrollo sostenible : una mirada crítica sobre su aportación a la gobernanza global en términos de jus...
https://strathprints.strath.ac.uk/61212/1/Salzmänn_Pigrau_RED1_2017_La_agenda_2030_y_los_objetivos_para_el_desarrollo_sostenible.pdf

sobre Desarrollo Sostenible (Río+20) celebrada en Río de Janeiro en junio de

2012 [37]. Los Estados abordaron los retos que permitirían a las sociedades tener un desarrollo sostenible. Mediante un grupo de trabajo que culminó en agosto del 2015 dio a lugar 17 objetivos y 179 metas que se deberían aplicar hasta el año 2030, como se observa en (Fig. 5).

□

Fig. 5. Objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030. [3].

Estos objetivos poseen un enfoque integral, que se fundamenta en procesos ecológicos y naturales de la sociedad humana y al mismo tiempo promueven el bienestar humano [38].

Estos objetivos se sustentan en tres pilares complementarios: progreso social, desarrollo económico y protección ambiental [39]. Uno de los problemas que abordan los ODS es la salud pública, explicada en el objetivo 3 de la meta número 9 que se refiere a la Salud y Bienestar [3]. Donde se busca la reducción del número de muertes causadas por la contaminación del aire.

Salud pública

Es una disciplina encargada de proteger y mejorar la salud de las comunidades. Mediante la evaluación del estado de la población, desarrollo de políticas, asignación de recursos y

garantizar el acceso al servicio [40], de esta forma salvaguardando el bienestar y la productividad de la población. El enfoque de la salud pública abarca varios problemas al poder identificar y tratar de remediar.

Enfermedades respiratorias

Las enfermedades respiratorias comprenden una variedad de trastornos que afectan las vías respiratorias y los pulmones. Estas patologías son inducidas por la calidad del aire [41] o rasgos genéticos que predisponen a los individuos a una mayor susceptibilidad a agentes ambientales.

El material particulado es uno de los principales factores ambientales asociados con el desarrollo de enfermedades respiratorias, como se muestra en (Fig. 6). Su exposición prolongada contribuye significativamente a la aparición de enfermedades pulmonares y cardíacas [42], debido a su capacidad de penetrar profundamente en el sistema respiratorio y provocar inflamación sistémica [43].

□

Fig. 6. Áreas donde se aloja el material particulado de 10 y 2,5 μm . [5].

Las fuentes de material particulado hacia la atmósfera son diversas. Entre ellas están la manipulación y transporte de minerales. Estos pueden liberar partículas finas que se suspenden en el aire debido al tamaño de la partícula, una sospecha de esta emisión proviene de los concentrados de cobre.

Concentrados de cobre

El concentrado de cobre es el resultado de los procesos de extracción y beneficio del mineral de cobre, que permiten la separación de minerales como la calcopirita y la calcocita del relave [44]. Dando como resultado un contenido de cobre que varía entre el 20% y el 45% y un material con un tamaño de partícula intermedio, generalmente en el rango de 50 a 70 μm [44].

Los concentrados de cobre presentan una toxicidad baja durante su transporte y almacenamiento en condiciones normales. No obstante, cuando estos materiales se dispersan en medios acuáticos, su toxicidad se incrementa significativamente, generando efectos adversos en las especies acuáticas y alterando la cadena trófica [45]; se pueden observar más ejemplos en (Fig. 7). Para estimar si los concentrados de cobre son un factor que afecte las concentraciones de AOD que se presentan en la atmósfera se utilizarán los sistemas de información geográfica mediante las imágenes satelitales.

□

Fig. 7. Potenciales fuentes, forma potencial de contaminación, medios potenciales a afectarse y las propiedades que influyen en la toxicidad del nano cobré en las franjas amarillo, azul, rosa y verde respectivamente. [45].

Sistema de Información Geográfica (SIG)

Los sistemas de información geográfica son herramientas que permiten comprender mejor la información espacial por medio de una perspectiva más amplia [46]. Su capacidad para almacenar, recuperar, analizar y visualizar datos geográficos facilita el manejo de grandes conjuntos de datos [47], permitiendo la identificación de patrones, tendencias y relaciones espaciales esenciales para la toma de decisiones en diversas disciplinas [48].

Los sistemas de información geográfica se pueden combinar con la teledetección, para la recopilación remota de información relevante para estudios. Permite monitorear en áreas que no se posee información y establecer una base para estudios futuros.

Teledetección

La teledetección es una tecnología que permite la recolección de información del planeta por medio de sensores a bordo del satélite. Debido a la capacidad para abarcar amplias escalas espaciales y temporales, así como diversos rangos espectrales [49], puede ofrecer una alta precisión de datos y rapidez en la recopilación de información. Convirtiéndose en una solución eficaz para realizar estudios detallados del medio ambiente, monitorear de los cambios en el uso del suelo, evaluar recursos naturales, gestionar acciones ante desastres, entre otras aplicaciones. En la rama de teledetección se utiliza una gran variedad de objetos y herramientas útiles para la detección de cambios en el ambiente, un ejemplo son los sensores ópticos que permite recolectar información en un rango de onda que puede ser captada por el ser humano.

Sensores ópticos

Los sensores ópticos son dispositivos diseñados para captar ondas electromagnéticas de la energía reflejada por la superficie de la tierra, estos se pueden clasificar en sensores pasivos y activos, Los sensores pasivos detectan la radiación o la energía electromagnética que es emitida por un objeto [50].

Entre los sensores pasivos se pueden encontrar diferentes rangos de longitudes de ondas, entre ellos, las bandas ultravioleta con la longitud de onda más pequeña encontrándose de 0,03 micras a 0,4 micras [51], las bandas del rango visible rojo, verde y azul, que van desde 0,4 micras a 0,7 micras y por último las del infrarrojo, que se subdividen en infrarrojo cercano que son de 0,7 micras a 1,4 micras, infrarrojo de onda corta que va de 1,4 a 3,0 micras y por último la del infrarrojo térmico que va de 3,0 a 14,0 micras [51]. Permitiendo crear imágenes satelitales para diferentes características de la atmosfera y corteza terrestre.

Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales permiten representar características físicas, climáticas, biológicas y geográficas del planeta a una resolución manejable. La resolución espacial de las actuales imágenes satelitales puede llegar a escala de metros [22], lo que permite capturar detalles con alta precisión para diversos análisis y aplicaciones.

El movimiento orbital de los satélites alrededor del planeta permite la obtención de imágenes repetidas a lo largo del tiempo. Esto facilita la realizar análisis espaciotemporales, que son esenciales para monitorear cambios en la superficie terrestre, evaluar tendencias ambientales y estudiar dinámicas geográficas con precisión [52].

En conjunto con la información que se puede obtener mediante las imágenes satelitales, se puede combinar con información meteorológica y geoespacial, permitiendo la creación de Modelos de Calidad del Aire (MCA), lo que permite analizar el comportamiento de un objeto en el ambiente.

Modelos de calidad del aire (MCA)

Los modelos de calidad del aire (MCA) permiten analizar el transporte y la dinámica de los contaminantes atmosféricos [53]. Mediante factores físicos, químicos, climáticos y geográficos, estos modelos simulan el comportamiento y la distribución de los contaminantes, proporcionando una comprensión detallada de su impacto en el ambiental y su variabilidad espaciotemporal, una representación del funcionamiento se muestra en (Fig. 8).

□

Fig. 8. Esquema conceptual de los modelos de calidad de aire. [54].

Estos modelos de dispersión pueden mejorar su precisión mediante información espacial proporcionada por herramientas satelitales, como es el Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) siendo un instrumento muy útil para obtener un mejor producto en la simulación de la dispersión de contaminantes.

Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS)

MODIS es un instrumento a bordo de los satélites Terra y Aqua, diseñado para estudiar y comprender la dinámica de los procesos que ocurren en la superficie terrestre, los océanos y la atmósfera inferior [55], como se muestra en (Fig. 9). Entre los productos que ofrece esta el MCD19A2 que recopila la profundidad óptica de aerosol terrestre (AOD) en diferentes longitudes de onda [56]. Estos datos son fundamentales para el estudio de la distribución y el impacto de los aerosoles en el ambiente.

□

Fig. 9. Grupo de satélites denominados constelación de la tarde, o a veces el tren A [57].
Las longitudes de onda de 0,47 y 0,



55 μm recuperan las concentraciones de aerosoles derivados de la combustión de biomasa o del polvo.



El AOD que es recuperado a partir de la Banda azul (0,47 μm) se utiliza para la estandarización de la banda verde (0,55 μm) [9].

Esta última presenta una validación de calidad comparable, aunque ligeramente inferior, a la de la banda azul. Sin embargo, la capacidad de medición no es suficiente para estimar las concentraciones de masa de partículas de aerosol, debido a la influencia de las nubes y humedad [58]

Seguro de calidad de la Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD_QA)

El conjunto de datos AOD_QA fue implementado por primera vez en el algoritmo MAIAC con el lanzamiento de su colección inicial (C6.0). La banda AOD_QA surgió como una necesidad

para representar las condiciones del área en la que se recupera el AOD. A partir de la solicitud de investigadores [2], se desarrolló y publicó el primer documento oficial de la guía del usuario que incluye información detallada sobre la banda AOD_QA. Con la publicación de dicha guía, esta banda se consolidó como una herramienta fundamental para evaluar la calidad de los datos AOD, mediante un proceso de decodificación de los conjuntos de bits que describen las condiciones de recuperación. Cada intervalo de bits representa una característica específica de la calidad o condiciones del píxel. La Tabla I presenta la estructura de codificación y las subdivisiones correspondientes del producto AOD_QA.

TABLA I
DEFINICIÓN DE CONTROL DE CALIDAD DE AOD PARA MCD19A2 (ENTERO SIN SIGNO DE 16 BITS) [59]
Bits Definición
Bits 0 - 2: Máscara de nube 0: Indefinida 1: Claro

	3	zona ignorada
--	---	---------------

2: Posiblemente nublado (detectado por el filtro de AOD) 3: Nublado (detectado por el algoritmo de máscara de nubes)
5: Sombra de nube 6: Punto caliente de fuego 7: Sedimentos de agua
Bits 3 - 4: Máscara de nieve o hielo de agua y tierra 0: Tierra 1: Agua 2: Nieve 3: Hielo
Bits 5 - 7: Máscara de adyacencia 0: Condición normal/limpia 1: Junto a las nubes 2: Rodeado por más de 4 píxeles nublados 3: Junto a un solo píxel nublado 4: Junto a nieve 5: Se detectó nieve anteriormente en este píxel
Bits 8 - 11: QA para AOD 0: Mejor calidad 1: Se detectan sedimentos de agua (agua) 3: Hay 1 nube vecina 4: Hay más de 1 nube vecina 5: Sin recuperación (nublado o lo que sea) 6: No hay recuperaciones cerca de nieve detectada o detectada anteriormente 7: AOD climatológica: altitud superior a 3.5 km (agua) y 4.2 km (tierra) 8: No hay recuperación debido al reflejo del sol (agua) 9: El AOD recuperado es muy bajo (<0.05) debido al reflejo (agua). 10: La AOD dentro de un radio de +/- 2 km de la costa se reemplaza por la AOD cercana. 11: Terreno, calidad de la investigación: Se recuperó la AOD, pero es posible que el CM esté nublado
Bit 12: Máscara de reflejo 0: Sin reflejos 1: Brillo (ángulo de brillo inferior a 40°)
Bits 13 - 14: Modelo de aerosol 0:



Modelo de fondo (regional) 1: Modelo de humo (regional) 2: Modelo de polvo
Bit 15: Reservado 0: Reservado para uso futuro 1: Reservado para uso futuro
Profundidad óptica de los aerosoles (AOD)

El AOD se define como la integral del coeficiente de extinción de un medio en la dirección vertical [34]. Este parámetro permite cuantificar la concentración de aerosoles en un área determinada, proporcionando información clave para evaluar su distribución, impacto ambiental y efectos en la calidad del aire. El AOD facilita la estimación de la concentración de material particulado en el ambiente debido a su relación con los aerosoles [60]. Este parámetro proporciona una medida indirecta pero efectiva para evaluar la carga de partículas en suspensión, lo que resulta esencial para estudios sobre calidad del aire.

VI. METODOLOGIA

Delimitación del área de estudio

Para la delimitación del área de estudio se utilizó el sistema de información geográfica (ArcGIS 10.3). Utilizando el mapa base como referencia, se ubicó de forma precisa el área de interés y a continuación se superpusieron la capa de polígono para delimitar un área que representa fielmente el área de estudio. El estudio se desarrolló en la parroquia Puerto Bolívar, cantón Machala, en la provincia de El Oro, Ecuador. La zona de estudio se encuentra específicamente en el área de operaciones del Puerto Bolívar, como se muestra en la Fig. 10. Esta área ha sido delimitada debido a las actividades de almacenamiento de concentrados de cobre destinadas a su posterior exportación.

□ figura

Fig. 10. Mapa de ubicación geográfica del Puerto Bolívar.

Materiales y métodos

Se seleccionó el producto MCD19A2 del sensor MODIS debido a su reconocida correlación con los niveles de material particulado, a través de la variable de AOD. Para la obtención de los datos, se empleó un código por medio de la plataforma Google Earth Engine (GEE), que implementa un proceso de filtrado en tres etapas: en primer lugar, se restringen las imágenes disponibles al área de estudio; en segundo lugar, se seleccionan únicamente aquellas que contienen datos válidos de AOD; y, finalmente, se aplica un filtrado adicional utilizando los bits 0-2 del conjunto AOD_QA, correspondiente a la máscara de nubes, seleccionando únicamente las escenas con condiciones atmosféricas claras para su posterior exportación y procesamiento manual. Para el diseño experimental, debido a la resolución espacial del producto MCD19A2, se dividió al área de influencia de la zona de estudio en 9 cuadrantes, que representan los puntos cardinales como se observa en la Figura. 11, en donde el cuadrante CENTRO corresponde a la ubicación del área de almacenamiento de concentrado de cobre, considerada como el punto de origen de la emisión. Esta segmentación permite una evaluación espacial más precisa de la posible dispersión de la pluma de contaminación.

?

Fig. 11. Mapa de ubicación de las áreas muestreadas.

Extracción de datos AOD en la zona puerto Bolívar

Para la obtención de los DATOS AOD se siguió los siguientes pasos dentro de la plataforma de Google earth engine:

?

Fig. 12. Diagrama de flujo de procesos realizados.

Definir la zona de estudio en Google Earth Engine

Como primer paso se definió la coordenada central con la que se decide trabajar (-80.00, -3.26) y se estableció como punto de referencia para establecer los puntos que se dividen en N (norte),



S (sur), NE (noreste), NO (noroeste), E (este), O (oeste), SE (sureste) y SO (suroeste), y por último se crea una figura geométrica (denominada como “geometry” dentro de GEE) que representa una cuadrícula que encierra los pixeles de los 9 puntos antes establecidos con el siguiente código:

?

Fig. 13. Coordenadas de los puntos de muestreo.

Cargar el producto MODIS

Luego se dispuso a elegir el producto a trabajar, en este caso el MCD19A2, señalando en el código que las imágenes se las requiriere desde el 2014 hasta el 2024, estableciendo las fechas en periodos de 1 año para la descarga de información en su versión de MAIAC 6.1, también se filtró las imágenes para la zona anteriormente denominada “geometry” y seleccionamos las bandas “Optical_Depth_047” y “AOD_QA” para posteriores filtros.

Filtrar imágenes con valores en geometría

En la siguiente sección se aplica una función a cada imagen de la colección para después extraer la máscara de la banda “Optical_Depth_047”, del cual se establece válido cuando exista al menos 1 píxel con datos de AOD en el área de “geometry”. Esta función es devuelta a la imagen y se agrega una nueva máscara denominada “hasData” con valores de 0 (sin pixeles válidos) y 1 (con al menos 1 píxel válido), finalmente se filtra las imágenes con un “hasData” de 1.

Decodificación de bits de QA

Establecemos una función destinada a decodificar las imágenes previamente filtradas para posteriormente seleccionar la banda "AOD_QA" y se agregan nuevas bandas correspondientes a los rangos de bits y nombres establecidos en [9]. Finalmente, esta función se asigna a una variable, lo que permite su aplicación sistemática sobre la colección de imágenes.

Aplicar decodificación, máscara y recorte

Para filtrar los datos de AOD utilizando el criterio de máscara de nubes, se aplica la función previamente definida a las imágenes correspondientes en los puntos de muestreo, incorporando bandas que representan el contenido de los bits. Posteriormente, se selecciona la banda Cloud_Mask y se establece el criterio 1, correspondiente a cielo claro. Este proceso identifica los píxeles que cumplen con el criterio, los cuales son extraídos y recortados por el área geometry, devolviendo la máscara a las imágenes filtradas.

Función para crear gráfico de AOD y QA

Para la descarga de datos de AOD, se desarrolló una función que permite representar los valores obtenidos mediante un gráfico de dispersión. En este proceso, se define la variable aodChart, donde se seleccionan las bandas "Optical_Depth_047" y "AOD_QA", las cuales recuperan los datos de un punto de muestreo específico. A continuación, se establecen las propiedades de visualización que tendrá la gráfica, Por último, la función es asignada a una variable para generar los gráficos a los nueve puntos de muestreo.

?

Fig. 14. Código para la descarga de datos de AOD.

Análisis estadístico de las series temporales

Para la aplicación de la regresión segmentada, el modelo ARIMA y la regresión lineal, fue necesario homogenizar los datos mediante el cálculo del promedio mensual de los valores de AOD. Este proceso permitió mantener la coherencia temporal con los datos de exportación de concentrado de cobre, cuya frecuencia de registro es mensual.

En cuanto a los datos de volúmenes exportados de concentrados de cobre, estos fueron extraídos del informe preliminar del año 2023 elaborado por la Autoridad Portuaria de Puerto Bolívar. Para los análisis estadísticos se utilizó la plataforma Google Colaboratory con las bibliotecas y funciones de la Tabla II.

TABLA II

Funciones y bibliotecas para el análisis estadístico

FUNCION BIBLIOTECA USO



Regresión segmentada ruptures Permite detectar puntos de cambio en series temporales y modelar segmentos con comportamientos distintos a lo largo del tiempo.

Modelo ARIMA statsmodels.tsa.arima.

model Permite estimar el comportamiento de una serie temporal a lo largo de un periodo.



Autocorrelación parcial (PACF) statsmodels.graphics.tsaplots Permite determinar la correlación entre la serie y sus retardos descontando los efectos intermedios y permite estimar el componente "p" del modelo ARIMA

Funciones de autocorrelación (ACF) Permite determinar la correlación entre la serie y sus retardos (lags) y permite estimar el componente "q" del modelo ARIMA

Prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF) statsmodels.tsa.stattools Se utilizó para evaluar la estacionariedad de la serie temporal mediante pruebas estadísticas y determinar el componente "d" del modelo ARIMA.

Regresión lineal scipy.stats y seaborn Para la representación gráfica de la regresión lineal y el cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman.

Extracción de datos de velocidad y dirección del viento

Para obtener la información de la velocidad y dirección del viento a utilizar para el área de estudio, se realizó el siguiente procedimiento:

Definir la estación meteorología para la recolección de datos

De acuerdo con los anuarios meteorológicos del INAMHI, la estación Granja Santa Inés (UTM) es la más próxima al área de estudio. Por lo tanto, es el más idóneo para estimar la velocidad y dirección del viento en el Puerto Bolívar. La estación es de tipo Agrometeorológica por lo que sus datos tienen un fin de garantizar el rendimiento en los cultivos, sin embargo, los datos que recopila pueden utilizarse para otros fines. A continuación, en la Tabla III se presenta más información sobre la estación meteorológica Granja Santa Inés (UTM).

TABLA III

INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA GRANJA SANTA INES (UTM).

CODIGO	NOMBRE DE ESTACION	TIPO	COORDENADAS	ALTITUD	PROVINCIA
M0292	GRANJA STA. INES(UTM)	AP	3 17 28.5 S 79 54 55.5 W	5	El Oro

Extracción de Datos de velocidad y dirección del viento.

Para definir la velocidad y dirección del viento que puede existir en el área de estudio se recopiló la información por medio de los anuarios meteorológicos del INAMHI para los 10 últimos años de registro (2004 - 2013). Los datos mensuales fueron organizados de acuerdo con sus respectivas direcciones y posteriormente agrupados, como se presenta en la Tabla IV.

TABLA IV

Tabla utilizada para recopilar datos de velocidad y dirección del viento

Fecha	Velocidad	Dirección	Frecuencia
N			
NE			
E			
SE			
S			
SO			
O			
NO			

Elaboración de la rosa de vientos

Para la representación de la rosa de los vientos se utilizó la plataforma Colaboratory, mediante la implementación de la biblioteca windrose, la cual permite visualizar la frecuencia y dirección del viento. Esta herramienta resulta particularmente útil en contextos meteorológicos y en estudios relacionados con el transporte atmosférico de contaminantes.

VII. RESULTADOS

Análisis de datos de AOD del producto MCD19A2 de MODIS

Para mejorar la representatividad de los aerosoles durante el período 2014–2024, se implementó un riguroso filtrado de las imágenes satelitales utilizando la banda AOD_QA. En la plataforma GEE se procedió el filtrado en tres momentos. Primero, se seleccionaron únicamente las escenas del producto MCD19A2 de MODIS que cubrían las áreas de muestreo; a continuación, se filtraron para conservar solo aquellas con datos válidos de AOD; y, finalmente, se aplicó el criterio "claro" de la máscara de nubes (bits 0–2 de AOD_QA) para eliminar píxeles nublados. Tras este procesamiento, los valores de AOD resultantes se exportaron en formato Excel.

Para evaluar la posible influencia de las exportaciones de concentrado de cobre sobre la calidad del aire, se enfocó el análisis en el cuadrante CENTRO (área de almacenamiento) y en sus ocho direcciones adyacentes. Dado que el producto MCD19A2 tiene una resolución espacial de 1 km, cada área de muestreo se definió con la misma dimensión.

Después del filtrado, el número de observaciones de AOD por área osciló entre 276 y 845 datos a lo largo de los 11 años estudiados. El cuadrante NORTE no aportó datos hasta 2022 en comprendiendo 276 datos de AOD para el periodo 2022 - 2024, mientras que SUROESTE y NOROESTE registraron solo 493 y 352 observaciones, respectivamente, siendo las tres áreas con menor cantidad de datos. No obstante, las demás áreas presentaron entre 656 y 845 observaciones. Para homogeneizar la serie temporal, se promedió el número de datos a nivel mensual, obteniéndose 120 valores de AOD por área, salvo en el cuadrante Norte, que dispuso de únicamente 36 datos mensuales.

Como se observa en la Fig. 15, no se evidencia un cambio claro en la tendencia del AOD en las nueve áreas de muestreo. No obstante, se identifican incrementos en los valores hacia finales de año, siendo particularmente acentuados en 2021, donde todas las áreas registran picos elevados. De manera similar, los años 2019 y 2022 presentan aumentos significativos

en los niveles de AOD, aunque no de forma homogénea en todas las zonas. Estos incrementos tienden a estabilizarse rápidamente al inicio del año siguiente.

?

Fig. 15. Comportamiento del AOD en las 9 áreas de muestreo respecto al centro en la sección E)

Serie temporal depurada de AOD (QA aplicado)

Tras la aplicación de filtros de calidad (QA) para la eliminación de píxeles no válidos, se procede a graficar la serie temporal del punto de muestreo central, dado que este corresponde al área de almacenamiento de concentrado de cobre. Como se observa en la fig. 16, la serie temporal del AOD, presenta un comportamiento relativamente estable durante los primeros ocho años del periodo analizado, con valores que oscilan entre 0.2 y 0.5. Sin embargo, los últimos dos años, se registran picos que superan los 0.6 y descensos por debajo de 0.2. Estos cambios no reflejan una tendencia sostenida, sino variaciones transitorias, que se analizará más adelante con la regresión segmentada y el modelo ARIMA.

?

Fig. 16 Serie temporal de AOD del punto de muestreo central del área de estudio

Cambios en la tendencia del material particulado a partir de AOD a través de un análisis multitemporal

Regresión segmentada

Para determinar un posible aumento en los niveles de material particulado se analizó la serie temporal de AOD mediante una regresión segmentada, considerando el periodo entre 2014, año de inicio del monitoreo, y 2023, como se muestra en la figura N° 5, durante estos diez años el comportamiento del AOD no evidencia una segmentación marcada, lo que se refleja en la continuidad del fondo azul del gráfico.



Esto indica que no existe puntos de quiebre o variabilidad significativa a lo largo de la serie temporal.

?

Fig. 17. Regresión segmentada de AOD

Media móvil integrado autorregresiva (ARIMA

)

El modelo ARIMA es una herramienta útil para modelar y predecir el comportamiento de series temporales. Su aplicación requiere la identificación de tres componentes clave: el orden autorregresivo (p), el grado de estacionariedad (d), y el orden de la media móvil (q). Para determinar estos parámetros, se utilizan métodos como la función de autocorrelación parcial (PACF), la prueba de raíz unitaria de Dickey-Fuller aumentada (ADF) y la función de autocorrelación total (ACF), los cuales permiten establecer el tipo de modelo idóneo para predecir el comportamiento del AOD.

Para evaluar la relación directa entre la variable en el tiempo actual y sus rezagos, eliminando el efecto de los rezagos intermedios se utilizó la función de autocorrelación parcial (PACF).

El resultado obtenido indica que no existe una autocorrelación entre una observación y su lag, lo que indicaría que no existe un AR por lo tanto el componente p es de 0, como se muestra en la Fig. 18.

?

Fig. 18. Función de autocorrelación parcial (PACF) de AOD.

Para verificar la estacionariedad de la serie temporal, se aplicó la prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF). Esta prueba permite determinar la presencia de una raíz unitaria, lo cual indicaría que la serie no es estacionaria. Los resultados obtenidos muestran que el estadístico ADF es significativamente menor que los valores críticos como se muestra en la Tabla V. Además, dado que el valor d es inferior a 0.05, se rechaza la hipótesis nula de no estacionariedad, concluyéndose que la serie es estacionaria por lo tanto el componente d es de 0.

TABLA V

Prueba ADF y valores críticos de la prueba ADF

Prueba ADF Valores críticos AOF

Estadístico ADF: -9.1393 1% -3.4865

p-valor: 0.0000 5% -2.8862

10% -2.5799

Para identificar la presencia de correlaciones significativas entre los rezagos de la serie temporal se analizó la función de autocorrelación total (ACF), el cual permite observar el comportamiento de los picos de autocorrelación a distintos rezagos. Los resultados obtenidos muestran que no existe una autocorrelación entre una observación y sus lags, lo que indicaría que no existe un MA por lo tanto el componente q es de 0, como se muestra en el Fig. 19.

?

Fig. 19. Función de autocorrelación total (ACF) de AOD

No obstante, el análisis del coeficiente de covarianza, calculado mediante el producto externo de gradientes en el software EViews 12, indica que los términos de constante (C) y autorregresivo (AR) presentan una significancia estadística adecuada, como se evidencia en la Tabla VI. En consecuencia, se sugiere la aplicación de un modelo ARIMA (1,0,0), dado que la serie ya ha sido confirmada como estacionaria y la inclusión de un componente de media móvil (MA) podría introducir distorsiones en el ajuste del modelo.

TABLA VI

Resultado del análisis del coeficiente de covarianza.



Variable Coefficient Std. Error t-Statistic Prob.

C 0.338304 0.010566 32.01923 0.0000

AR (1) 0.162947 0.078358 2.079535 0.0398

SIGMASQ 0.007111 0.000727 9.782042 0.0000

Por temas prácticos se seleccionó el modelo ARIMA (1,0,0) para la predicción del comportamiento del AOD en el área de almacenamiento de concentrado de cobre, en donde no se observa un incremento significativo en los niveles de AOD durante la mayor parte del período analizado. Sin embargo, se identifica un aumento no significativo en las concentraciones de AOD entre los años 2020 y 2022, en comparación con los valores esperados según la predicción del modelo ARIMA. Posteriormente, los niveles de AOD regresan a sus valores normales, lo que sugiere una anomalía transitoria sin una tendencia sostenida como se representa en el Fig.20.

?

Fig. 20. Modelo ARIMA (1,0,0) sobre AOD mensual

Regresión lineal

El análisis de regresión lineal entre las exportaciones de concentrado de cobre y la profundidad óptica de aerosoles (AOD) arrojó una pendiente prácticamente nula, lo que indica la ausencia de correlación estadística significativa como se observa en la Fig. 21. Este resultado es coherente con los hallazgos obtenidos a partir de la regresión segmentada y el modelo ARIMA aplicado a la serie temporal de AOD. Aunque los valores de AOD presentan una gran dispersión respecto a las toneladas de concentrado de cobre exportado durante los periodos de exportación, dicha variabilidad obedece principalmente a un comportamiento estacional de los aerosoles y no a un incremento atribuible a la actividad portuaria.

Este hallazgo se refuerza al considerar el coeficiente de correlación de Pearson, cuyo valor de -0.010 evidencia la inexistencia de una relación lineal significativa entre las exportaciones de concentrado de cobre y el AOD. Además, la prueba de hipótesis asociada arrojó un valor p de 0.9155 (p > 0.05), lo que impide rechazar la hipótesis nula de no correlación. En conjunto, estos resultados estadísticos confirman que la regresión lineal descarta cualquier vínculo directo entre la actividad portuaria y los niveles de aerosoles.

Fig. 21. Regresión lineal entre Exportación de cobre y AOD.
Correlación y significancia (Pearson)
De manera similar, el coeficiente de correlación de Spearman, utilizado para evaluar relaciones monótonas en series temporales, fue de -0.096 , lo que también indica una correlación prácticamente nula. Esta interpretación es consistente con el valor p obtenido (0.2985), que respalda la inexistencia de una relación monótona entre las variables analizadas representadas en la Tabla VII.

TABLA VII
Matriz de correlación y significancia (Pearson).
AOD Exportación Significancia N
AOD 1 -0.010 1 P=0.9155 120
Exportación -0.010 1 P=0.9155 120
Rosa de los vientos

Para estimar la posible pluma de contaminación generada por emisiones de material particulado en el área de estudio, se analizó la dirección y velocidad del viento de acuerdo a la estación mas próxima, siendo este la estación Granja Santa Ines. Permitiendo conocer que la tendencia que presentan el viento es en la dirección norte, con ligera influencia hacia el noreste y este. No obstante, la velocidad del viento predominante en la zona oscila entre 1 y 3.8 m/s, tal como se muestra en la Fig. 22. Esta velocidad resulta insuficiente para transportar el material particulado a largas distancias, lo cual sugiere que su impacto estaría principalmente restringido al entorno inmediato del puerto.

Fig. 22. Rosa de vientos ponderada por frecuencias

VIII. DISCUSION

El análisis estadístico de la serie temporal del AOD se la realizó con diferentes modelos, siendo el primero la regresión segmentada, que permite identificar cambios de tendencia través del tiempo. El análisis de la regresión segmentada indica que no existe un punto de quiebre y por lo tanto señala una continuidad sin cambios de tendencia significativos. Cuando no se detecta cambio significativo se asume que la relación entre las variables permanece constante a lo largo del tiempo analizado [61]. La estabilidad relativa de los datos de AOD puede atribuirse a la constancia de las condiciones normales atmosféricas, en contraste, si bien no ocurre cambios abruptos, si existen variaciones considerables para los cuales se implementa otro enfoque como el modelo ARIMA.

La modelación con el método ARIMA se empleó para analizar la variación mensual de datos, evidenciando características de estacionariedad, ya que no se identificaron patrones de autocorrelación en la serie temporal. Esto sugiere que las fluctuaciones observadas entre los valores no responden a un patrón sistemático, sino que corresponden a variaciones estacionales independientes. En concordancia con el estudio realizado por [62] que empleó el modelo ARIMA, el autor lo utilizó para predecir datos futuros de evapotranspiración y modelar variables necesarias para el estudio. Con esto, demostrando su utilidad, tanto como para pronosticar variables de interés,



caracterizar datos temporales y comprender la distribución de esos datos a lo largo de una serie temporal.

El análisis para la regresión lineal no mostró una relación estadísticamente significativa entre las exportaciones de cobre y AOD así que impide rechazar la hipótesis nula de no correlación con la pendiente casi nula, la correlación de Pearson ($r = -0.010$) y el valor de $p = 0.9155$ ($p > 0.05$). Estos resultados se ajustan a lo que señala [63] ya que el aumento o disminución del AOD se influencia más por factores meteorológicos como la altura de la capa límite, la temperatura, etc., más no a la presencia de los concentrados de cobre. En la evaluación de la dinámica atmosférica con la rosa de vientos, se identifica la orientación a la que se podrían dirigir los contaminantes, esta marca una influencia predominante hacia el norte, ligeramente hacia el noreste y este, con velocidades de hasta 3.8 m/s. Estos resultados determinan una dispersión limitada de los aerosoles, restringiendo su impacto a zonas próximas del puerto. El análisis coincide con el estudio de [54] en el que destaca que regiones con circulación de aire local débil dificultan su transporte, por lo tanto, que las partículas se intensifican en la fuente fija emisora del contaminante.

La detección de cambios en el comportamiento de la profundidad óptica de aerosoles resulta una técnica útil para obtener datos de la calidad ambiental, especialmente en regiones donde no existen sistemas de monitoreo in situ. En el presente estudio, se utilizó el producto satelital MCD19A2 que detecta la profundidad óptica de aerosol en una resolución espacial de 1 km. En comparación, otros productos como el MOD04_3k que utiliza el algoritmo de aerosoles Dark Target (DT) con una resolución espacial de 3 km [64]. El producto MCD19A2, al integrar observaciones de los sensores Terra y Aqua, permite un control más refinado de la calidad de los datos, optimizando la estimación de la AOD en áreas con escaso monitoreo terrestre.

En el estudio de [64] realizado en Shandong en China se utilizó el producto MOD04_3k en el que presenta ciertas limitaciones, especialmente en las áreas con superficies brillantes o presencia frecuente de nubosidad, lo que genera errores en la detección precisa de aerosoles. Por consiguiente, el estudio reporta una marcada variabilidad estacional, con una mayor concentración de aerosoles en primavera y verano, y una disminución significativa en otoño e invierno. En contraste, en Ecuador no se observa esta variabilidad estacional pronunciada. A pesar de contar con una estación invernal, las condiciones climáticas no afectan la detección de aerosoles.

Para la estimación del material particulado PM2.5 a partir de la profundidad óptica de aerosoles (AOD) en el estudio realizado por [65] señala varias metodologías como los modelos de regresión estadística, la regresión lineal múltiple [66], el modelo de regresión ponderada geográficamente (GWR), la regresión de ponderación espaciotemporal geográfica y el modelo lineal de efectos mixtos. Siendo eficaces para estimar la cantidad de material particulado en el ambiente, sin embargo, el autor señala que presentan limitaciones importantes, especialmente al abordar la influencia de factores meteorológicos y características superficiales sobre la distribución del PM2.5. De este modo, presenta un método que soluciona estas dificultades a través del aprendizaje automático (machine learning).

El método empleado por [65] requiere una densa red de monitoreo para su calibración y validación, el autor se apoya en una red de 775 estaciones de medición de PM2.5. Esto podría limitar su aplicabilidad en regiones con escasa infraestructura de monitoreo. A pesar de ello, este método podría verse limitado en otras regiones del mundo que no tengan una robusta red de monitoreo. Sin embargo, el estudio deja como proxy válido el AOD para estimar el material particulado y siempre dependiendo de variables atmosféricas y geomorfológicas que pueden alterar esta correlación.

Como se señalaba anteriormente, el AOD es un proxy válido para tener un registro de la carga de aerosoles y la estimación posterior del PM2.5, ya que el AOD sirve para representar la presencia de aerosoles en la atmósfera, y con ello se puede correlacionar con las concentraciones de las partículas en suspensión. Para mejorar esta relación es necesario ajustar el AOD con factores meteorológicos como la humedad relativa, temperatura y la presión atmosférica [67]. De este modo, el AOD se caracteriza por considerarse como una herramienta estratégica para el análisis multitemporal y espacial en países en vía de desarrollo, siempre y cuando se tome en cuenta las limitaciones que conlleva y se utilice productos satelitales que puedan validarse y se ajuste con un buen filtro.

En el presente estudio se enmarca la relevancia del comportamiento espacio-temporal del aerosol a partir de datos satelitales, sin embargo, también señala que se ve restringido por no disponer datos in situ de Pm2.5.



Esta falta de monitoreo en campo presenta limitaciones ya que impide validar y estimar valores reales del Pm2.5.

A pesar de la rigurosidad de la depuración de los datos satelitales, realmente no se puede expresar con objetividad sobre las estimaciones de este aerosol y con el análisis de la serie temporal se reduce a un plano cualitativo más no cuantitativo, de esta forma no pudiendo señalar numéricamente la dimensión del impacto. El riguroso filtrado del AOD para recopilar los datos mediante Google Earth Engine demuestra la minuciosidad en la selección de la información a analizar. Permitiendo recopilar el AOD sin ninguna alteración externa como la presencia de nubes que elevaría los niveles de AOD. Permitiendo tener una base de datos sólidos para que el análisis multitemporal sea más confiable y refuerce su validez en los resultados obtenidos para relacionarlos con la exportación de cobre y determinar su influencia. El PM 2.5 es un contaminante perjudicial para el medio ambiente por su naturaleza higroscópica ya que este aerosol en altas condiciones de humedad absorbe el vapor de agua, incrementando su tamaño e interfiriendo en la recopilación de datos la Profundidad óptica de aerosoles desde satélites. Entonces, al momento de querer obtener datos de AOD los valores pueden estar sobreestimados sin necesidad de que haya un incremento en la cantidad de sus partículas [68]. Este fenómeno se traduce en la reducción de la visibilidad del área urbana o zona de interés que se quiere muestrear, especialmente cuando la humedad relativa supera el 60-80% [69]. Por otro lado, en temporadas secas, el PM2.5 se dispersa con más facilidad por presentar un clima seco, esto prolonga el tiempo en el que se mantiene en suspensión y se transporta con

más facilidad hacia otras zonas distantes. Con este clima, no ocurre el efecto llamado “wet deposition” o la deposición de los aerosoles por efecto de la lluvia incrementando las concentraciones de PM2.5 [70]. Esto se evidencia en distintas regiones secas donde existen aumentos entre 2% y 15% en concentraciones de sulfatos y polvo fino [70]. En el caso del presente estudio el punto de muestreo analizado puede estar influenciado por esta característica de la estación seca y su dinámica con este contaminante, principalmente en los picos altos que presenta los meses finales de los años muestreados, específicamente de mayo a diciembre.

Otras variables meteorológicas también influyen en la concentración de PM2.5 tales como la velocidad y dirección del viento o la temperatura. Por ejemplo, las capas térmicas no permiten que el contaminante ascienda y se disperse, manteniendo el aerosol al nivel del suelo, mientras que con vientos fuertes favorecen a la dispersión de estos. Los aerosoles en altos niveles de humedad favorecen a reacciones fotoquímicas para la conducción hacia nuevos aerosoles secundarios, incrementando fuertemente la carga de PM 2.5 [68].

IX. CONCLUSIONES



El comportamiento del material particulado en zonas portuarias está determinado por la interacción de factores atmosféricos, geográficos y antrópicos, lo que impide atribuirlo de manera exclusiva a las actividades de exportación de concentrado de cobre.

Esta complejidad resalta la necesidad de fortalecer la investigación científica para desentrañar las contribuciones relativas de cada factor y su incidencia en la calidad del aire. En el presente estudio se analizó la influencia de las exportaciones de concentrado de cobre sobre la concentración de aerosoles, utilizando datos satelitales de AOD del producto MCD19A2 de MODIS como sustituto de las mediciones in situ, ausentes en la zona de Puerto Bolívar. La depuración rigurosa de los datos en los cuadrantes, mediante filtrado de nubes con la banda AOD_QA, garantizó una serie de datos confiable para el periodo 2014–2024.

La aplicación de la prueba ADF muestra un estadístico de -9,1393 y un p de 0,000 confirmó la estacionariedad de las series temporales de AOD, sin evidencia de una tendencia ascendente o descendente clara. Estos resultados se reforzaron mediante la regresión segmentada y el modelo ARIMA, que no identificaron rupturas significativas ni cambios de régimen en los nueve cuadrantes estudiados. Asimismo, la regresión lineal entre los volúmenes exportados y el AOD arrojó un coeficiente de Pearson de -0,010, indicando ausencia de correlación estadísticamente significativa.

En ausencia de estaciones de monitoreo atmosférico in situ, la teledetección demostró ser una herramienta complementaria válida para evaluar la calidad del aire, especialmente en regiones con recursos limitados. La integración futura de datos satelitales y mediciones de campo permitirá modelar con mayor precisión la distribución del material particulado y diseñar estrategias de monitoreo ambiental más eficientes.

X. RECOMENDACIONES

Dentro de los hallazgos obtenidos, no se determina una relación directa entre las exportaciones de concentrado de cobre y los niveles de AOD, para mejorar la exactitud de lo expuesto se requiere calibrar las estimaciones satelitales con mediciones in situ. Para ello, resulta imprescindible instalar estaciones de monitoreo de PM2.5 y PM10 en Puerto Bolívar, de manera que los registros de concentración de material particulado puedan cotejarse periódicamente con los valores de AOD derivados de MODIS. Este trabajo de validación permitirá confirmar la variabilidad estacional de los aerosoles y ajustar los algoritmos de procesamiento remoto para reflejar con mayor fidelidad las condiciones reales del aire.

Así mismo, aunque los modelos estadísticos aplicados (ARIMA, regresión lineal y segmentada) han sido útiles para caracterizar la dinámica del material particulado, su precisión podría incrementarse incorporando variables climáticas clave. La inclusión de series de precipitación, temperatura y humedad relativa en los análisis multivariantes ayudaría a explicar de forma más robusta las fluctuaciones estacionales propias de la región costera y a diferenciar mejor los efectos meteorológicos de aquellos atribuibles a fuentes antropogénicas.

Por último, si bien el producto MCD19A2 de MODIS ofrece una resolución de 1 km² adecuada para estudios de escala regional pero no resulta suficiente para identificar con detalle las zonas urbanas de mayor concentración de partículas. En consecuencia, se recomienda integrar otros productos satelitales y emplear técnicas de machine learning tales como redes neuronales, random forests o XGBoost que combinen datos in situ y de diferentes sensores. Este enfoque mixto permitirá generar mapas de contaminación de alta resolución y comprender con mayor profundidad la dinámica espacial del material particulado en entornos portuarios y urbanos.

XI. BIBLIOGRAFÍA

[1]M. A. Aman, M. S. Salman, and A. P. Yunus, “COVID-19 and its impact on environment: Improved pollution levels during the lockdown period – A case from Ahmedabad, India,” Remote Sens Appl, vol.



20, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.rsase.2020.100382.

[2]A. Chudnovsky, C. Tang, A. Lyapustin, Y. Wang, J. Schwartz, and P. Koutrakis, “A critical assessment of high-resolution aerosol optical depth retrievals for fine particulate matter predictions,” Atmos Chem Phys, vol. 13, no.



21, pp. 10907–10917, 2013, doi: 10.5194/acp-13-10907-2013.



[3]ONU, “Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible,” 17 objetivos para transformar nuestro mundo. Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>

[4]C. Villacres Rojas and I. Fierro Ulloa, “Diagnóstico de la cadena logística de exportación del banano ecuatoriano hacia estados unidos de américa,” Saber, Ciencia y Libertad, vol. 9, no. 1, pp. 77–90, Jan. 2014,



doi: 10.18041/2382-3240/SABER.2014V9N1.1985.

[5]G. G. Fogelbach et al. , “Contaminación

4 zona ignorada

atmosférica en América Latina: impacto en la salud Y regulación actual - reporte del grupo del Comité de Aerobiología de la Sociedad Latinoamericana de Asma, Alergia e Inmunología,” Archivos de Asmas Alergia e Imunologia, vol. 4, no. 4, pp. 423–434, 2020,



doi: 10.5935/2526-5393.20200064.

[6]D. C. Husaini, K. Reneau, and D. Balam, “Air

5 zona ignorada

pollution and public health in Latin America and the Caribbean (LAC): a systematic review with meta-analysis,” Beni Suef Univ J Basic Appl Sci, vol. 11, no. 1, p. 122, Sep. 2022, doi: 10.1186/s43088-022-00305-0.

[7]D. Toscano, “The Impact of Shipping on Air Quality in the Port Cities of the Mediterranean Area: A Review,” Atmosphere (Basel), vol. 14, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/atmos14071180.

[8]KUNAK TECHNOLOGIES SL, “

Control de la calidad del aire en los puertos, un factor que mejora la gestión y la imagen,”
Control de la calidad del aire en los puertos, un factor que mejora la gestión y la
imagen. Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://kunakair.com/es/calidad-aire-puertos-maritimos/>
[9]A. Lyapustin, “MODIS

7

zona ignorada

Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correct (MAIAC) Data User’s Guide Collection
6.1,”



Nov. 2022.
[10]
“Población y Demografía |.”
Accessed: Jan. 30, 2025. [Online].
Available: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>
[11]M. Gager, T. Bartmann, M. Pinterits, and B. Ullrich, “European

8

www.eea.europa.eu
<https://www.eea.europa.eu/publications/european-union-emissions-inventory-report/download>

Union emission inventory report 1990-2019

9

zona ignorada

under the UNECE Convention on
Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention),”
Publications Office of the European Union,



2021. doi: 10.2800/701303.
[12]D. Aguirre and F. Villa, “INFORME N146-2011 OEDA-DE,” Llo, May 2011. Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available:
<https://repositorio.oefa.gob.pe/handle/20.500.12788/937>
[13]Y. Zhang et al., “Association between PM10 and specific circulatory system diseases in China,” Sci Rep, vol. 11, no. 1, p.



12129, Jun. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-91637-x.
[14]G. Morantes, G. Rincon, A. Chanaba, and B. Jones,
“Addressing

10

zona ignorada

air quality challenges: Comparative analysis of Barcelona, Venezuela, and Guayaquil,
Ecuador,”
Heliyon, vol. 10, no. 8, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29211.
[15]M. Neira,
“Ambient

11

zona ignorada

air pollution:
A global assessment of exposure and burden of
disease,” World Health Organization, May 2016. Accessed: Jan. 31, 2025. [Online]. Available: [https://www-who-int.translate.goog/publications/i/item/9789241511353?](https://www-who-int.translate.goog/publications/i/item/9789241511353?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)
[_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc](https://www-who-int.translate.goog/publications/i/item/9789241511353?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc)
[16]M. Kampa and E. Castanas, “Human health effects of air pollution,” Environmental Pollution, vol. 151, no. 2, pp. 362–367, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.envpol.2007.06.012.
[17]K.



Jara and

12

novasinergia.unach.edu.ec
<https://novasinergia.unach.edu.ec/index.php/novasinergia/article/download/600/447/4218>

M. Lojan,

13

zona ignorada

“Estudio
de la contaminación del aire ambiente por material particulado sedimentable en el casco urbano de la ciudad de Machala provincia de El

14

zona ignorada

Oro,”
UCuenca, Cuenca, 2023. Accessed: Jan. 31, 2025. [Online]. Available:
<http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/40969>



[18]B. Álvarez, À. Boso, and A. Vallejos-Romero, "Air pollution, well-being, and quality of life in Latin America: a systematic review," Rev Iberoam Estud Desarro, vol. 12, no. 2, pp. 236–260, Nov.



2023, doi: 10.26754/ojs_ried/ijds.846.
[19]G. Rincon, G. Morantes, H. Roa-López, M. del P. Cornejo-Rodriguez, B. Jones, and L. V. Cremades, "Spatio-temporal

15

zona ignorada

statistical analysis of PM1 and PM2.5 concentrations and their key influencing factors at Guayaquil city, Ecuador," Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, vol. 37, no. 3, pp. 1093–1117,



Mar. 2023, doi: 10.1007/s00477-022-02310-2.
[20]D. Chuquer, S. Ampudia, P. Carolina, L. Bustamante, C. Reina, and F. Ramírez, "Contaminación del aire a filo de calle Espejo en Quito,"



Perfiles, vol. 2, pp. 90–99, Oct. 2018, doi: 10.47187/perf.v2i20.38.
[21]Autoridad portuaria de Puerto Bolívar, "INFORME PRELIMINAR DE RENDICIÓN DE CUENTAS 2023," Puerto Bolivar, 2023. Accessed: Jan. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.puertobolivar.gob.ec/rendicion-de-cuentas-2023/>
[22]M. Sorek-Hamer et al., "A

16

zona ignorada

Deep Learning Approach for Meter-Scale Air Quality Estimation in Urban Environments Using Very High-Spatial-Resolution Satellite Imagery," Atmosphere (Basel), vol. 13,



no. 5, May 2022, doi: 10.3390/atmos13050696.
[23]S. M. Agudelo-Londoño, L. C. Blanco-Becerra, M. R. Hernández, Z. B. Suárez-Morales, L. C. Mantilla-León, and N.



Solís, "Injusticia ambiental en la calidad del aire para repartidores de plataformas digitales de Bogotá, Colombia, 2021," Biomedica, vol. 44, no. 3, pp. 391–401, Aug. 2024, doi: 10.7705/biomedica.7162.
[24]D. Booker, G. Walker, P. J. Young, and A. Porroche-Escudero, "A critical air quality science perspective on citizen science in action," Local Environ, vol. 28, no.



1, pp. 31–46, 2023, doi: 10.1080/13549839.2022.2118700.
[25]M. E. Emetero and M. O. Ahiara, "Air pollution Estimation Over Ponta," IOP Conf Ser Earth Environ Sci, vol. 331, no. 1, p. 012069, Sep.



2019, doi: 10.1088/1755-1315/331/1/012069.
[26]A. Tao, "Analysis of Factors Affecting Air Quality in ChongQing City Based on Grey Relational Theory," IOP Conf Ser Earth Environ Sci, vol. 233, no. 5, Feb. 2019, doi:



10.1088/1755-1315/233/5/052019.
[27]S. E. Vázquez Arceo, M. del P. Ramírez Rivera, S. Arceo Díaz, and J. J. Solís Enríquez, "Eliminación de la contaminación por el bosque urbano en Las Palmas, Colima, México,"



Madera y Bosques, vol. 29, no. 1, p. e2912460, Mar. 2023, doi: 10.21829/myb.2023.2912460.

[28]OMS, "Miles

17

zona ignorada

de millones de personas siguen respirando aire insalubre: nuevos datos de la OMS," Más de 6000 ciudades monitorean ya la calidad del aire. Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>
[29]F. D'Amico et al., "Integrated Surface and Tropospheric Column Analysis of Sulfur Dioxide Variability at the Lamezia Terme WMO/GAW Regional Station in Calabria, Southern Italy,"



Environments, vol. 12, no. 1, p. 27, Jan. 2025, doi: 10.3390/ENVIRONMENTS12010027/S1.
[30]C. I. Rivera-Cárdenas and T.

Arellano, "The

18

zona ignorada

Tula Industrial Area Field Experiment: Quantitative Measurements of Formaldehyde, Sulfur Dioxide, and Nitrogen Dioxide Emissions Using Mobile Differential Optical Absorption Spectroscopy Instruments," Pollutants, vol. 4, no. 4, pp.



463–473, Oct. 2024, doi: 10.3390/POLLUTANTS4040031.
[31]J. Seingeld and S. Pandis, ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS, 3rd, reimpressa ed. Hoboken: A Wiley-Interscience publication, 2016. Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: https://books.google.com.ec/books/about/Atmospheric_Chemistry_and_Physics.html?id=MfHbCwAAQBAJ&redir_esc=y
[32]T. Tan et al., "The Characteristics, Sources, and Health Risks of Volatile Organic Compounds in an Industrial Area of Nanjing," Toxics, vol. 12, no. 12, p.



868, Dec. 2024, doi: 10.3390/TOXICS12120868.
[33]H. Wang, C. He, R. L. Modini, W. Wang, H. Lu, and L. Morawska, "Mixing state of printer generated ultrafine particles: Implications for the complexity of indoor aerosols," Atmos Environ, vol. 259, Aug.



2021, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118550.
[34]F. Huang, W. Ma, S. Wang, C. Feng, X. Kong, and H. Liu, "Analysis and Validation

19

zona ignorada

of the Aerosol Optical Depth of MODIS Products in Gansu Province, Northwest China," Remote Sens (Basel), vol. 15, no. 12, Jun. 2023, doi: 10.3390/rs15122972.
[35]J. C. Morales Hernández, A. L. Montes López, O. F. Martinez, B. Cruz Romero, C. L. González Mercado, and F. M. Carrillo González, "Contaminación del aire en Puerto Vallarta, México,"



Bitácora Urbano Territorial, vol. 31, no. 2, pp. 27–43, Apr. 2021, doi: 10.15446/bitacora.v31n2.87800.
[36]L. Odendaal, H. Quek, C. Cuní-López, A. R. White, and R. Stewart, "The Role of Air Pollution and Olfactory Dysfunction in Alzheimer's Disease Pathogenesis,"



Biomedicines, vol. 13, no. 1, p. 246, Jan. 2025, doi: 10.3390/BIOMEDICINES13010246.

[37]A. Solé and A. Salzmann, "LA

20

zona ignorada

AGENDA 2030 Y LOS OBJETIVOS PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE. UNA MIRADA CRÍTICA SOBRE SU APORTACIÓN A LA GOBERNANZA GLOBAL EN TÉRMINOS DE JUSTICIA DISTRIBUTIVA Y SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL," Revista Española de Derecho Internacional,



vol. 69, pp. 279–285, 2017, Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/26181621>
[38]M. Elder and G. Ellis, "ASEAN countries' environmental policies for the Sustainable Development Goals (SDGs)," Environ Dev Sustain, vol. 25,



pp. 10975–10993, Jul. 2022, doi: 10.1007/s10668-022-02514-0.
[39]P. Nakhle, I. Stamos, P. Proietti, and A. Siragusa, "Environmental monitoring in European regions using the sustainable development goals (SDG) framework," Environmental and Sustainability Indicators,



vol. 21, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.indic.2023.100332.

[40]OPS, "Funciones esenciales de salud pública,"

21

zona ignorada

Las once funciones esenciales de la salud pública (FESP) para la Región las Américas: Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.paho.org/es/temas/funciones-esenciales-salud-publica>
[41]Z. Ning et al., "High altitude air pollution and respiratory disease: Evaluating compounded exposure events and interactions," Ecotoxicol Environ Saf, vol.



285, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.117046.
[42]G. M. Masters and W. P. Ela, Introducción a la ingeniería medioambiental, Tercera Edición. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A, 2008. [Online]. Available: www.pearsoneducacion.com [43]].
Lee, J. Jang, J. Im, and J. H. Lee, "GIS-Based

22

zona ignorada

Spatial Analysis and Strategic Placement of Fine Dust Alert Systems for Vulnerable Populations in Gangseo District," Applied Sciences (Switzerland), vol. 14, no. 22, Nov. 2024, doi:



10.3390/app142210610.
[44]K. S. Barros, V. S. Vielmo, B. G. Moreno,
G. Riveros, G. Cifuentes, and A. M. Bernardes, "Chemical

23

zona ignorada

Composition Data of the Main Stages of Copper Production from Sulfide Minerals in Chile: A Review to Assist Circular Economy Studies," Minerals, vol. 12, no. 2, Feb.



2022, doi: 10.3390/min12020250.
[45]N. Malhotra, T. R. Ger, B. Uapipatanakul, J. C. Huang, K.
H. C. Chen, and C. Der Hsiao, "Review of copper and copper nanoparticle toxicity in fish,"



Nanomaterials, vol. 10, no. 6, pp. 1–28, Jun. 2020, doi: 10.3390/nano10061126.
[46]M. E. Berendsen,
P. Hodza, and J. D. Hamerlinck, "Researching Student Interaction with GIS Software While Learning Spatial Concepts: Toward a Standard Measure of GIS Interaction," Journal of Geography, vol. 122, no. 4, pp. 81–92, 2023, doi: 10.1080/00221341.2023.2220328.
[47]A. X. Zhu, F. H. Zhao, P. Liang, and C. Z. Qin, "Next generation of GIS: must be easy," Ann GIS, vol. 27, no. 1, pp. 71–86, 2021, doi: 10.



1080/19475683.2020.1766563.
[48]J. C. Martínez-Llario, S. Baselga,
and E. Coll, "Accurate

24

zona ignorada

algorithms for spatial operations on the spheroid in a spatial database management system," Applied Sciences (Switzerland), vol. 11, no. 11, Jun. 2021, doi: 10.3390/app11115129.
[49]K. Lin, Y. Shi, and H. Xu, "Can Grassroots Governments' Environmental Attention Effectively Improve Air Pollution? Empirical Evidence from Satellite Remote Sensing Technology," Sustainability (Switzerland), vol. 15, no. 21, Nov. 2023, doi:



10.3390/su152115309.
[50]R. M. Navarro, P. González, Á. Varo, and A. Ariza, Geociencias aplicadas a la gestión forestal, Tercera edicion. Cordoba: Editorial Universidad de Córdoba, 2024.
[51]S. Ormeño, TELEDETECCION FUNDAMENTAL, Tercera edicion. SOV ortofotos y modelos, 2006.
[52]Y. Lin et al., "An optimized machine learning approach to water pollution variation monitoring with time-series Landsat images," International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 102, p. 102370, Oct. 2021,



doi: 10.1016/j.jag.2021.102370.
[53]J. A. Rodríguez Zas and J.
A. García Reynoso, "Updating of the 2013 national emissions inventory for air quality modeling in central Mexico,"



Revista Internacional de Contaminacion Ambiental, vol. 37, pp. 463–487, 2021, doi: 10.20937/RICA.53865.
[54]-Ing Romina and M. P.



Flores,
"Impacto

25

zona ignorada

de las emisiones de aerosoles sobre las precipitaciones de los Andes Centrales," 2019. Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/81222
[55]Brandon Maccherone, "MODIS Web." Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: https://modis.gsfc.nasa.gov/about/
[56]X. Yan et al., "New global aerosol fine-mode fraction data over land derived from MODIS satellite retrievals," Environmental Pollution, vol. 276, May 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116707.
[57]"Aqua Earth-Observing Satellite Mission | Aqua Project Science," Latest News from the Aqua Mission. Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available: https://aqua.nasa.gov/
[58]J. S. Reid et al., "A



26

zona ignorada

Coupled Evaluation of Operational MODIS and Model Aerosol Products for Maritime Environments Using Sun Photometry: Evaluation of the Fine and Coarse Mode,” Remote Sens (Basel), vol. 14, no. 13, p. 2978, Jun. 2022, doi:



10.3390/RS14132978.

[59]Earth Engine Data Catalog,

”MCD19A2.061:



27

zona ignorada

Terra & Aqua MAIAC Land Aerosol Optical Depth Daily 1km

| Earth Engine Data Catalog | Google for Developers.” Accessed: May 18, 2025. [Online]. Available: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MCD19A2_GRANULES?hl=es-419

[60]Z. Cao et al., “Evaluation



28

zona ignorada

and Comparison of Multi-Satellite Aerosol Optical Depth Products over East Asia

Ocean,” Toxics, vol. 11, no. 10, Oct. 2023, doi: 10.3390/toxics11100813.

[61]V. M. R. Muggeo, “Estimating regression models with unknown break-points,” Stat Med, vol. 22, no. 19, pp.



3055–3071, Oct. 2003, doi: 10.1002/sim.1545.

[62]M. Phesa, N.

Mbatha, and A. Ikudayisi, “MODIS Evapotranspiration Forecasting Using ARIMA and ANN Approach at a Water-Stressed Irrigation Scheme in South Africa,”



Hydrology, vol. 11, no. 10, p. 176, Oct. 2024, doi: 10.3390/HYDROLOGY11100176.

[63]M. Sorek-Hamer, R. Chatfield,

and Y. Liu, “Review: Strategies for using satellite-based products in modeling PM2.5 and short-term pollution episodes,” Environ Int, vol. 144, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106057.

[64]S. Meng et al., “Research on the Spatiotemporal Variation Characteristics of Different Aerosol Types and Aerosol Optical Depth Based on MODIS Data,” Aerosol Air Qual Res, vol. 24, no. 12, p. 240027, Dec. 2024, doi: 10.4209/AAQR.240027.

[65]Z. Tian, J. Wei, and Z. Li, “How Important Is Satellite-Retrieved Aerosol Optical Depth in Deriving Surface PM2.5 Using Machine Learning?,” Remote Sens (Basel), vol. 15, no. 15, p. 3780, Jul. 2023, doi: 10.3390/RS15153780.

[66]P. Gupta and S. A. Christopher, “Particulate



29

zona ignorada

matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression

approach,” Journal of Geophysical Research Atmospheres, vol. 114, no. 14, p. 14205, Jul.



2009, doi: 10.1029/2008JD011496.

[67]A. Van Donkelaar, R. V. Martin,

M. Brauer, and B. L. Boys, “Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter,” Environ Health Perspect, vol.



123, no. 2, pp. 135–143, 2015, doi: 10.1289/ehp.1408646.

[68]E. Zender-Świercz, B. Galiszewska, M. Telejko, and M. Starzomska,

“The effect of temperature and humidity of air on the concentration of particulate matter - PM2.5 and PM10,”



Atmos Res, vol. 312, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.atmosres.

2024.107733.

[69]X. Sun, T. Zhao, D. Liu, S. Gong, J. Xu, and X. Ma, “Quantifying



30

zona ignorada

the influences of PM2.5 and relative humidity on change of atmospheric visibility over recent winters in an urban area of East

China,” Atmosphere (Basel), vol. 11,



no. 5, May 2020, doi: 10.3390/ATMOS11050461.

[70]Y. Wang, Y. Xie, W. Dong,

Y. Ming, J. Wang, and L. Shen, “Adverse effects of increasing drought on air quality via natural processes,” Atmos Chem Phys, vol. 17, no.



20, pp. 12827–12843, Oct. 2017, doi: 10.5194/acp-17-12827-2017.

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, RAMIREZ BERMEO CARLOS DANIEL y GONZABAY GALARZA ALLAN EDUARDO, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado Monitoreo satelital de aerosoles mediante datos AOD de MODIS: Análisis de tendencias de calidad del aire asociadas a la exportación de concentrado de cobre en Puerto Bolívar, Ecuador., otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.



RAMIREZ BERMEO CARLOS DANIEL

0705780716



GONZABAY GALARZA ALLAN EDUARDO

0706414570

RESUMEN

La calidad del aire está fuertemente influenciada por factores climáticos y antrópicos, siendo fundamental regular el impacto de las actividades al aire. En este contexto, la presente investigación tuvo como objetivo evaluar la influencia de la exportación de concentrado de cobre en la calidad del aire en Puerto Bolívar. Se utilizaron datos del producto MCD19A2 de MODIS para recopilar el AOD en el período 2014–2024, así como información sobre las exportaciones de concentrado de cobre, obtenida del informe preliminar 2023, para determinar una correlación entre ambas variables. Además, se recopiló información sobre la velocidad y dirección del viento de la estación Granja Santa Inés para elaborar una rosa de vientos que permitiera identificar la dirección potencial de dispersión del material particulado. Los resultados obtenidos mediante la regresión segmentada y el modelo ARIMA indicaron que no existe un cambio de tendencia del AOD, dado que no se identificaron puntos de quiebre durante el período analizado. La prueba ADF arrojó un estadístico de -9.1393 y un valor p igual a 0, confirmando una estacionariedad del AOD. Por su parte, el análisis de regresión lineal entre las exportaciones de concentrado de cobre y el AOD reveló la ausencia de una correlación entre estas variables, respaldada por los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, que fueron de -0.010 y -0.096, respectivamente. Finalmente, la rosa de vientos mostró una tendencia de dispersión hacia el norte; sin embargo, la velocidad del viento predominante resultó insuficiente para transportar el material particulado a largas distancias.

Palabras clave: Calidad del aire, Puerto Bolívar, material particulado, aerosoles, teledetección, MCD19A2, AOD

ABSTRACT

Air quality is strongly influenced by climatic and anthropogenic factors and regulating the impact of outdoor activities is essential. In this context, this research aimed to evaluate the influence of copper concentrate exports on air quality in Puerto Bolívar. Data from the MODIS MCD19A2 product were used to compile the AOD for the period 2014–2024, as well as information on copper concentrate exports, obtained from the 2023 preliminary report, to determine a correlation between both variables. Additionally, information on wind speed and direction was collected from the Granja Santa Inés station to develop a wind rose to identify the potential dispersion direction of particulate matter. The results obtained using segmented regression and the ARIMA model indicated no change in the AOD trend, given that no break points were identified during the analyzed period. The ADF test yielded a statistic of -9.1393 and a p-value of 0, confirming stationarity of the AOD. Linear regression analysis between copper concentrate exports and AOD revealed an absence of correlation between these variables, supported by the Pearson and Spearman correlation coefficients, which were -0.010 and -0.096, respectively. Finally, the wind rose showed a northward dispersion trend; however, the prevailing wind speed was insufficient to transport the particulate matter over long distances.

Keywords: Air quality, Puerto Bolívar, particulate matter, aerosols, remote sensing, MCD19A2, AOD

TABLA DE CONTENIDO

I. INTRODUCCIÓN	9
II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	11
A. Antecedentes.....	12
III. JUSTIFICACIÓN.....	14
IV. OBJETIVOS.....	15
A. Objetivo general.....	15
B. Objetivos específicos	15
VI. MARCO TEÓRICO	16
A. Calidad del aire	16
B. <i>Contaminación atmosférica</i>	16
1) Óxidos de azufre (SO _x)	17
2) Óxidos de nitrógeno (NO _x)	18
3) Compuestos orgánicos volátiles (COV)	19
4) Aerosoles	20
5) Material particulado (PM)	21
C. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	21
D. <i>Salud pública</i>	22
1) Enfermedades respiratorias.....	22
E. Concentrados de cobre.....	23
F. Sistema de Información Geográfica (SIG)	24
1) Teledetección.....	24
2) Sensores ópticos	25
3) Imágenes satelitales	25
4) Modelos de calidad del aire (MCA)	25
5) Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS).....	26

6) Seguro de calidad de la Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD_QA).....	27
7) Profundidad óptica de los aerosoles (AOD).....	29
VI. METODOLOGIA	30
A. Delimitación del área de estudio	30
B. <i>Materiales y métodos</i>	30
1) Extracción de datos AOD en la zona puerto Bolívar.....	31
a) Definir la zona de estudio en Google Earth Engine	32
b) Cargar el producto MODIS	32
c) Filtrar imágenes con valores en geometría	33
d) Decodificación de bits de QA.....	33
e) Aplicar decodificación, máscara y recorte	33
f) Función para crear gráfico de AOD y QA.....	33
2) Análisis estadístico de las series temporales	34
3) Extracción de datos de velocidad y dirección del viento.....	35
a) Definir la estación meteorología para la recolección de datos	35
b) Extracción de Datos de velocidad y dirección del viento.....	36
c) Elaboración de la rosa de vientos	36
VII. RESULTADOS.....	37
A. Análisis de datos de AOD del producto MCD19A2 de MODIS.....	37
B. Serie temporal depurada de AOD (QA aplicado).....	38
C. Cambios en la tendencia del material particulado a partir de AOD a través de un análisis multitemporal	39
1) Regresión segmentada	39
2) Media móvil integrado autorregresiva (ARIMA).....	40
3) Regresión lineal	42
4) Correlación y significancia (Pearson).....	43

5) Rosa de los vientos	44
VIII. DISCUSION	45
IX. CONCLUSIONES	49
X. RECOMENDACIONES	50

CONTENIDO DE TABLAS

TABLA I DEFINICIÓN DE CONTROL DE CALIDAD DE AOD PARA MCD19A2 (ENTERO SIN SIGNO DE 16 BITS).....	28
TABLA II Funciones y bibliotecas para el análisis estadístico.....	35
TABLA III INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA GRANJA SANTA INES (UTM).	36
TABLA IV Tabla utilizada para recopilar datos de velocidad y dirección del viento	36
TABLA V Prueba ADF y valores críticos de la prueba ADF	41
TABLA VI Resultado del análisis del coeficiente de covarianza.	42
TABLA VII Matriz de correlación y significancia (Pearson).	44

CONTENIDO DE FIGURAS

Fig. 1. Ciclo atmosférico de los compuestos del azufre. [31].	17
Fig. 2. Ciclo atmosférico de los compuestos de nitrógeno. [31].	19
Fig. 3. Esquema idealizado de la distribución del área de superficie de partículas de un aerosol atmosférico. Los modos principales, las fuentes y la formación de partículas y los mecanismos de eliminación están indicados. [31].	20
Fig. 4. Características, fuentes y composición del material particulado. [36].	21
Fig. 5. Objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030. [3].	22
Fig. 6. Áreas donde se aloja el material particulado de 10 y 2,5 μm . [5].	23
Fig. 7. Potenciales fuentes, forma potencial de contaminación, medios potenciales a afectarse y las propiedades que influyen en la toxicidad del nano cobré en las franjas amarillo, azul, rosa y verde respectivamente. [45].	24
Fig. 8. Esquema conceptual de los modelos de calidad de aire. [54].	26
Fig. 9. Grupo de satélites denominados constelación de la tarde, o a veces el tren A [57].	26
Fig. 10. Mapa de ubicación geográfica del Puerto Bolívar.	30
Fig. 11. Mapa de ubicación de las áreas muestreadas.	31
Fig. 12. Diagrama de flujo de procesos realizados.	32
Fig. 13. Coordenadas de los puntos de muestreo.	32
Fig. 14. Código para la descarga de datos de AOD.	34
Fig. 15. Comportamiento del AOD en las 9 áreas de muestreo respecto al centro en la sección E).	38
Fig. 16 Serie temporal de AOD del punto de muestreo central del área de estudio	39
Fig. 17. Regresión segmentada de AOD	39
Fig. 18. función de autocorrelación parcial (PACF) de AOD.	40
Fig. 19. Función de autocorrelación total (ACF) de AOD	41
Fig. 20. Modelo ARIMA (1,0,0) sobre AOD mensual.	42
Fig. 21. Regresión lineal entre Exportación de cobre y AOD.	43
Fig. 22. Rosa de vientos ponderada por frecuencias	44

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

PM	Material Particulado
ODS	Objetivo de Desarrollo Sostenible
SIG	Sistema de Información geográfica
MCA	Modelos de calidad del aire
MODIS	Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada
AOD	Profundidad óptica de aerosoles
LAC	Latinoamérica y el Caribe

I. INTRODUCCIÓN

La calidad del aire es un indicador esencial para el bienestar ambiental y humano, debido a su relación directa con la salud pública y la biodiversidad. En áreas urbanas e industriales, los contaminantes de aerosoles como el material particulado (PM2.5 y PM10) abarcan un riesgo significativo para la salud humana, enfocándolo en zonas cercanas a actividades industriales y portuarias. Para ello, la utilización de tecnologías avanzadas como son las imágenes satelitales y modelos de calidad del aire, permiten un monitoreo más preciso de estas concentraciones, facilitando la implementación de estrategias para la correcta gestión ambiental ante este problema [1][2].

La buena gestión de la calidad del aire se encuentra vinculado con varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), como el Objetivo número 3, que es referente a la salud y bienestar de las personas, y el objetivo número 11, que busca ciudades sostenibles. Garantizar un aire limpio en entornos urbanos e industriales como Machala contribuye al cumplimiento de estas metas globales, mejorando la calidad de vida y reduciendo las desigualdades en salud derivadas de la contaminación atmosférica [3].

En Ecuador, la calidad del aire ha sido un tema de creciente preocupación, especialmente en ciudades costeras con alta actividad comercial e industrial. Estudios recientes muestran que los niveles de material particulado en regiones urbanas pueden exceder los límites establecidos por organismos internacionales, afectando de manera desproporcionada a comunidades vulnerables [4][5]. En el contexto regional, otros países de América Latina también enfrentan retos similares, destacándose la necesidad de fortalecer el monitoreo y regulación ambiental [6].

Machala, conocida como una de las principales ciudades costeras de Ecuador, cuenta con una infraestructura portuaria clave en Puerto Bolívar. Este puerto se especializa en la gestión de productos exportados como el banano, cuya exportación representa una parte significativa de la economía nacional. Sin embargo, la actividad portuaria también puede generar emisiones contaminantes relacionadas con el transporte marítimo y terrestre, así como el manejo de materiales industriales, incrementando la concentración de aerosoles en el área [4][7].

La gestión de concentrados de cobre en los puertos representa un desafío tanto logístico como ambiental, ya que este material, proveniente de actividades mineras, requiere de procesos con buenas técnicas de almacenamiento y transporte que permitan mitigar su dispersión en el aire. La exposición a

concentrados de cobre puede ser causante de la emisión de material particulado fino, afectando la calidad del aire y generando riesgos para las zonas urbanas cercanas al puerto y a las rutas de transporte [8].

La exposición prolongada a altos niveles de aerosoles, incluyendo PM2.5 y PM10, está asociada con un aumento en la incidencia de enfermedades respiratorias y cardiovasculares, como hipertensión y ataques al corazón, debido a su capacidad de inducir inflamación sistémica. En regiones portuarias como Machala, donde las actividades industriales y de transporte generan emisiones significativas, la población enfrenta un mayor riesgo de padecer estas enfermedades. Estudios realizados en ciudades con características similares han demostrado correlaciones claras entre la concentración de material particulado y la prevalencia de estas afecciones [2][5].

El monitoreo de material particulado en los años de estudio proviene del instrumento MODIS, en concreto el producto MCD19A2 el cual capta el espesor óptico de aerosoles en tierra por medio del algoritmo (MAIAC) con la colección 6.1 [9], la cual permite medir de forma cualitativa el comportamiento de las concentraciones de material particulado en el área de estudio.

La aplicación de mecanismos de teledetección para identificar contaminantes es una herramienta útil cuando no se poseen estaciones de monitoreo para medir los diferentes compuestos perjudiciales en el ambiente, por ello direccionar un estudio en relación con el comportamiento del material particulado en relación con las exportaciones de concentrados de cobre permitirá comprender la relación de sus operaciones y la calidad del aire.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La calidad del aire en el cantón Machala ha sido poco estudiada, a pesar de ser el cantón más poblado de la provincia de El Oro. Representa el 41% de la población en la provincia [10]. Esta falta de información sobre la calidad del aire impide conocer el grado de contaminantes presentes en el ambiente y sus efectos en la salud de las personas. Uno de estos contaminantes es el material particulado, que de acuerdo con la AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE (EEA) es uno de los cinco contaminantes atmosféricos más nocivos [11], en ello radica la importancia de cuantificar el grado de exposición.

Existen varias fuentes de material particulado que pueden incrementar las concentraciones en la ciudad de Machala, una de ellas se considera que viene del Puerto Bolívar durante el almacenamiento y exportación de concentrados de cobre. El concentrado de cobre está formado por partículas muy finas, el 26% del concentrado húmedo cuenta con un tamaño de hasta 47 μm , siendo el material más fino capaz de suspenderse en el aire con la fuerza del viento [7].

Un caso relacionado con la influencia del material particulado proveniente de la actividad de exportación de concentrado de cobre se da en la ciudad Ilo en Perú, donde se analizan las concentraciones de cobre en el material particulado de tamaño 10 μm , resultando en un rango de 0.04 a 0.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ [12]. Por lo tanto, se deduce que en Puerto Bolívar siendo también exportador de concentrado de cobre, los niveles de las concentraciones de material particulado aumenten debido a la manipulación del concentrado de cobre.

El aumento de la exposición en ambientes contaminados con material particulado está relacionado con un aumento de las hospitalizaciones [6], las enfermedades que pueden llegar a desarrollarse son la arritmia, hipertensión arterial, enfermedad cerebrovascular y cardiopatía isquémica [13]. De acuerdo con [6] estos efectos nocivos deben ser mitigados dentro de la región de América latina, debido que, si se reducen los niveles de contaminación, se podrá ver una reducción en los costos de salud pública.

En el Ecuador se realizan monitoreos de la calidad del aire, contando con ciudades como Quito, Guayaquil y Cuenca. Un estudio que lleva a cabo un análisis comparativo de Ecuador, Venezuela y Barcelona, en el cual recomienda que se cuente con registros de monitoreo continuo que permitan establecer concentraciones anuales de los contaminantes [14].

Por ello, es necesario evaluar la calidad del aire en la ciudad de Machala en relación con las concentraciones de material particulado, lo que permitirá identificar si existe una correlación entre el aumento en la exportación de concentrado de cobre y las concentraciones de material particulado.

A. Antecedentes

La calidad del aire es un tema de creciente interés debido a sus implicaciones para la salud pública y el medio ambiente. A nivel global, estudios han demostrado que el material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) está asociado con enfermedades respiratorias, cardiovasculares y neurológicas, además de contribuir al cambio climático y la degradación ambiental. Este contexto refuerza la importancia de implementar estrategias de monitoreo y mitigación para abordar los impactos de la contaminación atmosférica [15][16].

En América Latina, el crecimiento urbano e industrial ha incrementado las emisiones de contaminantes atmosféricos. En muchos países de la región, las normativas ambientales no se aplican de manera estricta, y la falta de infraestructura de monitoreo complica la evaluación de los niveles de contaminación. Por ejemplo, en Ecuador, la calidad del aire se encuentra influenciada por actividades industriales, tráfico vehicular y quema de biomasa, factores que han generado un aumento significativo de los aerosoles en áreas urbanas [17][18].

En ciudades como Quito y Guayaquil, se han realizado esfuerzos para evaluar la calidad del aire utilizando estaciones de monitoreo y herramientas de teledetección. La ciudad de Guayaquil posee estaciones de monitoreo en las cuales los niveles de material particulado generalmente cumplen la norma nacional; sin embargo, al comparar con el umbral que establece la OMS en el 2021 es superado por un 48% [19]. Por otro lado, investigaciones realizadas en Quito han identificado la necesidad de incorporar tecnologías de monitoreo más accesibles y adaptativas para ampliar la cobertura de datos y mejorar las políticas públicas [20].

La ciudad de Machala, ubicada en la provincia de El Oro, presenta una situación diferente. A pesar de ser una de las ciudades portuarias de importancia nacional, carece de infraestructura adecuada para monitorear la calidad del aire de manera constante. Históricamente, las exportaciones desde el Puerto Bolívar se han centrado en productos agrícolas y acuícolas como el banano y el camarón respectivamente. Tras el inicio de las exportaciones de concentrado de cobre por el Puerto Bolívar se han generado preocupaciones sobre su impacto ambiental, debido a que la manipulación de este mineral produce partículas finas que pueden ser suspendidas en el aire [21][17].

En Machala se ha demostrado que más del 50% del material particulado sedimentable recolectado en el casco urbano no cumple con las normativas nacionales, y solo el 7% se ajusta a las recomendaciones de la OMS, lo que evidencia una gestión ambiental insuficiente [17]. Este panorama destaca la necesidad de implementar herramientas alternativas para evaluar la calidad del aire, especialmente en áreas donde no existen estaciones de monitoreo tradicionales.

La teledetección se presenta como una solución viable para abordar estas limitaciones. Tecnologías como los instrumentos MODIS y Tropomi permiten analizar las concentraciones de aerosoles de manera espacial y temporal. En el caso de Machala, estas herramientas son fundamentales para identificar patrones de contaminación asociados a las actividades portuarias y para generar datos que respalden la formulación de políticas públicas orientadas a mitigar los impactos en la salud y el ambiente.

La utilización de la variable de Profundidad óptica de Aerosol (AOD) para el estudio, es de objeto fundamental para la determinación de la situación ambiental en Puerto Bolívar, ya que nos permite valorar la calidad del aire. El AOD que se deriva por satélite, en este caso de Aqua/Terra, demuestra una fuerte correlación con los niveles de contaminación del aire superficial, y esto a la vez convierte al AOD en una herramienta valiosa para monitorear la calidad del aire en área donde no exista una cobertura de estaciones terrestres, como pueden ser las estaciones fijas, sensores de detección de contaminantes y demás métodos para monitorear la calidad del aire.

III. JUSTIFICACIÓN

El monitoreo de la calidad del aire es un proceso técnico-científico continuo que permite conocer las concentraciones de gases y aerosoles que pueden causar efectos adversos en la salud de la población. Este monitoreo se realiza por medio de estaciones equipadas para cuantificar las concentraciones de material particulado. En el área de estudio, debido a que no se cuenta con este equipo ni con su infraestructura para la medición de gases, se recurre al uso de imágenes satelitales por medio de sensores para la identificación de estos contaminantes. Permitiendo de esta manera elaborar análisis multitemporales, lo que facilita comparar la situación previa al inicio de las actividades de exportación de concentrado de cobre.

El monitoreo de las concentraciones de aerosoles en la zona de estudio contribuye a mejorar la comprensión de la influencia de las exportaciones de concentrado de cobre con los niveles de material particulado. Para ello es necesario realizar investigaciones acerca de la calidad del aire de la ciudad y que las autoridades promuevan la instalación de redes de estaciones de monitoreo para la cuantificación de contaminantes como el material particulado, monóxidos de carbono, ozono troposférico, entre otros agentes contaminantes.

El estudio pretende proporcionar información sobre la calidad del aire que posee la ciudad Machala por medio del uso de imágenes satelitales. Por lo que, a través del producto MCD19A2 de MODIS en los satélites AQUA y TERRA, se obtuvo información para cuantificar las concentraciones de contaminantes en Puerto Bolívar de una manera integral y regional.

IV. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Evaluar la influencia de la exportación de concentrado de cobre en la calidad del aire en Puerto Bolívar durante el período 2014-2024, mediante el análisis de tendencias temporales obtenidas a través de sensores remotos con el fin de identificar posibles afectaciones al recurso aire.

B. Objetivos específicos

- Obtener y analizar datos de AOD del producto MCD19A2 de MODIS para la parroquia Puerto Bolívar en el período 2014-2024.
- Analizar los cambios de tendencia del AOD en el periodo 2014-2024 mediante un análisis multitemporal.
- Evaluar la correlación entre AOD y las exportaciones de concentrado de cobre mediante un análisis estadístico.

VI. MARCO TEÓRICO

A. Calidad del aire

La calidad del aire en entornos urbanos es resultado de la interacción entre las condiciones del ambiente, las fuentes naturales y antropogénicas [22]. La dinámica cambiante de estas condiciones genera variaciones en la composición, concentración y distribución de los contaminantes atmosféricos a lo largo del tiempo, lo que puede llevar a incrementos locales en las concentraciones y, consecuentemente, al deterioro de la calidad del aire.

La relación que tiene la calidad del aire con la salud pública se basa en la susceptibilidad de la población a desarrollar enfermedades respiratorias. Esta problemática afecta particularmente a los sectores de bajos recursos, donde la calidad del aire tiende a ser inferior, lo que incrementa el riesgo de impactos negativos en la salud [23].

El deterioro de la calidad del aire puede atribuirse tanto a procesos ambientales como a prácticas sociales [24]. Por ejemplo, el uso de combustibles fósiles es una fuente significativa de contaminación [25]. Por ello, es fundamental investigar los factores que influyen en la contaminación atmosférica para comprender sus mecanismos y desarrollar estrategias de mitigación [26].

B. Contaminación atmosférica

La contaminación atmosférica, es la amenaza ambiental más importante para la salud humana. Su presencia en áreas densamente pobladas implica una exposición constante de la ciudadanía [27], lo que favorece el desarrollo de enfermedades respiratorias. No obstante, esta contaminación también puede originarse a partir de fuentes naturales, como las erupciones volcánicas y la descomposición de materia orgánica.

Según [28] se evidencia que el 99% de la población respira un aire con concentraciones de contaminantes superiores a los límites aceptables por la OMS. Este hecho aclara la magnitud de la contaminación atmosférica como un problema global con implicaciones en la salud. La acumulación de contaminantes como material particulado, gases a partir de la quema de biomasa, emisiones industriales, entre otros, se conoce como carga de aerosoles, siendo este un parámetro vital para estimar su intervención en la contaminación en la atmósfera [25].

Las actividades humanas constituyen la principal fuente de contaminación del aire en zonas urbanas e industriales. Procesos comunes, como el transporte, la generación de energía y las actividades industriales,

emiten una variedad de contaminantes, entre los que destacan el material particulado, los óxidos de nitrógeno (NO_x), los óxidos de azufre (SO_x) y los compuestos orgánicos volátiles (COV), que contribuyen significativamente al deterioro de la calidad del aire.

1) Óxidos de azufre (SO_x)

Los óxidos de azufre presentes en la atmósfera tienen su origen de forma natural como antropogénica. De forma natural se emiten en incendios forestales o erupciones volcánicas, mientras por las fuentes antropogénicas se dan por la quema de biomasa, combustibles fósiles, minería y procesos industriales [29]. Siendo las fuentes antropogénicas las principales fuentes de óxidos de azufre que se emiten a la atmósfera a nivel mundial [30].

Este proceso ocurre en el ciclo atmosférico del azufre, en donde los sulfuros de hidrógeno (H_2S), sulfuro de dimetilo (DMS) y disulfuro de carbono (CS_2) proveniente de fuentes naturales y antrópicas reaccionan con los gases de la atmósfera formando sulfuro de carbonilo (OCS), dióxido de azufre (SO_2) y otros gases. El primer gas por fotólisis ($h\nu$) en la tropopausa forma dióxido de azufre que reacciona con un hidroxilo (OH) formando sulfato (SO_4^{2-}) que vuelve para depositarse en la superficie. Sin embargo, el dióxido de azufre y otros gases pueden ser absorbidos por nubes y formar hidrosoles formando las lluvias ácidas que descienden a la superficie, como se representa en (Fig. 1).

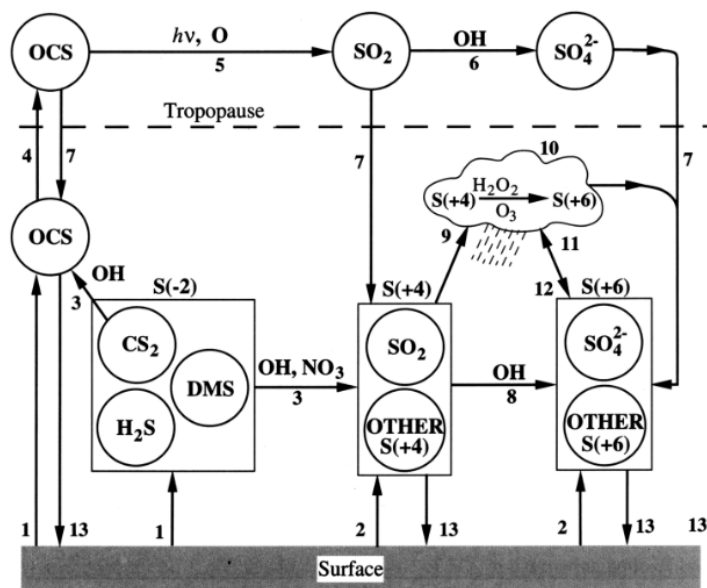


Fig. 1. Ciclo atmosférico de los compuestos del azufre. [31].

Este gas que se encuentra presente en las áreas pobladas como las ciudades es perjudicial para la salud de su población. La capacidad para causar desde síntomas leves como irritaciones en nariz y garganta y enfermedades como la broncoconstricción y disnea, especialmente en individuos asmáticos cuando se exponen a niveles altos de óxidos de azufre [16], lo convierte en un contaminante que se debe controlar.

La generación de energía convencional, como el transporte también producen otros contaminantes igual de importantes. Los óxidos de nitrógeno son uno de ellos, teniendo la misma importancia que los óxidos de azufre por su impacto en la salud y la calidad del aire.

2) *Óxidos de nitrógeno (NO_x)*

Parte de los óxidos de nitrógeno que se encuentran en el ambiente de las áreas pobladas provienen de actividades como la quema de combustibles fósiles y de biomasa, dando lugar a las reacciones como se muestran en (Fig. 2). Siendo estas dos acciones las que producen entre el 5% y el 15% de los óxidos de nitrógeno total (NO_x) [5]. Este aporte es sostenido en el tiempo por la necesidad de transportarse de la población y que puede aumentar en horas con mayor afluencia de vehículos, exponiendo a la población a los efectos que se pueden generar.

Como se puede observar en la (Fig. 2) en el ciclo del nitrógeno convergen varios procesos de transformaciones a partir del nitrógeno, desde que este se encuentra de forma natural en la atmósfera, el óxido nitroso (N₂O), gas que por su larga vida media en la atmósfera eventualmente se transporta hasta la estratosfera, en donde por reacciones con rayos ultravioletas (UV), Ozono (O₃) y radicales de hidroxilo (OH), se transforman en ácido nítrico (HNO₃), gas que se transporta de regreso hacia la troposfera y luego se deposita en los suelos y océanos como ion nitrato (NO₃⁻), en donde suceden varios procesos químicos a partir de este ion, como la amonificación, la nitrificación y la desnitrificación, proceso por el cual con la ayuda de bacterias anaerobias reducen los iones de nitrato y nitrito a gases, regresando de esta manera a la atmósfera.

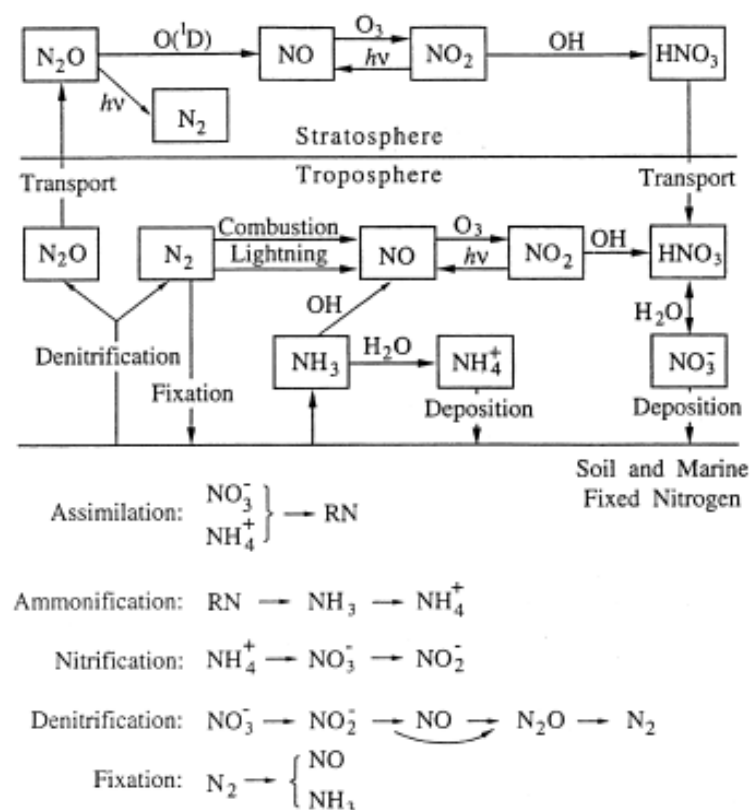


Fig. 2. Ciclo atmosférico de los compuestos de nitrógeno. [31].

Los óxidos de nitrógeno representan una alerta por sus efectos en la salud y por su capacidad de generar otros compuestos químicos en el ambiente. La excitación que puede tener por la radiación solar en la superficie terrestre le permite interactuar con otros gases como por ejemplo los compuestos orgánicos volátiles [16].

3) Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Los compuestos orgánicos volátiles al igual que los óxidos de azufre y nitrógeno tienen un origen natural y antrópico. Este último tiene sus principales fuentes en las industrias y vehículos, lo que representa más del 28% en relación con el total de compuestos orgánicos volátiles presente en el ambiente en las áreas suburbanas [32].

En la industria, el uso de insumos que a temperatura ambiente tiende a volatilizarse permite su generación de los COVs [16]. Insumos como combustibles, fertilizantes o disolventes pueden volatilizarse, contribuyendo a las concentraciones de aerosoles suspendidas en el aire, lo que representa un riesgo tanto para la salud como para el ambiente.

4) Aerosoles

Los aerosoles son partículas ultrafinas en estado sólido, líquido o gaseosos dispersos en la atmósfera que se originan de fuentes naturales o antrópicas [33]. Entre las fuentes naturales se encuentran la evaporación del agua, la actividad volcánica y la quema de biomasa, como se muestra en (Fig. 3). Entre las fuentes antrópicas se encuentran la quema de combustibles fósiles, las actividades industriales y la generación de energía.

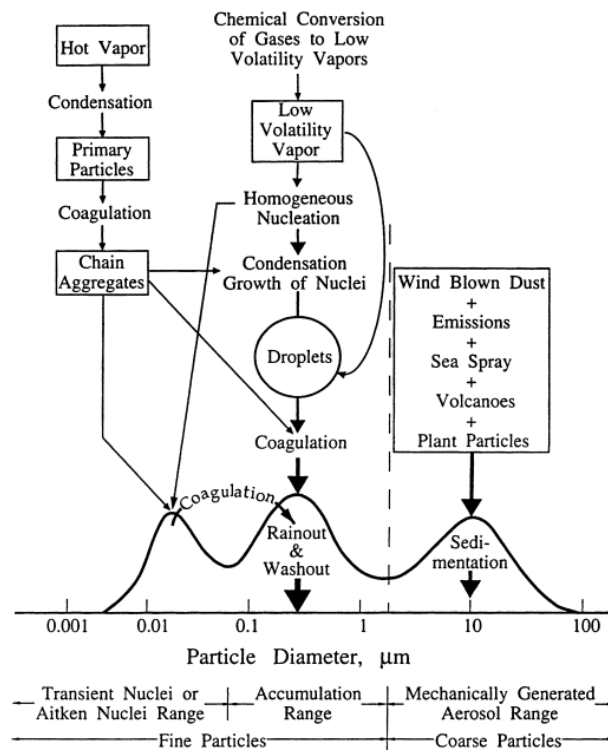


Fig. 3. Esquema idealizado de la distribución del área de superficie de partículas de un aerosol atmosférico. Los modos principales, las fuentes y la formación de partículas y los mecanismos de eliminación están indicados. [31].

La interacción de los aerosoles con la atmósfera puede afectar el comportamiento climático por medio de varios mecanismos. La capacidad de los aerosoles de absorber y dispersar la radiación reduce la energía que llega al suelo, pueden reaccionar con otros compuestos dispersos en el aire [34], lo que afecta la concentración y disposición en la atmósfera.

Los aerosoles están categorizados en dos tipos. Los primarios son provocados por fuentes naturales como las erupciones volcánicas y antropogénicos como la quema de biomasa [26]. Los secundarios en cambio, se originan a través de procesos de conversión de gas a partículas, en procesos naturales como la nucleación, condensación y reacciones químicas heterogéneas y multifásicas [26]. Estas categorías de aerosoles están conformadas principalmente por un contaminante en común, el material particulado.

5) Material particulado (PM)

El material particulado se puede clasificar según el origen y tamaño. De acuerdo con su formación, se dividen en primarias y secundarias, como se observa en (Fig. 4), las primarias son liberadas directamente a la atmosfera, mientras que las secundarias se forman por medio de reacciones[35].

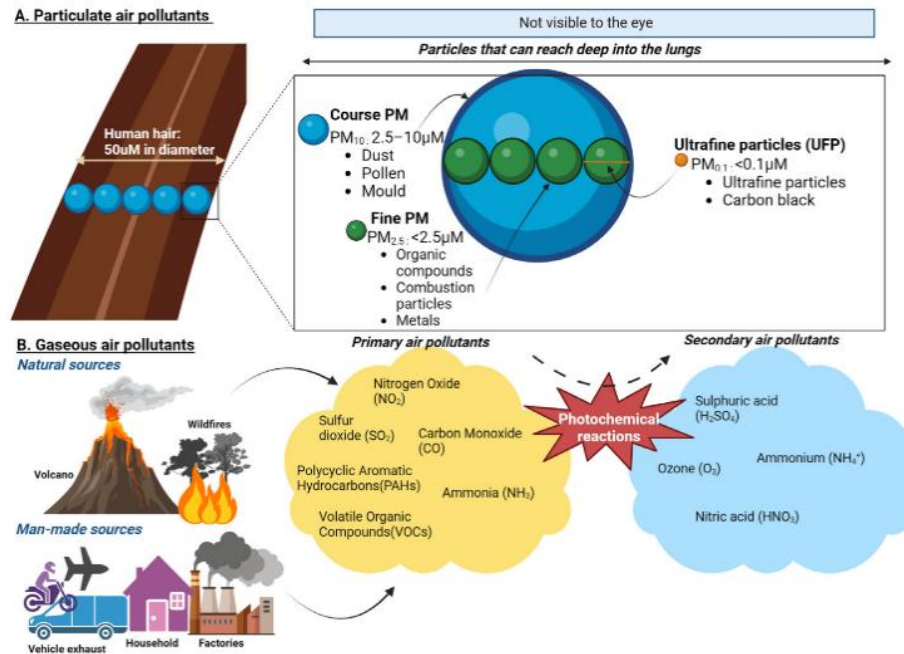


Fig. 4. Características, fuentes y composición del material particulado. [36].

El material particulado de acuerdo con su composición y tamaño puede representar riesgo a la salud. Su capacidad para penetrar profundamente en el sistema respiratorio las hace especialmente peligrosas, ya que pueden causar o agravar enfermedades respiratorias y cardiovasculares [16].

De acuerdo con el tamaño pueden depositarse o suspenderse en el aire, permitiéndoles transportarse grandes distancias [27]. Las más conocidas son el PM_{10} y $PM_{2.5}$, debido a la susceptibilidad a ser respirados, permitiéndoles ingresar a las vías respiratorias. Siendo el material particulado un problema significativo para la salud a nivel mundial, su control es clave para poder alcanzar los Objetivos de desarrollo Sostenible (ODS).

C. Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Nacido en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Sostenible (Río+20) celebrada en Río de Janeiro en junio de 2012 [37]. Los Estados abordaron los retos que permitirían a las sociedades

tener un desarrollo sostenible. Mediante un grupo de trabajo que culminó en agosto del 2015 dio a lugar 17 objetivos y 179 metas que se deberían aplicar hasta el año 2030, como se observa en (Fig. 5).



Fig. 5. Objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030. [3].

Estos objetivos poseen un enfoque integral, que se fundamenta en procesos ecológicos y naturales de la sociedad humana y al mismo tiempo promueven el bienestar humano [38]. Estos objetivos se sustentan en tres pilares complementarios: progreso social, desarrollo económico y protección ambiental [39]. Uno de los problemas que abordan los ODS es la salud pública, explicada en el objetivo 3 de la meta número 9 que se refiere a la Salud y Bienestar [3]. Donde se busca la reducción del número de muertes causadas por la contaminación del aire.

D. Salud pública

Es una disciplina encargada de proteger y mejorar la salud de las comunidades. Mediante la evaluación del estado de la población, desarrollo de políticas, asignación de recursos y garantizar el acceso al servicio [40], de esta forma salvaguardando el bienestar y la productividad de la población. El enfoque de la salud pública abarca varios problemas al poder identificar y tratar de remediar.

1) Enfermedades respiratorias

Las enfermedades respiratorias comprenden una variedad de trastornos que afectan las vías respiratorias y los pulmones. Estas patologías son inducidas por la calidad del aire [41] o rasgos genéticos que predisponen a los individuos a una mayor susceptibilidad a agentes ambientales.

El material particulado es uno de los principales factores ambientales asociados con el desarrollo de enfermedades respiratorias, como se muestra en (Fig. 6). Su exposición prolongada contribuye significativamente a la aparición de enfermedades pulmonares y cardíacas [42], debido a su capacidad de penetrar profundamente en el sistema respiratorio y provocar inflamación sistémica [43].

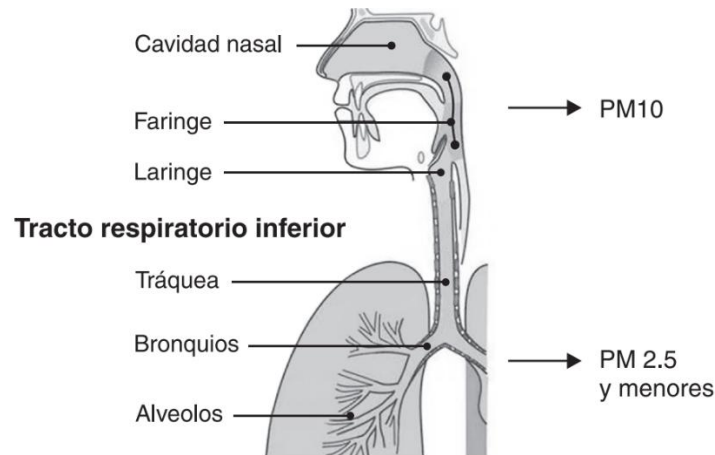


Fig. 6. Áreas donde se aloja el material particulado de 10 y 2,5 μm . [5].

Las fuentes de material particulado hacia la atmósfera son diversas. Entre ellas están la manipulación y transporte de minerales. Estos pueden liberar partículas finas que se suspenden en el aire debido al tamaño de la partícula, una sospecha de esta emisión proviene de los concentrados de cobre.

E. Concentrados de cobre

El concentrado de cobre es el resultado de los procesos de extracción y beneficio del mineral de cobre, que permiten la separación de minerales como la calcopirita y la calcocita del relave [44]. Dando como resultado un contenido de cobre que varía entre el 20% y el 45% y un material con un tamaño de partícula intermedio, generalmente en el rango de 50 a 70 μm [44].

Los concentrados de cobre presentan una toxicidad baja durante su transporte y almacenamiento en condiciones normales. No obstante, cuando estos materiales se dispersan en medios acuáticos, su toxicidad se incrementa significativamente, generando efectos adversos en las especies acuáticas y alterando la cadena trófica [45]; se pueden observar más ejemplos en (Fig. 7). Para estimar si los concentrados de cobre son un factor que afecte las concentraciones de AOD que se presentan en la atmósfera se utilizarán los sistemas de información geográfica mediante las imágenes satelitales.

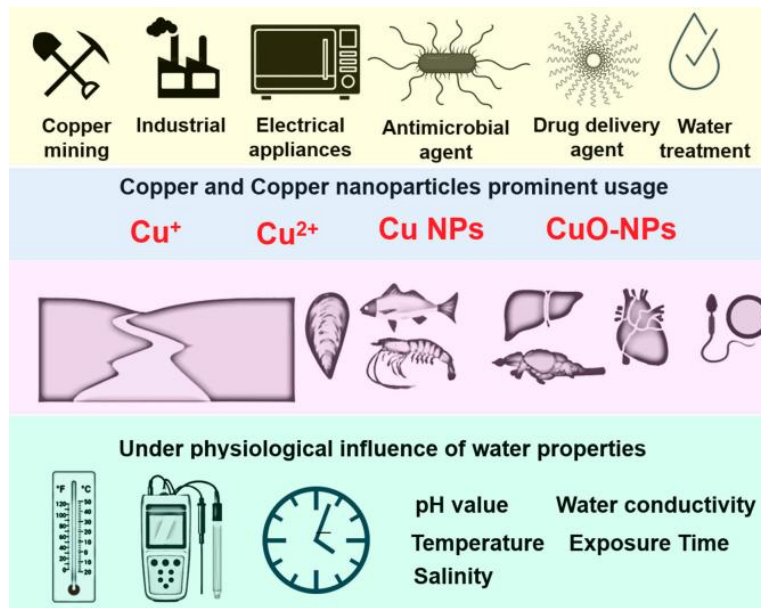


Fig. 7. Potenciales fuentes, forma potencial de contaminación, medios potenciales a afectarse y las propiedades que influyen en la toxicidad del nano cobre en las franjas amarillo, azul, rosa y verde respectivamente. [45].

F. Sistema de Información Geográfica (SIG)

Los sistemas de información geográfica son herramientas que permiten comprender mejor la información espacial por medio de una perspectiva más amplia [46]. Su capacidad para almacenar, recuperar, analizar y visualizar datos geográficos facilita el manejo de grandes conjuntos de datos [47], permitiendo la identificación de patrones, tendencias y relaciones espaciales esenciales para la toma de decisiones en diversas disciplinas [48].

Los sistemas de información geográfica se pueden combinar con la teledetección, para la recopilación remota de información relevante para estudios. Permite monitorear en áreas que no se posee información y establecer una base para estudios futuros.

1) Teledetección

La teledetección es una tecnología que permite la recolección de información del planeta por medio de sensores a bordo del satélite. Debido a la capacidad para abarcar amplias escalas espaciales y temporales, así como diversos rangos espectrales [49], puede ofrecer una alta precisión de datos y rapidez en la recopilación de información. Convirtiéndose en una solución eficaz para realizar estudios detallados del medio ambiente, monitorear de los cambios en el uso del suelo, evaluar recursos naturales, gestionar acciones ante desastres, entre otras aplicaciones. En la rama de teledetección se utiliza una gran variedad de

objetos y herramientas útiles para la detección de cambios en el ambiente, un ejemplo son los sensores ópticos que permite recolectar información en un rango de onda que puede ser captada por el ser humano.

2) Sensores ópticos

Los sensores ópticos son dispositivos diseñados para captar ondas electromagnéticas de la energía reflejada por la superficie de la tierra, estos se pueden clasificar en sensores pasivos y activos, Los sensores pasivos detectan la radiación o la energía electromagnética que es emitida por un objeto [50].

Entre los sensores pasivos se pueden encontrar diferentes rangos de longitudes de ondas, entre ellos, las bandas ultravioleta con la longitud de onda más pequeña encontrándose de 0,03 micras a 0,4 micras [51], las bandas del rango visible rojo, verde y azul, que van desde 0,4 micras a 0,7 micras y por último las del infrarrojo, que se subdividen en infrarrojo cercano que son de 0,7 micras a 1,4 micras, infrarrojo de onda corta que va de 1,4 a 3,0 micras y por último la del infrarrojo térmico que va de 3,0 a 14,0 micras [51]. Permitiendo crear imágenes satelitales para diferentes características de la atmosfera y corteza terrestre.

3) Imágenes satelitales

Las imágenes satelitales permiten representar características físicas, climáticas, biológicas y geográficas del planeta a una resolución manejable. La resolución espacial de las actuales imágenes satelitales puede llegar a escala de metros [22], lo que permite capturar detalles con alta precisión para diversos análisis y aplicaciones.

El movimiento orbital de los satélites alrededor del planeta permite la obtención de imágenes repetidas a lo largo del tiempo. Esto facilita la realizar análisis espaciotemporales, que son esenciales para monitorear cambios en la superficie terrestre, evaluar tendencias ambientales y estudiar dinámicas geográficas con precisión [52].

En conjunto con la información que se puede obtener mediante las imágenes satelitales, se puede combinar con información meteorológica y geoespacial, permitiendo la creación de Modelos de Calidad del Aire (MCA), lo que permite analizar el comportamiento de un objeto en el ambiente.

4) Modelos de calidad del aire (MCA)

Los modelos de calidad del aire (MCA) permiten analizar el transporte y la dinámica de los contaminantes atmosféricos [53]. Mediante factores físicos, químicos, climáticos y geográficos, estos modelos simulan el comportamiento y la distribución de los contaminantes, proporcionando una

comprensión detallada de su impacto en el ambiental y su variabilidad espaciotemporal, una representación del funcionamiento se muestra en (Fig. 8).

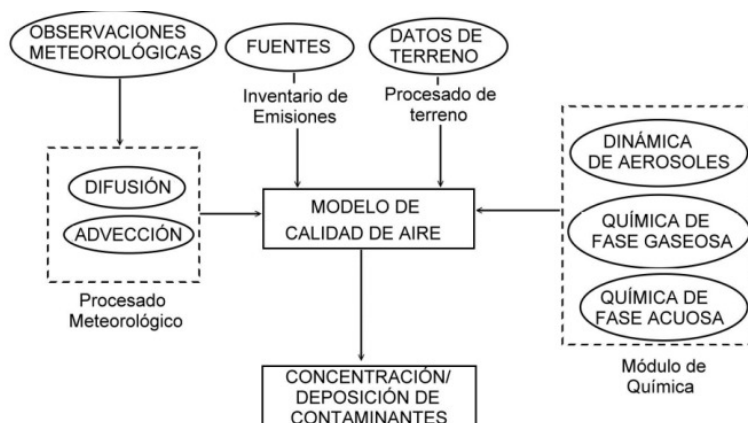


Fig. 8. Esquema conceptual de los modelos de calidad de aire. [54].

Estos modelos de dispersión pueden mejorar su precisión mediante información espacial proporcionada por herramientas satelitales, como es el Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS) siendo un instrumento muy útil para obtener un mejor producto en la simulación de la dispersión de contaminantes.

5) Espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS)

MODIS es un instrumento a bordo de los satélites Terra y Aqua, diseñado para estudiar y comprender la dinámica de los procesos que ocurren en la superficie terrestre, los océanos y la atmósfera inferior [55], como se muestra en (Fig. 9). Entre los productos que ofrece esta el MCD19A2 que recopila la profundidad óptica de aerosol terrestre (AOD) en diferentes longitudes de onda [56]. Estos datos son fundamentales para el estudio de la distribución y el impacto de los aerosoles en el ambiente.



Fig. 9. Grupo de satélites denominados constelación de la tarde, o a veces el tren A [57].

Las longitudes de onda de 0,47 y 0,55 μm recuperan las concentraciones de aerosoles derivados de la combustión de biomasa o del polvo. El AOD que es recuperado a partir de la Banda azul (0,47 μm) se utiliza para la estandarización de la banda verde (0,55 μm) [9]. Esta última presenta una validación de calidad comparable, aunque ligeramente inferior, a la de la banda azul. Sin embargo, la capacidad de medición no es suficiente para estimar las concentraciones de masa de partículas de aerosol, debido a la influencia de las nubes y humedad [58]

6) Seguro de calidad de la Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD_QA)

El conjunto de datos AOD_QA fue implementado por primera vez en el algoritmo MAIAC con el lanzamiento de su colección inicial (C6.0). La banda AOD_QA surgió como una necesidad para representar las condiciones del área en la que se recupera el AOD. A partir de la solicitud de investigadores [2], se desarrolló y publicó el primer documento oficial de la guía del usuario que incluye información detallada sobre la banda AOD_QA. Con la publicación de dicha guía, esta banda se consolidó como una herramienta fundamental para evaluar la calidad de los datos AOD, mediante un proceso de decodificación de los conjuntos de bits que describen las condiciones de recuperación. Cada intervalo de bits representa una característica específica de la calidad o condiciones del píxel. La Tabla I presenta la estructura de codificación y las subdivisiones correspondientes del producto AOD_QA.

TABLA I

DEFINICIÓN DE CONTROL DE CALIDAD DE AOD PARA MCD19A2 (ENTERO SIN SIGNO DE 16 BITS) [59]

Bits	Definición
Bits 0 - 2: Máscara de nube	0: Indefinida
	1: Claro
	2: Posiblemente nublado (detectado por el filtro de AOD)
	3: Nublado (detectado por el algoritmo de máscara de nubes)
	5: Sombra de nube
	6: Punto caliente de fuego
	7: Sedimentos de agua
Bits 3 - 4: Máscara de nieve o hielo de agua y tierra	0: Tierra
	1: Agua
	2: Nieve
	3: Hielo
Bits 5 - 7: Máscara de adyacencia	0: Condición normal/limpia
	1: Junto a las nubes
	2: Rodeado por más de 4 píxeles nublados
	3: Junto a un solo píxel nublado
	4: Junto a nieve
Bits 8 - 11: QA para AOD	5: Se detectó nieve anteriormente en este píxel
	0: Mejor calidad
	1: Se detectan sedimentos de agua (agua)
	3: Hay 1 nube vecina
	4: Hay más de 1 nube vecina
	5: Sin recuperación (nublado o lo que sea)
	6: No hay recuperaciones cerca de nieve detectada o detectada anteriormente
	7: AOD climatológica: altitud superior a 3.5 km (agua) y 4.2 km (tierra)
	8: No hay recuperación debido al reflejo del sol (agua)
	9: El AOD recuperado es muy bajo (<0.05) debido al reflejo (agua).
	10: La AOD dentro de un radio de +/- 2 km de la costa se reemplaza por la AOD cercana.
	11: Terreno, calidad de la investigación: Se recuperó la AOD, pero es posible que el CM esté nublado
Bit 12: Máscara de reflejo	0: Sin reflejos
	1: Brillo (ángulo de brillo inferior a 40°)
Bits 13 - 14: Modelo de aerosol	0: Modelo de fondo (regional)
	1: Modelo de humo (regional)
	2: Modelo de polvo
Bit 15: Reservado	0: Reservado para uso futuro
	1: Reservado para uso futuro

7) Profundidad óptica de los aerosoles (AOD)

El AOD se define como la integral del coeficiente de extinción de un medio en la dirección vertical [34]. Este parámetro permite cuantificar la concentración de aerosoles en un área determinada, proporcionando información clave para evaluar su distribución, impacto ambiental y efectos en la calidad del aire.

El AOD facilita la estimación de la concentración de material particulado en el ambiente debido a su relación con los aerosoles [60]. Este parámetro proporciona una medida indirecta pero efectiva para evaluar la carga de partículas en suspensión, lo que resulta esencial para estudios sobre calidad del aire.

VI. METODOLOGÍA

A. Delimitación del área de estudio

Para la delimitación del área de estudio se utilizó el sistema de información geográfica (ArcGIS 10.3). Utilizando el mapa base como referencia, se ubicó de forma precisa el área de interés y a continuación se superpusieron la capa de polígono para delimitar un área que representa fielmente el área de estudio.

El estudio se desarrolló en la parroquia Puerto Bolívar, cantón Machala, en la provincia de El Oro, Ecuador. La zona de estudio se encuentra específicamente en el área de operaciones del Puerto Bolívar, como se muestra en la Fig. 10. Esta área ha sido delimitada debido a las actividades de almacenamiento de concentrados de cobre destinadas a su posterior exportación.

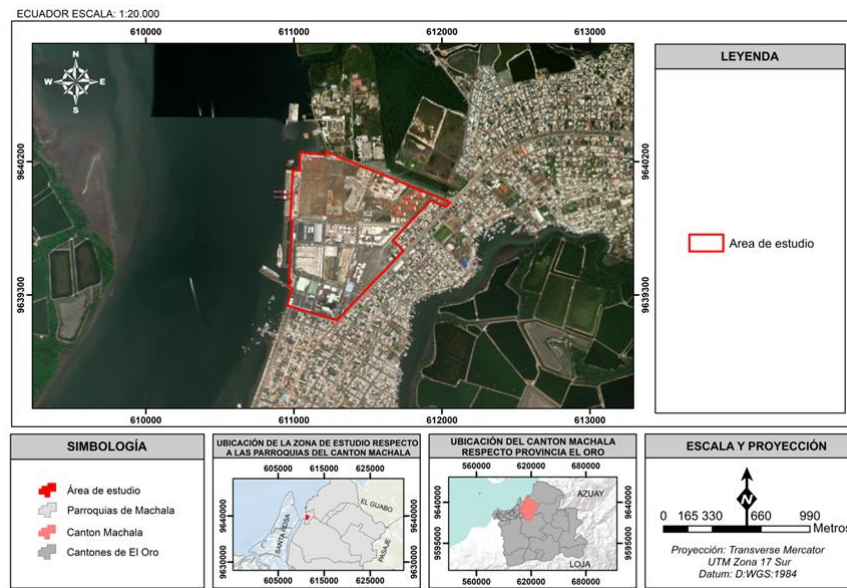


Fig. 10. Mapa de ubicación geográfica del Puerto Bolívar.

B. Materiales y métodos

Se seleccionó el producto MCD19A2 del sensor MODIS debido a su reconocida correlación con los niveles de material particulado, a través de la variable de AOD. Para la obtención de los datos, se empleó un código por medio de la plataforma Google Earth Engine (GEE), que implementa un proceso de filtrado en tres etapas: en primer lugar, se restringen las imágenes disponibles al área de estudio; en segundo lugar, se seleccionan únicamente aquellas que contienen datos válidos de AOD; y, finalmente, se aplica un filtrado adicional utilizando los bits 0–2 del conjunto AOD_QA, correspondiente a la máscara de nubes,

seleccionando únicamente las escenas con condiciones atmosféricas claras para su posterior exportación y procesamiento manual.

Para el diseño experimental, debido a la resolución espacial del producto MCD19A2, se dividió al área de influencia de la zona de estudio en 9 cuadrantes, que representan los puntos cardinales como se observa en la Figura. 11, en donde el cuadrante CENTRO corresponde a la ubicación del área de almacenamiento de concentrado de cobre, considerada como el punto de origen de la emisión. Esta segmentación permite una evaluación espacial más precisa de la posible dispersión de la pluma de contaminación.

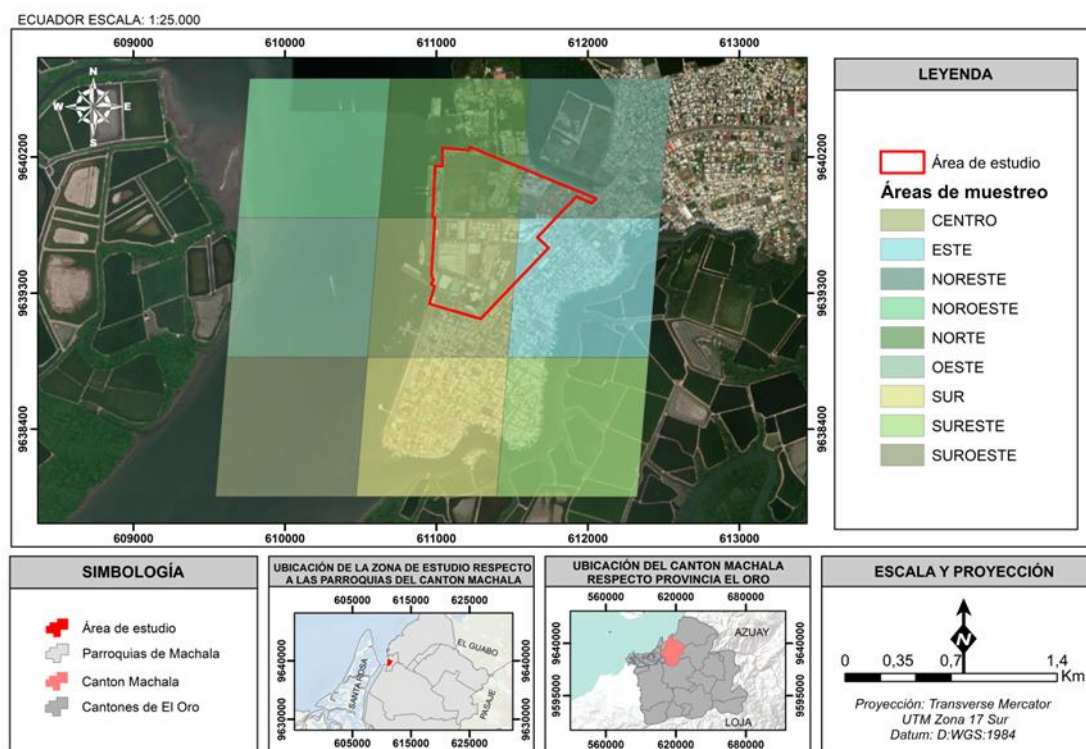


Fig. 11. Mapa de ubicación de las áreas muestreadas.

1) Extracción de datos AOD en la zona puerto Bolívar

Para la obtención de los DATOS AOD se siguió los siguientes pasos dentro de la plataforma de Google earth engine:

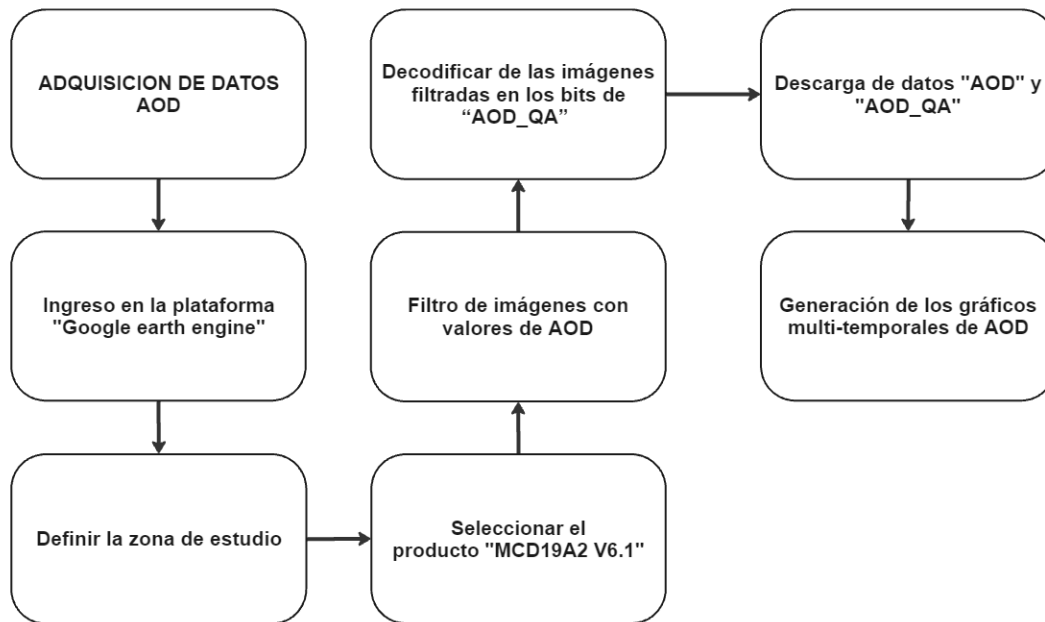


Fig. 12. Diagrama de flujo de procesos realizados.

a) *Definir la zona de estudio en Google Earth Engine*

Como primer paso se definió la coordenada central con la que se decide trabajar (-80.00, -3.26) y se estableció como punto de referencia para establecer los puntos que se dividen en N (norte), S (sur), NE (noreste), NO (noroeste), E (este), O (oeste), SE (sureste) y SO (suroeste), y por último se crea una figura geométrica (denominada como “geometry” dentro de GEE) que representa una cuadrícula que encierra los pixeles de los 9 puntos antes establecidos con el siguiente código:

```

var punto_C: Point (-80.00, -3.26)
var punto_N: Point (-80.00, -3.26)
var punto_S: Point (-80.00, -3.27)
var punto_NE: Point (-79.99, -3.26)
var punto_NO: Point (-80.01, -3.26)
var punto_E: Point (-79.99, -3.26)
var punto_O: Point (-80.01, -3.26)
var punto_SE: Point (-79.99, -3.27)
var punto_SO: Point (-80.01, -3.27)
var geometry: Polygon, 4 vertices

```

Fig. 13. Coordenadas de los puntos de muestreo.

b) *Cargar el producto MODIS*

Luego se dispuso a elegir el producto a trabajar, en este caso el MCD19A2, señalando en el código que las imágenes se las requiriere desde el 2014 hasta el 2024, estableciendo las fechas en periodos de 1 año para la descarga de información en su versión de MAIAC 6.1, también se filtró las imágenes para la zona

anteriormente denominada “geometry” y seleccionamos las bandas “Optical_Depth_047” y “AOD_QA” para posteriores filtros.

c) Filtrar imágenes con valores en geometría

En la siguiente sección se aplica una función a cada imagen de la colección para después extraer la máscara de la banda “Optical_Depth_047”, del cual se establece válido cuando exista al menos 1 píxel con datos de AOD en el área de “geometry”. Esta función es devuelta a la imagen y se agrega una nueva máscara denominada “hasData” con valores de 0 (sin píxeles válidos) y 1 (con al menos 1 píxel válido), finalmente se filtran las imágenes con un “hasData” de 1.

d) Decodificación de bits de QA

Establecemos una función destinada a decodificar las imágenes previamente filtradas para posteriormente seleccionar la banda “AOD_QA” y se agregar nuevas bandas correspondientes a los rangos de bits y nombres establecidos en [9]. Finalmente, esta función se asigna a una variable, lo que permite su aplicación sistemática sobre la colección de imágenes.

e) Aplicar decodificación, máscara y recorte

Para filtrar los datos de AOD utilizando el criterio de máscara de nubes, se aplica la función previamente definida a las imágenes correspondientes en los puntos de muestreo, incorporando bandas que representan el contenido de los bits. Posteriormente, se selecciona la banda Cloud_Mask y se establece el criterio 1, correspondiente a cielo claro. Este proceso identifica los píxeles que cumplen con el criterio, los cuales son extraídos y recortados por el área geometry, devolviendo la máscara a las imágenes filtradas.

f) Función para crear gráfico de AOD y QA

Para la descarga de datos de AOD, se desarrolló una función que permite representar los valores obtenidos mediante un gráfico de dispersión. En este proceso, se define la variable aodChart, donde se seleccionan las bandas “Optical_Depth_047” y “AOD_QA”, las cuales recuperan los datos de un punto de muestreo específico. A continuación, se establecen las propiedades de visualización que tendrá la gráfica, Por último, la función es asignada a una variable para generar los gráficos a los nueve puntos de muestreo.

```

//CARGAR EL PRODUCTO MODIS
var modisCollection = ee.ImageCollection('MODIS/061/MCD19A2_GRANULES')
  .filterDate('2024-01-01', '2024-12-31')
  .filterBounds(geometry)
  .select(['Optical_Depth_047', 'AOD_QA']);
//FILTRAR IMÁGENES CON VALORES EN GEOMETRÍA
var modisConAOD = modisCollection.map(function(image) {
  var mask = image.select('Optical_Depth_047').mask().reduceRegion({
    reducer: ee.Reducer.anyNonZero(),
    geometry: geometry}).get('Optical_Depth_047');
  return image.set('hasData', mask);});
var modisFiltrado = modisConAOD.filter(ee.Filter.eq('hasData', 1));
//DECODIFICACIÓN DE BITS DE QA
function decodeQA(image) {
  var qa = image.select('AOD_QA');
  return image.addBands([
    qa.rightShift(0).bitwiseAnd(7).rename('Cloud_Mask'),
    qa.rightShift(3).bitwiseAnd(3).rename('Land_Water_Snow_Ice'),
    qa.rightShift(5).bitwiseAnd(7).rename('Adjacency_Mask'),
    qa.rightShift(8).bitwiseAnd(15).rename('QA_AOD'),
    qa.rightShift(12).bitwiseAnd(1).rename('Glint_Mask'),
    qa.rightShift(13).bitwiseAnd(3).rename('Aerosol_Model'),
    qa.rightShift(15).bitwiseAnd(1).rename('Reserved')]);}
var decodificado = decodeQA;
//APLICAR DECODIFICACIÓN, MÁSCARA Y RECORTE
var modisDecodificado = modisFiltrado
  .map(decodeQA)
  .map(function(img) {
    var mask = img.select('Cloud_Mask').eq(1);
    var masked = img.updateMask(mask).clip(geometry);
    return masked.copyProperties(img, ['system:time_start']);});
//CONTROL DE IMAGENES (OPCIONAL)
print('Número total de imágenes:', modisCollection.size());
print('Número luego de aplicar máscara de calidad:', modisDecodificado.size());
//FUNCIÓN PARA CREAR GRÁFICO DE AOD Y QA
function crearGrafico(punto, titulo) {
  var aodChart = ui.Chart.image.series({
    imageCollection: modisDecodificado.select(['Optical_Depth_047', 'AOD_QA']),
    region: punto,
    reducer: ee.Reducer.first(),
    xProperty: 'system:time_start'}).setChartType('ScatterChart')
    .setOptions({
      title: 'AOD 0.47 µm y QA_AOD (' + titulo + ')',
      hAxis: {title: 'Fecha', format: 'dd-MM-yy', gridlines: {count: 10}},
      vAxis: {title: 'Valor'},
      pointSize: 4,
      series: {
        0: {color: 'red', labelInLegend: 'QA_AOD'},
        1: {color: 'blue', labelInLegend: 'AOD'}}});
  return aodChart;}
print(crearGrafico(punto_C, 'C'));
print(crearGrafico(punto_N, 'N'));
print(crearGrafico(punto_S, 'S'));
print(crearGrafico(punto_E, 'E'));
print(crearGrafico(punto_O, 'O'));
print(crearGrafico(punto_NE, 'NE'));
print(crearGrafico(punto_NO, 'NO'));
print(crearGrafico(punto_SE, 'SE'));
print(crearGrafico(punto_SO, 'SO'));

```

Fig. 14. Código para la descarga de datos de AOD.

2) *Análisis estadístico de las series temporales*

Para la aplicación de la regresión segmentada, el modelo ARIMA y la regresión lineal, fue necesario homogenizar los datos mediante el cálculo del promedio mensual de los valores de AOD. Este proceso permitió mantener la coherencia temporal con los datos de exportación de concentrado de cobre, cuya frecuencia de registro es mensual.

En cuanto a los datos de volúmenes exportados de concentrados de cobre, estos fueron extraídos del informe preliminar del año 2023 elaborado por la Autoridad Portuaria de Puerto Bolívar. Para los análisis estadísticos se utilizó la plataforma Google Colaboratory con las bibliotecas y funciones de la Tabla II.

TABLA II
Funciones y bibliotecas para el análisis estadístico

FUNCION	BIBLIOTECA	USO
Regresión segmentada	ruptures	Permite detectar puntos de cambio en series temporales y modelar segmentos con comportamientos distintos a lo largo del tiempo.
Modelo ARIMA	statsmodels.tsa. arima.model	Permite estimar el comportamiento de una serie temporal a lo largo de un periodo.
Autocorrelación parcial (PACF)	statsmodels.gra	Permite determinar la correlación entre la serie y sus retardos descontando los efectos intermedios y permite estimar el componente “p” del modelo ARIMA
Funciones de autocorrelación (ACF)	phics.tsaplots	Permite determinar la correlación entre la serie y sus retardos (lags) y permite estimar el componente “q” del modelo ARIMA
Prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF)	statsmodels.tsa. stattools	Se utilizó para evaluar la estacionariedad de la serie temporal mediante pruebas estadísticas y determinar el componente “d” del modelo ARIMA.
Regresión lineal	scipy.stats y seaborn	Para la representación gráfica de la regresión lineal y el cálculo de los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman.

3) Extracción de datos de velocidad y dirección del viento

Para obtener la información de la velocidad y dirección del viento a utilizar para el área de estudio, se realizó el siguiente procedimiento:

a) Definir la estación meteorológica para la recolección de datos

De acuerdo con los anuarios meteorológicos del INAMHI, la estación Granja Santa Inés (UTM) es la más próxima al área de estudio. Por lo tanto, es el más idóneo para estimar la velocidad y dirección del viento en el Puerto Bolívar. La estación es de tipo Agrometeorológica por lo que sus datos tienen un fin de garantizar el rendimiento en los cultivos, sin embargo, los datos que recopila pueden utilizarse para otros fines. A continuación, en la Tabla III se presenta más información sobre la estación meteorológica Granja Santa Inés (UTM).

TABLA III
INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA GRANJA SANTA INES (UTM).

CODIGO	NOMBRE DE ESTACION	TIPO	COORDENADAS		ALTITUD	PROVINCIA
			Latitud	Longitud		
M0292	GRANJA STA.INES(UTM)	AP	3 17 28.5 S	79 54 55.5 W	5	El Oro

b) Extracción de Datos de velocidad y dirección del viento.

Para definir la velocidad y dirección del viento que puede existir en el área de estudio se recopiló la información por medio de los anuarios meteorológicos del INAMHI para los 10 últimos años de registro (2004 - 2013). Los datos mensuales fueron organizados de acuerdo con sus respectivas direcciones y posteriormente agrupados, como se presenta en la Tabla IV.

TABLA IV
Tabla utilizada para recopilar datos de velocidad y dirección del viento

Fecha	Velocidad	Dirección	Frecuencia
		N	
		NE	
		E	
		SE	
		S	
		SO	
		O	
		NO	

c) Elaboración de la rosa de vientos

Para la representación de la rosa de los vientos se utilizó la plataforma Colaboratory, mediante la implementación de la biblioteca windrose, la cual permite visualizar la frecuencia y dirección del viento. Esta herramienta resulta particularmente útil en contextos meteorológicos y en estudios relacionados con el transporte atmosférico de contaminantes.

VII. RESULTADOS

A. Análisis de datos de AOD del producto MCD19A2 de MODIS

Para mejorar la representatividad de los aerosoles durante el período 2014–2024, se implementó un riguroso filtrado de las imágenes satelitales utilizando la banda AOD_QA. En la plataforma GEE se procedió el filtrado en tres momentos. Primero, se seleccionaron únicamente las escenas del producto MCD19A2 de MODIS que cubrían las áreas de muestreo; a continuación, se filtraron para conservar solo aquellas con datos válidos de AOD; y, finalmente, se aplicó el criterio “claro” de la máscara de nubes (bits 0–2 de AOD_QA) para eliminar píxeles nublados. Tras este procesamiento, los valores de AOD resultantes se exportaron en formato Excel.

Para evaluar la posible influencia de las exportaciones de concentrado de cobre sobre la calidad del aire, se enfocó el análisis en el cuadrante CENTRO (área de almacenamiento) y en sus ocho direcciones adyacentes. Dado que el producto MCD19A2 tiene una resolución espacial de 1 km, cada área de muestreo se definió con la misma dimensión.

Después del filtrado, el número de observaciones de AOD por área osciló entre 276 y 845 datos a lo largo de los 11 años estudiados. El cuadrante NORTE no aportó datos hasta 2022 en comprendiendo 276 datos de AOD para el periodo 2022 - 2024, mientras que SUROESTE y NOROESTE registraron solo 493 y 352 observaciones, respectivamente, siendo las tres áreas con menor cantidad de datos. No obstante, las demás áreas presentaron entre 656 y 845 observaciones. Para homogeneizar la serie temporal, se promedió el número de datos a nivel mensual, obteniéndose 120 valores de AOD por área, salvo en el cuadrante Norte, que dispuso de únicamente 36 datos mensuales.

Como se observa en la Fig. 15, no se evidencia un cambio claro en la tendencia del AOD en las nueve áreas de muestreo. No obstante, se identifican incrementos en los valores hacia finales de año, siendo particularmente acentuados en 2021, donde todas las áreas registran picos elevados. De manera similar, los años 2019 y 2022 presentan aumentos significativos en los niveles de AOD, aunque no de forma homogénea en todas las zonas. Estos incrementos tienden a estabilizarse rápidamente al inicio del año siguiente.

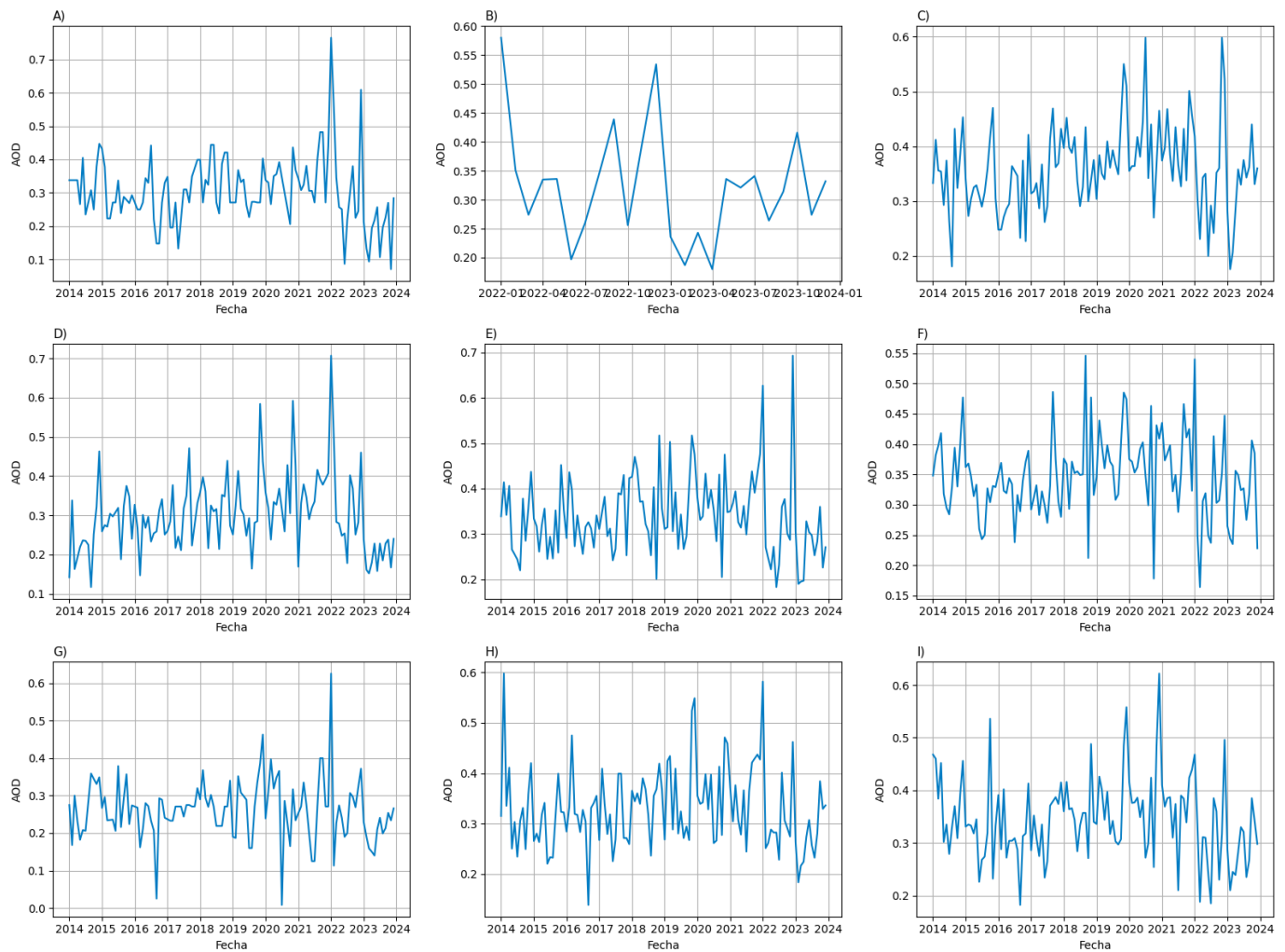


Fig. 15. Comportamiento del AOD en las 9 áreas de muestreo respecto al centro en la sección E)

B. Serie temporal depurada de AOD (QA aplicado)

Tras la aplicación de filtros de calidad (QA) para la eliminación de píxeles no válidos, se procede a graficar la serie temporal del punto de muestreo central, dado que este corresponde al área de almacenamiento de concentrado de cobre. Como se observa en la fig. 16, la serie temporal del AOD, presenta un comportamiento relativamente estable durante los primeros ocho años del periodo analizado, con valores que oscilan entre 0.2 y 0.5. Sin embargo, los últimos dos años, se registran picos que superan los 0.6 y descensos por debajo de 0.2. Estos cambios no reflejan una tendencia sostenida, sino variaciones transitorias, que se analizará más adelante con la regresión segmentada y el modelo ARIMA.

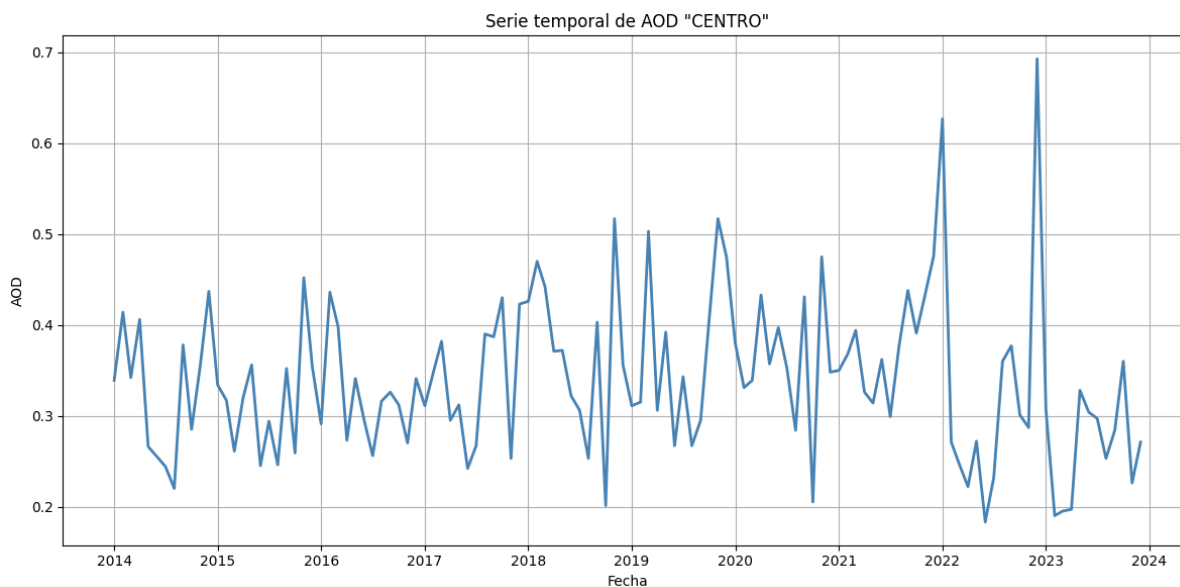


Fig. 16 Serie temporal de AOD del punto de muestreo central del área de estudio

C. Cambios en la tendencia del material particulado a partir de AOD a través de un análisis multitemporal

1) Regresión segmentada

Para determinar un posible aumento en los niveles de material particulado, se analizó la serie temporal de AOD mediante una regresión segmentada, considerando el periodo entre 2014, año de inicio del monitoreo, y 2023, como se muestra en la figura N° 5, durante estos diez años el comportamiento del AOD no evidencia una segmentación marcada, lo que se refleja en la continuidad del fondo azul del gráfico. Esto indica que no existen puntos de quiebre o variabilidad significativa a lo largo de la serie temporal.

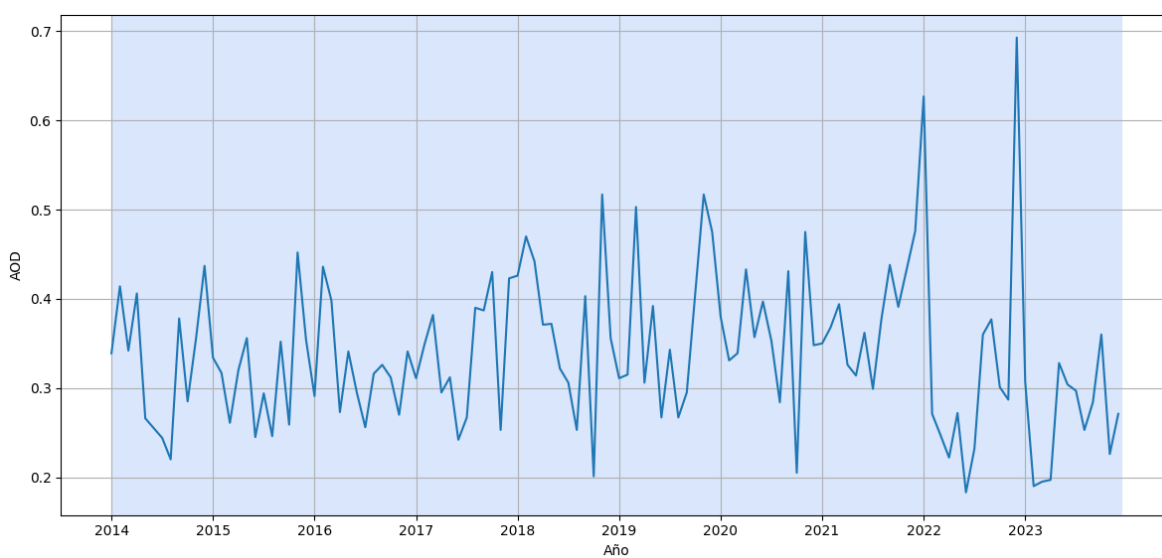


Fig. 17. Regresión segmentada de AOD

2) Media móvil integrado autorregresiva (ARIMA)

El modelo ARIMA es una herramienta útil para modelar y predecir el comportamiento de series temporales. Su aplicación requiere la identificación de tres componentes clave: el orden autorregresivo (p), el grado de estacionariedad (d), y el orden de la media móvil (q). Para determinar estos parámetros, se utilizan métodos como la función de autocorrelación parcial (PACF), la prueba de raíz unitaria de Dickey-Fuller aumentada (ADF) y la función de autocorrelación total (ACF), los cuales permiten establecer el tipo de modelo idóneo para predecir el comportamiento del AOD.

Para evaluar la relación directa entre la variable en el tiempo actual y sus rezagos, eliminando el efecto de los rezagos intermedios se utilizó la función de autocorrelación parcial (PACF). El resultado obtenido indica que no existe una autocorrelación entre una observación y su lag, lo que indicaría que no existe un AR por lo tanto el componente p es de 0, como se muestra en la Fig. 18.

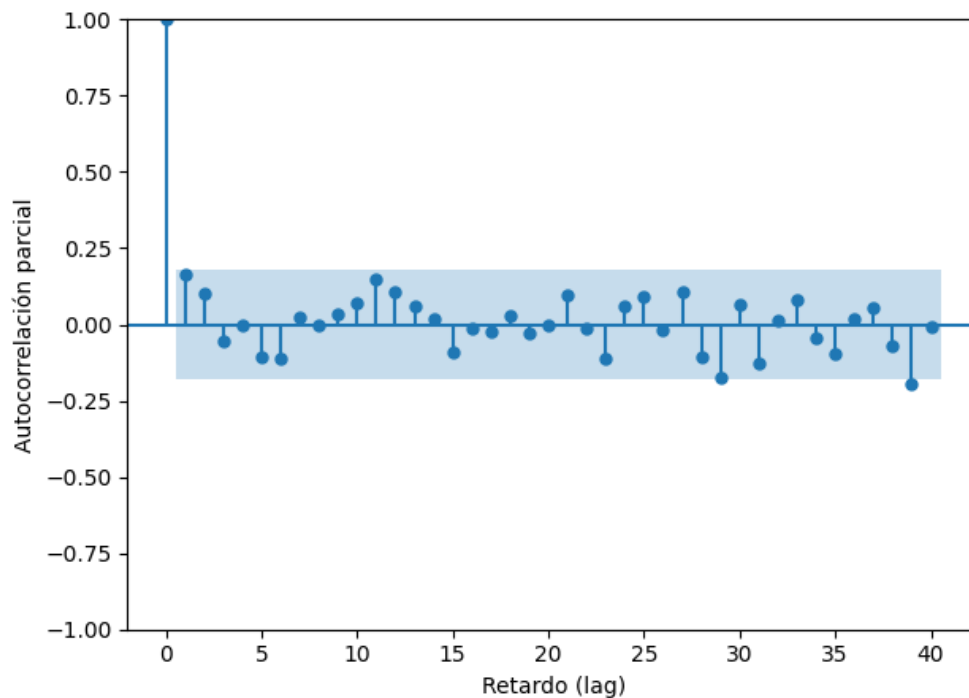


Fig. 18. Función de autocorrelación parcial (PACF) de AOD.

Para verificar la estacionariedad de la serie temporal, se aplicó la prueba de Dickey-Fuller Aumentada (ADF). Esta prueba permite determinar la presencia de una raíz unitaria, lo cual indicaría que la serie no es estacionaria. Los resultados obtenidos muestran que el estadístico ADF es significativamente menor que los valores críticos como se muestra en la Tabla V. Además, dado que el valor d es inferior a

0.05, se rechaza la hipótesis nula de no estacionariedad, concluyéndose que la serie es estacionaria por lo tanto el componente d es de 0.

TABLA V
Prueba ADF y valores críticos de la prueba ADF

	Prueba ADF	Valores críticos AOF	
Estadístico ADF:	-9.1393	1%	-3.4865
p-valor:	0.0000	5%	-2.8862
		10%	-2.5799

Para identificar la presencia de correlaciones significativas entre los rezagos de la serie temporal se analizó la función de autocorrelación total (ACF), el cual permite observar el comportamiento de los picos de autocorrelación a distintos rezagos. Los resultados obtenidos muestran que no existe una autocorrelación entre una observación y sus lags, lo que indicaría que no existe un MA por lo tanto el componente q es de 0, como se muestra en el Fig. 19.

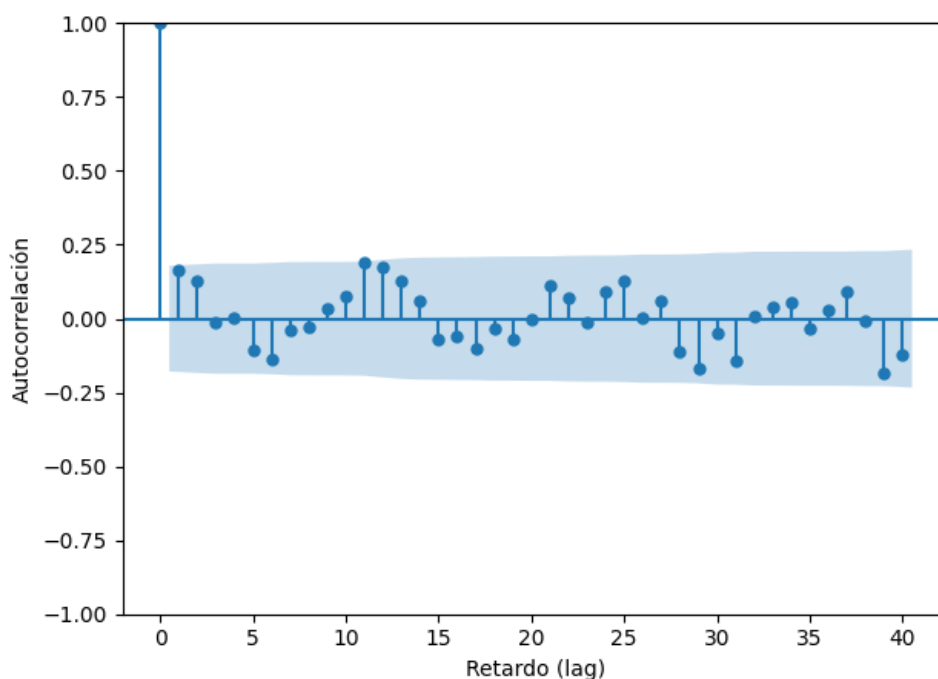


Fig. 19. Función de autocorrelación total (ACF) de AOD

No obstante, el análisis del coeficiente de covarianza, calculado mediante el producto externo de gradientes en el software EViews12, indica que los términos de constante (C) y autorregresivo (AR) presentan una significancia estadística adecuada, como se evidencia en la Tabla VI. En consecuencia, se sugiere la aplicación de un modelo ARIMA (1,0,0), dado que la serie ya ha sido confirmada como

estacionaria y la inclusión de un componente de media móvil (MA) podría introducir distorsiones en el ajuste del modelo.

TABLA VI
Resultado del análisis del coeficiente de covarianza.

Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
C	0.338304	0.010566	32.01923	0.0000
AR (1)	0.162947	0.078358	2.079535	0.0398
SIGMASQ	0.007111	0.000727	9.782042	0.0000

Por temas prácticos se seleccionó el modelo ARIMA (1,0,0) para la predicción del comportamiento del AOD en el área de almacenamiento de concentrado de cobre, en donde no se observa un incremento significativo en los niveles de AOD durante la mayor parte del período analizado. Sin embargo, se identifica un aumento no significativo en las concentraciones de AOD entre los años 2020 y 2022, en comparación con los valores esperados según la predicción del modelo ARIMA. Posteriormente, los niveles de AOD regresan a sus valores normales, lo que sugiere una anomalía transitoria sin una tendencia sostenida como se representa en el Fig.20.

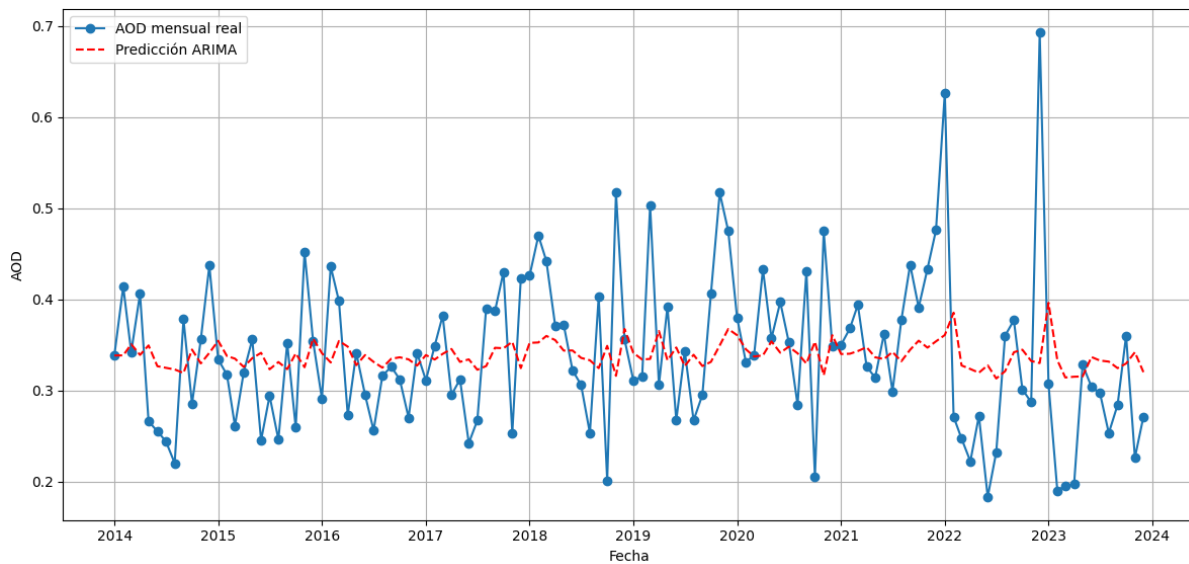


Fig. 20. Modelo ARIMA (1,0,0) sobre AOD mensual

3) Regresión lineal

El análisis de regresión lineal entre las exportaciones de concentrado de cobre y la profundidad óptica de aerosoles (AOD) arrojó una pendiente prácticamente nula, lo que indica la ausencia de correlación

estadística significativa como se observa en la Fig. 21. Este resultado es coherente con los hallazgos obtenidos a partir de la regresión segmentada y el modelo ARIMA aplicado a la serie temporal de AOD. Aunque los valores de AOD presentan una gran dispersión respecto a las toneladas de concentrado de cobre exportado durante los periodos de exportación, dicha variabilidad obedece principalmente a un comportamiento estacional de los aerosoles y no a un incremento atribuible a la actividad portuaria.

Este hallazgo se refuerza al considerar el coeficiente de correlación de Pearson, cuyo valor de -0.010 evidencia la inexistencia de una relación lineal significativa entre las exportaciones de concentrado de cobre y el AOD. Además, la prueba de hipótesis asociada arrojó un valor p de 0.9155 ($p > 0.05$), lo que impide rechazar la hipótesis nula de no correlación. En conjunto, estos resultados estadísticos confirman que la regresión lineal descarta cualquier vínculo directo entre la actividad portuaria y los niveles de aerosoles.

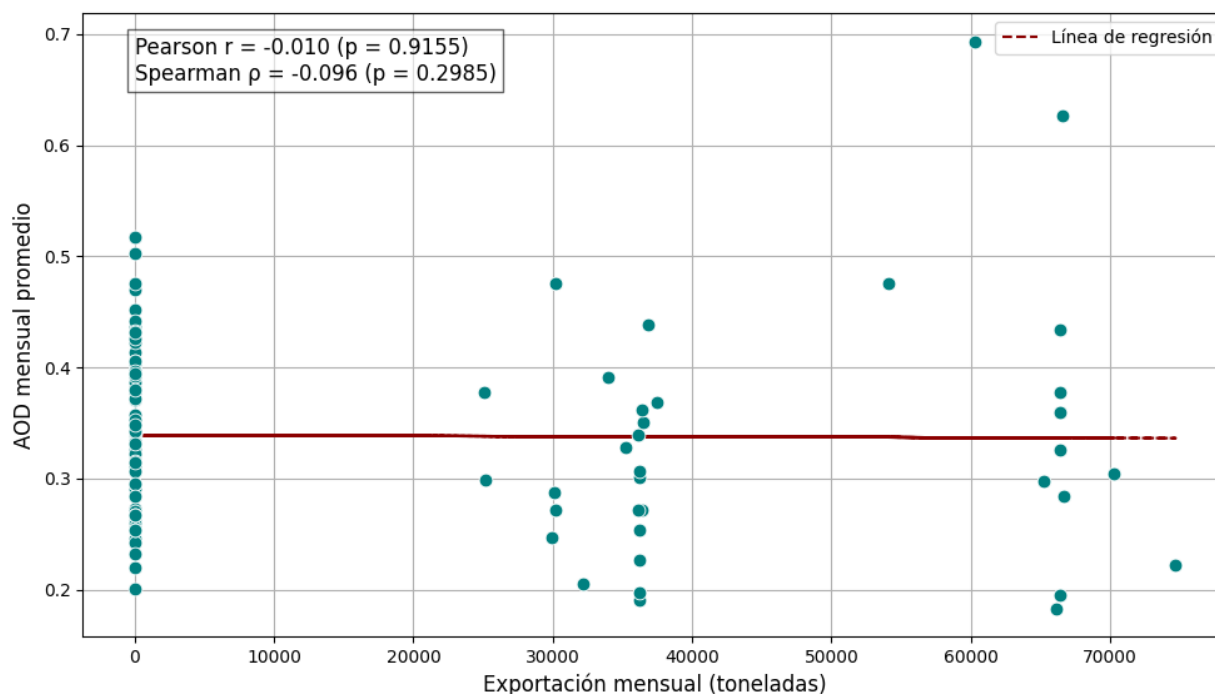


Fig. 21. Regresión lineal entre Exportación de cobre y AOD.

4) Correlación y significancia (Pearson)

De manera similar, el coeficiente de correlación de Spearman, utilizado para evaluar relaciones monótonas en series temporales, fue de -0.096 , lo que también indica una correlación prácticamente nula. Esta interpretación es consistente con el valor p obtenido (0.2985), que respalda la inexistencia de una relación monótona entre las variables analizadas representadas en la Tabla VII.

TABLA VII
Matriz de correlación y significancia (Pearson).

	AOD	Exportación	Significancia	N
AOD	1	-0.010	-	120
Exportación	-0.010	1	P=0.9155	120

5) Rosa de los vientos

Para estimar la posible pluma de contaminación generada por emisiones de material particulado en el área de estudio, se analizó la dirección y velocidad del viento de acuerdo con la estación más próxima, siendo esta la estación Granja Santa Inés. Permitiendo conocer que la tendencia que presenta el viento es en la dirección norte, con ligera influencia hacia el noreste y este. No obstante, la velocidad del viento predominante en la zona oscila entre 1 y 3.8 m/s, tal como se muestra en la Fig. 22. Esta velocidad resulta insuficiente para transportar el material particulado a largas distancias, lo cual sugiere que su impacto estaría principalmente restringido al entorno inmediato del puerto.

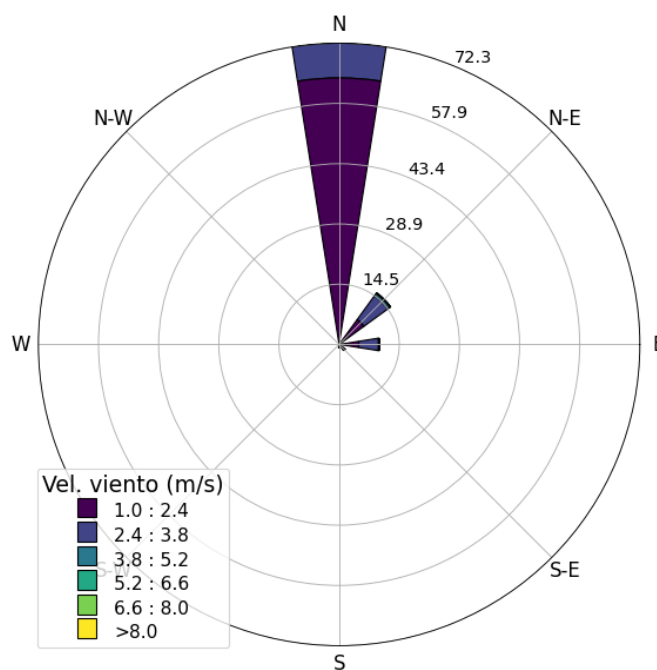


Fig. 22. Rosa de vientos ponderada por frecuencias

VIII. DISCUSIÓN

El análisis estadístico de la serie temporal del AOD se la realizó con diferentes modelos, siendo el primero la regresión segmentada, que permite identificar cambios de tendencia través del tiempo. El análisis de la regresión segmentada indica que no existe un punto de quiebre y por lo tanto señala una continuidad sin cambios de tendencia significativos. Cuando no se detecta cambio significativo se asume que la relación entre las variables permanece constante a lo largo del tiempo analizado [61]. La estabilidad relativa de los datos de AOD puede atribuirse a la constancia de las condiciones normales atmosféricas, en contraste, si bien no ocurre cambios abruptos, si existen variaciones considerables para los cuales se implementa otro enfoque como el modelo ARIMA.

La modelación con el método ARIMA se empleó para analizar la variación mensual de datos, evidenciando características de estacionariedad, ya que no se identificaron patrones de autocorrelación en la serie temporal. Esto sugiere que las fluctuaciones observadas entre los valores no responden a un patrón sistemático, sino que corresponden a variaciones estacionarias independientes. En concordancia con el estudio realizado por [62] que empleó el modelo ARIMA, el autor lo utilizó para predecir datos futuros de evapotranspiración y modelar variables necesarias para el estudio. Con esto, demostrando su utilidad, tanto como para pronosticar variables de interés, caracterizar datos temporales y comprender la distribución de esos datos a lo largo de una serie temporal.

El análisis para la regresión lineal no mostró una relación estadísticamente significativa entre las exportaciones de cobre y AOD así que impide rechazar la hipótesis nula de no correlación con la pendiente casi nula, la correlación de Pearson ($r = -0.010$) y el valor de $p = 0.9155$ ($p > 0.05$). Estos resultados se ajustan a lo que señala [63] ya que el aumento o disminución del AOD se influencia más por factores meteorológicos como la altura de la capa límite, la temperatura, etc., más no a la presencia de los concentrados de cobre.

En la evaluación de la dinámica atmosférica con la rosa de vientos, se identifica la orientación a la que se podrían dirigir los contaminantes, esta marca una influencia predominante hacia el norte, ligeramente hacia el noreste y este, con velocidades de hasta 3.8 m/s. Estos resultados determinan una dispersión limitada de los aerosoles, restringiendo su impacto a zonas próximas del puerto. El análisis coincide con el estudio de [54] en el que destaca que regiones con circulación de aire local débil dificultan su transporte, por lo tanto, que las partículas se intensifican en la fuente fija emisora del contaminante.

La detección de cambios en el comportamiento de la profundidad óptica de aerosoles resulta una técnica útil para obtener datos de la calidad ambiental, especialmente en regiones donde no existen sistemas de monitoreo *in situ*. En el presente estudio, se utilizó el producto satelital MCD19A2 que detecta la profundidad óptica de aerosol en una resolución espacial de 1 km. En comparación, otros productos como

el MOD04_3k que utiliza el algoritmo de aerosoles Dark Target (DT) con una resolución espacial de 3 km [64]. El producto MCD19A2, al integrar observaciones de los sensores Terra y Aqua, permite un control más refinado de la calidad de los datos, optimizando la estimación de la AOD en áreas con escaso monitoreo terrestre.

En el estudio de [64] realizado en Shandong en China se utilizó el producto MOD04_3k en el que presenta ciertas limitaciones, especialmente en las áreas con superficies brillantes o presencia frecuente de nubosidad, lo que genera errores en la detección precisa de aerosoles. Por consiguiente, el estudio reporta una marcada variabilidad estacional, con una mayor concentración de aerosoles en primavera y verano, y una disminución significativa en otoño e invierno. En contraste, en Ecuador no se observa esta variabilidad estacional pronunciada. A pesar de contar con una estación invernal, las condiciones climáticas no afectan la detección de aerosoles.

Para la estimación del material particulado PM_{2.5} a partir de la profundidad óptica de aerosoles (AOD) en el estudio realizado por [65] señala varias metodologías como los modelos de regresión estadística, la regresión lineal múltiple [66], el modelo de regresión ponderada geográficamente (GWR), la regresión de ponderación espaciotemporal geográfica y el modelo lineal de efectos mixtos. Siendo eficaces para estimar la cantidad de material particulado en el ambiente, sin embargo, el autor señala que presentan limitaciones importantes, especialmente al abordar la influencia de factores meteorológicos y características superficiales sobre la distribución del PM_{2.5}. De este modo, presenta un método que soluciona estas dificultades a través del aprendizaje automático (machine learning).

El método empleado por [65] requiere una densa red de monitoreo para su calibración y validación, el autor se apoya en una red de 775 estaciones de medición de PM_{2.5}. Esto podría limitar su aplicabilidad en regiones con escasa infraestructura de monitoreo. A pesar de ello, este método podría verse limitado en otras regiones del mundo que no tengan una robusta red de monitoreo. Sin embargo, el estudio deja como proxy válido el AOD para estimar el material particulado y siempre dependiendo de variables atmosféricas y geomorfológicas que pueden alterar esta correlación.

Como se señalaba anteriormente, el AOD es un proxy válido para tener un registro de la carga de aerosoles y la estimación posterior del PM_{2.5}, ya que el AOD sirve para representar la presencia de aerosoles en la atmósfera, y con ello se puede correlacionar con las concentraciones de las partículas en suspensión. Para mejorar esta relación es necesario ajustar el AOD con factores meteorológicos como la humedad relativa, temperatura y la presión atmosférica [67]. De este modo, el AOD se caracteriza por considerarse como una herramienta estratégica para el análisis multitemporal y espacial en países en vía de desarrollo,

siempre y cuando se tome en cuenta las limitaciones que conlleva y se utilice productos satelitales que puedan validarse y se ajuste con un buen filtro.

En el presente estudio se enmarca la relevancia del comportamiento espacio-temporal del aerosol a partir de datos satelitales, sin embargo, también señala que se ve restringido por no disponer datos *in situ* de Pm2.5. Esta falta de monitoreo en campo presenta limitaciones ya que impide validar y estimar valores reales del Pm2.5. A pesar de la rigurosidad de la depuración de los datos satelitales, realmente no se puede expresar con objetividad sobre las estimaciones de este aerosol y con el análisis de la serie temporal se reduce a un plano cualitativo más no cuantitativo, de esta forma no pudiendo señalar numéricamente la dimensión del impacto.

El riguroso filtrado del AOD para recopilar los datos mediante Google Earth Engine demuestra la minuciosidad en la selección de la información a analizar. Permitiendo recopilar el AOD sin ninguna alteración externa como la presencia de nubes que elevaría los niveles de AOD. Permitiendo tener una base de datos sólidos para que el análisis multitemporal sea más confiable y refuerce su validez en los resultados obtenidos para relacionarlos con la exportación de cobre y determinar su influencia.

El PM 2.5 es un contaminante perjudicial para el medio ambiente por su naturaleza higroscópica ya que este aerosol en altas condiciones de humedad absorbe el vapor de agua, incrementando su tamaño e interfiriendo en la recopilación de datos la profundidad óptica de aerosoles desde satélites. Entonces, al momento de querer obtener datos de AOD los valores pueden estar sobreestimados sin necesidad de que haya un incremento en la cantidad de sus partículas [68]. Este fenómeno se traduce en la reducción de la visibilidad del área urbana o zona de interés que se quiere muestrear, especialmente cuando la humedad relativa supera el 60-80% [69].

Por otro lado, en temporadas secas, el Pm2.5 se dispersa con más facilidad por presentar un clima seco, esto prolonga el tiempo en el que se mantiene en suspensión y se transporta con más facilidad hacia otras zonas distantes. Con este clima, no ocurre el efecto llamado “wet deposition” o la deposición de los aerosoles por efecto de la lluvia incrementando las concentraciones de PM2.5 [70]. Esto se evidencia en distintas regiones secas donde existen aumentos entre 2% y 15% en concentraciones de sulfatos y polvo fino [70]. En el caso del presente estudio el punto de muestreo analizado puede estar influenciado por esta característica de la estación seca y su dinámica con este contaminante, principalmente en los picos altos que presenta los meses finales de los años muestreados, específicamente de mayo a diciembre.

Otras variables meteorológicas también influyen en la concentración de PM2.5 tales como la velocidad y dirección del viento o la temperatura. Por ejemplo, las capas térmicas no permiten que el contaminante ascienda y se disperse, manteniendo el aerosol al nivel del suelo, mientras que con vientos

fuertes favorecen a la dispersión de estos. Los aerosoles en altos niveles de humedad favorecen a reacciones fotoquímicas para la conducción hacia nuevos aerosoles secundarios, incrementando fuertemente la carga de PM 2.5 [68].

IX. CONCLUSIONES

El comportamiento del material particulado en zonas portuarias está determinado por la interacción de factores atmosféricos, geográficos y antrópicos, lo que impide atribuirlo de manera exclusiva a las actividades de exportación de concentrado de cobre. Esta complejidad resalta la necesidad de fortalecer la investigación científica para desentrañar las contribuciones relativas de cada factor y su incidencia en la calidad del aire.

En el presente estudio se analizó la influencia de las exportaciones de concentrado de cobre sobre la concentración de aerosoles, utilizando datos satelitales de AOD del producto MCD19A2 de MODIS como sustituto de las mediciones *in situ*, ausentes en la zona de Puerto Bolívar. La depuración rigurosa de los datos en los cuadrantes, mediante filtrado de nubes con la banda AOD_QA, garantizó una serie de datos confiable para el periodo 2014–2024.

La aplicación de la prueba ADF muestra un estadístico de -9,1393 y un p de 0,000 confirmó la estacionariedad de las series temporales de AOD, sin evidencia de una tendencia ascendente o descendente clara. Estos resultados se reforzaron mediante la regresión segmentada y el modelo ARIMA, que no identificaron rupturas significativas ni cambios de régimen en los nueve cuadrantes estudiados. Asimismo, la regresión lineal entre los volúmenes exportados y el AOD arrojó un coeficiente de Pearson de -0,010, indicando ausencia de correlación estadísticamente significativa.

En ausencia de estaciones de monitoreo atmosférico *in situ*, la teledetección demostró ser una herramienta complementaria válida para evaluar la calidad del aire, especialmente en regiones con recursos limitados. La integración futura de datos satelitales y mediciones de campo permitirá modelar con mayor precisión la distribución del material particulado y diseñar estrategias de monitoreo ambiental más eficientes.

X. RECOMENDACIONES

Dentro de los hallazgos obtenidos, no se determina una relación directa entre las exportaciones de concentrado de cobre y los niveles de AOD, para mejorar la exactitud de lo expuesto se requiere calibrar las estimaciones satelitales con mediciones *in situ*. Para ello, resulta imprescindible instalar estaciones de monitoreo de PM_{2.5} y PM₁₀ en Puerto Bolívar, de manera que los registros de concentración de material particulado puedan cotejarse periódicamente con los valores de AOD derivados de MODIS. Este trabajo de validación permitirá confirmar la variabilidad estacional de los aerosoles y ajustar los algoritmos de procesamiento remoto para reflejar con mayor fidelidad las condiciones reales del aire.

Así mismo, aunque los modelos estadísticos aplicados (ARIMA, regresión lineal y segmentada) han sido útiles para caracterizar la dinámica del material particulado, su precisión podría incrementarse incorporando variables climáticas clave. La inclusión de series de precipitación, temperatura y humedad relativa en los análisis multivariantes ayudaría a explicar de forma más robusta las fluctuaciones estacionales propias de la región costera y a diferenciar mejor los efectos meteorológicos de aquellos atribuibles a fuentes antropogénicas.

Por último, si bien el producto MCD19A2 de MODIS ofrece una resolución de 1 km² adecuada para estudios de escala regional pero no resulta suficiente para identificar con detalle las zonas urbanas de mayor concentración de partículas. En consecuencia, se recomienda integrar otros productos satelitales y emplear técnicas de machine learning tales como redes neuronales, random forests o XGBoost que combinen datos *in situ* y de diferentes sensores. Este enfoque mixto permitirá generar mapas de contaminación de alta resolución y comprender con mayor profundidad la dinámica espacial del material particulado en entornos portuarios y urbanos.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. A. Aman, M. S. Salman, and A. P. Yunus, “COVID-19 and its impact on environment: Improved pollution levels during the lockdown period – A case from Ahmedabad, India,” *Remote Sens Appl*, vol. 20, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.rsase.2020.100382.
- [2] A. Chudnovsky, C. Tang, A. Lyapustin, Y. Wang, J. Schwartz, and P. Koutrakis, “A critical assessment of high-resolution aerosol optical depth retrievals for fine particulate matter predictions,” *Atmos Chem Phys*, vol. 13, no. 21, pp. 10907–10917, 2013, doi: 10.5194/acp-13-10907-2013.
- [3] ONU, “Objetivos y metas de desarrollo sostenible - Desarrollo Sostenible,” 17 objetivos para transformar nuestro mundo. Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [4] C. Villacres Rojas and I. Fierro Ulloa, “Diagnóstico de la cadena logística de exportación del banano ecuatoriano hacia estados unidos de américa,” *Saber, Ciencia y Libertad*, vol. 9, no. 1, pp. 77–90, Jan. 2014, doi: 10.18041/2382-3240/SABER.2014V9N1.1985.
- [5] G. G. Fogelbach *et al.*, “Contaminación atmosférica en América Latina: impacto en la salud Y regulación actual - reporte del grupo del Comité de Aerobiología de la Sociedad Latinoamericana de Asma, Alergia e Inmunología,” *Archivos de Asmas Alergia e Inmunologia*, vol. 4, no. 4, pp. 423–434, 2020, doi: 10.5935/2526-5393.20200064.
- [6] D. C. Husaini, K. Reneau, and D. Balam, “Air pollution and public health in Latin America and the Caribbean (LAC): a systematic review with meta-analysis,” *Beni Suef Univ J Basic Appl Sci*, vol. 11, no. 1, p. 122, Sep. 2022, doi: 10.1186/s43088-022-00305-0.
- [7] D. Toscano, “The Impact of Shipping on Air Quality in the Port Cities of the Mediterranean Area: A Review,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 14, no. 7, Jul. 2023, doi: 10.3390/atmos14071180.
- [8] KUNAK TECHNOLOGIES SL, “Control de la calidad del aire en los puertos, un factor que mejora la gestión y la imagen,” Control de la calidad del aire en los puertos, un factor que mejora la gestión y la imagen. Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://kunakair.com/es/calidad-aire-puertos-maritimos/>
- [9] A. Lyapustin, “MODIS Multi-Angle Implementation of Atmospheric Correct (MAIAC) Data User’s Guide Collection 6.1,” Nov. 2022.
- [10] “Población y Demografía |.” Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/>

- [11] M. Gager, T. Bartmann, M. Pinterits, and B. Ullrich, "European Union emission inventory report 1990-2019 under the UNECE Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (Air Convention)," Publications Office of the European Union, 2021. doi: 10.2800/701303.
- [12] D. Aguirre and F. Villa, "INFORME N146-2011 OEDA-DE," Llo, May 2011. Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://repositorio.oefa.gob.pe/handle/20.500.12788/937>
- [13] Y. Zhang *et al.*, "Association between PM10 and specific circulatory system diseases in China," *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, p. 12129, Jun. 2021, doi: 10.1038/s41598-021-91637-x.
- [14] G. Morantes, G. Rincon, A. Chanaba, and B. Jones, "Addressing air quality challenges: Comparative analysis of Barcelona, Venezuela, and Guayaquil, Ecuador," *Heliyon*, vol. 10, no. 8, Apr. 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e29211.
- [15] M. Neira, "Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease," World Health Organization, May 2016. Accessed: Jan. 31, 2025. [Online]. Available: https://www-who-int.translate.goog/publications/i/item/9789241511353?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=tc
- [16] M. Kampa and E. Castanas, "Human health effects of air pollution," *Environmental Pollution*, vol. 151, no. 2, pp. 362–367, Jan. 2008, doi: 10.1016/j.envpol.2007.06.012.
- [17] K. Jara and M. Lojan, "Estudio de la contaminación del aire ambiente por material particulado sedimentable en el casco urbano de la ciudad de Machala provincia de El Oro," UCuenca, Cuenca, 2023. Accessed: Jan. 31, 2025. [Online]. Available: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/40969>
- [18] B. Álvarez, À. Boso, and A. Vallejos-Romero, "Air pollution, well-being, and quality of life in Latin America: a systematic review," *Rev Iberoam Estud Desarro*, vol. 12, no. 2, pp. 236–260, Nov. 2023, doi: 10.26754/ojs_ried/ijds.846.
- [19] G. Rincon, G. Morantes, H. Roa-López, M. del P. Cornejo-Rodriguez, B. Jones, and L. V. Cremades, "Spatio-temporal statistical analysis of PM1 and PM2.5 concentrations and their key influencing factors at Guayaquil city, Ecuador," *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, vol. 37, no. 3, pp. 1093–1117, Mar. 2023, doi: 10.1007/s00477-022-02310-2.
- [20] D. Chuquer, S. Ampudia, P. Carolina, L. Bustamante, C. Reina, and F. Ramírez, "Contaminación del aire a filo de calle Espejo en Quito," *Perfiles*, vol. 2, pp. 90–99, Oct. 2018, doi: 10.47187/perf.v2i20.38.

- [21] Autoridad portuaria de Puerto Bolívar, “INFORME PRELIMINAR DE RENDICIÓN DE CUENTAS 2023,” Puerto Bolivar, 2023. Accessed: Jan. 31, 2025. [Online]. Available: <https://www.puertobolivar.gob.ec/rendicion-de-cuentas-2023/>
- [22] M. Sorek-Hamer *et al.*, “A Deep Learning Approach for Meter-Scale Air Quality Estimation in Urban Environments Using Very High-Spatial-Resolution Satellite Imagery,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 13, no. 5, May 2022, doi: 10.3390/atmos13050696.
- [23] S. M. Agudelo-Londoño, L. C. Blanco-Becerra, M. R. Hernández, Z. B. Suárez-Morales, L. C. Mantilla-León, and N. Solís, “Injusticia ambiental en la calidad del aire para repartidores de plataformas digitales de Bogotá, Colombia, 2021,” *Biomedica*, vol. 44, no. 3, pp. 391–401, Aug. 2024, doi: 10.7705/biomedica.7162.
- [24] D. Booker, G. Walker, P. J. Young, and A. Porroche-Escudero, “A critical air quality science perspective on citizen science in action,” *Local Environ*, vol. 28, no. 1, pp. 31–46, 2023, doi: 10.1080/13549839.2022.2118700.
- [25] M. E. Emeteri and M. O. Ahiara, “Air pollution Estimation Over Ponta,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 331, no. 1, p. 012069, Sep. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/331/1/012069.
- [26] A. Tao, “Analysis of Factors Affecting Air Quality in ChongQing City Based on Grey Relational Theory,” *IOP Conf Ser Earth Environ Sci*, vol. 233, no. 5, Feb. 2019, doi: 10.1088/1755-1315/233/5/052019.
- [27] S. E. Vázquez Arceo, M. del P. Ramírez Rivera, S. Arceo Díaz, and J. J. Solís Enríquez, “Eliminación de la contaminación por el bosque urbano en Las Palmas, Colima, México,” *Madera y Bosques*, vol. 29, no. 1, p. e2912460, Mar. 2023, doi: 10.21829/myb.2023.2912460.
- [28] OMS, “Miles de millones de personas siguen respirando aire insalubre: nuevos datos de la OMS,” Más de 6000 ciudades monitorean ya la calidad del aire. Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breathe-unhealthy-air-new-who-data>
- [29] F. D’Amico *et al.*, “Integrated Surface and Tropospheric Column Analysis of Sulfur Dioxide Variability at the Lamezia Terme WMO/GAW Regional Station in Calabria, Southern Italy,” *Environments*, vol. 12, no. 1, p. 27, Jan. 2025, doi: 10.3390/ENVIRONMENTS12010027/S1.
- [30] C. I. Rivera-Cárdenas and T. Arellano, “The Tula Industrial Area Field Experiment: Quantitative Measurements of Formaldehyde, Sulfur Dioxide, and Nitrogen Dioxide Emissions Using Mobile Differential Optical Absorption Spectroscopy Instruments,” *Pollutants*, vol. 4, no. 4, pp. 463–473, Oct. 2024, doi: 10.3390/POLLUTANTS4040031.

- [31] J. Seingeld and S. Pandis, *ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS*, 3rd, reimpresa ed. Hoboken: A Wiley-Interscience publication, 2016. Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available:
https://books.google.com.ec/books/about/Atmospheric_Chemistry_and_Physics.html?id=MfHbCwAAQBAJ&redir_esc=y
- [32] T. Tan *et al.*, “The Characteristics, Sources, and Health Risks of Volatile Organic Compounds in an Industrial Area of Nanjing,” *Toxics*, vol. 12, no. 12, p. 868, Dec. 2024, doi: 10.3390/TOXICS12120868.
- [33] H. Wang, C. He, R. L. Modini, W. Wang, H. Lu, and L. Morawska, “Mixing state of printer generated ultrafine particles: Implications for the complexity of indoor aerosols,” *Atmos Environ*, vol. 259, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.atmosenv.2021.118550.
- [34] F. Huang, W. Ma, S. Wang, C. Feng, X. Kong, and H. Liu, “Analysis and Validation of the Aerosol Optical Depth of MODIS Products in Gansu Province, Northwest China,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 12, Jun. 2023, doi: 10.3390/rs15122972.
- [35] J. C. Morales Hernández, A. L. Montes López, O. F. Martinez, B. Cruz Romero, C. L. González Mercado, and F. M. Carrillo González, “Contaminación del aire en Puerto Vallarta, México,” *Bitácora Urbano Territorial*, vol. 31, no. 2, pp. 27–43, Apr. 2021, doi: 10.15446/bitacora.v31n2.87800.
- [36] L. Odendaal, H. Quek, C. Cuní-López, A. R. White, and R. Stewart, “The Role of Air Pollution and Olfactory Dysfunction in Alzheimer’s Disease Pathogenesis,” *Biomedicines*, vol. 13, no. 1, p. 246, Jan. 2025, doi: 10.3390/BIOMEDICINES13010246.
- [37] A. Solé and A. Salzmann, “LA AGENDA 2030 Y LOS OBJETIVOS PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE. UNA MIRADA CRÍTICA SOBRE SU APORTACIÓN A LA GOBERNANZA GLOBAL EN TÉRMINOS DE JUSTICIA DISTRIBUTIVA Y SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL,” *Revista Española de Derecho Internacional*, vol. 69, pp. 279–285, 2017, Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.jstor.org/stable/26181621>
- [38] M. Elder and G. Ellis, “ASEAN countries’ environmental policies for the Sustainable Development Goals (SDGs),” *Environ Dev Sustain*, vol. 25, pp. 10975–10993, Jul. 2022, doi: 10.1007/s10668-022-02514-0.

- [39] P. Nakhle, I. Stamos, P. Proietti, and A. Siragusa, “Environmental monitoring in European regions using the sustainable development goals (SDG) framework,” *Environmental and Sustainability Indicators*, vol. 21, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.indic.2023.100332.
- [40] OPS, “Funciones esenciales de salud pública,” Las once funciones esenciales de la salud pública (FESP) para la Región las Américas: Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://www.paho.org/es/temas/funciones-esenciales-salud-publica>
- [41] Z. Ning *et al.*, “High altitude air pollution and respiratory disease: Evaluating compounded exposure events and interactions,” *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 285, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.ecoenv.2024.117046.
- [42] G. M. Masters and W. P. Ela, *Introducción a la ingeniería medioambiental*, Tercera Edición. Madrid: PEARSON EDUCACIÓN, S.A, 2008. [Online]. Available: www.pearsoneducacion.com
- [43] J. Lee, J. Jang, J. Im, and J. H. Lee, “GIS-Based Spatial Analysis and Strategic Placement of Fine Dust Alert Systems for Vulnerable Populations in Gangseo District,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 14, no. 22, Nov. 2024, doi: 10.3390/app142210610.
- [44] K. S. Barros, V. S. Vielmo, B. G. Moreno, G. Riveros, G. Cifuentes, and A. M. Bernardes, “Chemical Composition Data of the Main Stages of Copper Production from Sulfide Minerals in Chile: A Review to Assist Circular Economy Studies,” *Minerals*, vol. 12, no. 2, Feb. 2022, doi: 10.3390/min12020250.
- [45] N. Malhotra, T. R. Ger, B. Uapipatanakul, J. C. Huang, K. H. C. Chen, and C. Der Hsiao, “Review of copper and copper nanoparticle toxicity in fish,” *Nanomaterials*, vol. 10, no. 6, pp. 1–28, Jun. 2020, doi: 10.3390/nano10061126.
- [46] M. E. Berendsen, P. Hodza, and J. D. Hamerlinck, “Researching Student Interaction with GIS Software While Learning Spatial Concepts: Toward a Standard Measure of GIS Interaction,” *Journal of Geography*, vol. 122, no. 4, pp. 81–92, 2023, doi: 10.1080/00221341.2023.2220328.
- [47] A. X. Zhu, F. H. Zhao, P. Liang, and C. Z. Qin, “Next generation of GIS: must be easy,” *Ann GIS*, vol. 27, no. 1, pp. 71–86, 2021, doi: 10.1080/19475683.2020.1766563.
- [48] J. C. Martínez-Llario, S. Baselga, and E. Coll, “Accurate algorithms for spatial operations on the spheroid in a spatial database management system,” *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 11, no. 11, Jun. 2021, doi: 10.3390/app11115129.

- [49] K. Lin, Y. Shi, and H. Xu, “Can Grassroots Governments’ Environmental Attention Effectively Improve Air Pollution? Empirical Evidence from Satellite Remote Sensing Technology,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 21, Nov. 2023, doi: 10.3390/su152115309.
- [50] R. M. Navarro, P. González, Á. Varo, and A. Ariza, *Geociencias aplicadas a la gestión forestal*, Tercera edición. Córdoba: Editorial Universidad de Córdoba, 2024.
- [51] S. Ormeño, *TELEDETECCION FUNDAMENTAL*, Tercera edición. SOV ortofotos y modelos, 2006.
- [52] Y. Lin *et al.*, “An optimized machine learning approach to water pollution variation monitoring with time-series Landsat images,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 102, p. 102370, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jag.2021.102370.
- [53] J. A. Rodríguez Zas and J. A. García Reynoso, “Updating of the 2013 national emissions inventory for air quality modeling in central Mexico,” *Revista Internacional de Contaminacion Ambiental*, vol. 37, pp. 463–487, 2021, doi: 10.20937/RICA.53865.
- [54] R. M. Pascual Flores, “Impacto de las emisiones de aerosoles sobre las precipitaciones de los Andes Centrales,” 2019. Accessed: Feb. 06, 2025. [Online]. Available: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/81222>
- [55] Brandon Maccherone, “MODIS Web.” Accessed: Jan. 30, 2025. [Online]. Available: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/>
- [56] X. Yan *et al.*, “New global aerosol fine-mode fraction data over land derived from MODIS satellite retrievals,” *Environmental Pollution*, vol. 276, May 2021, doi: 10.1016/j.envpol.2021.116707.
- [57] “Aqua Earth-Observing Satellite Mission | Aqua Project Science,” Latest News from the Aqua Mission. Accessed: Feb. 07, 2025. [Online]. Available: <https://aqua.nasa.gov/>
- [58] J. S. Reid *et al.*, “A Coupled Evaluation of Operational MODIS and Model Aerosol Products for Maritime Environments Using Sun Photometry: Evaluation of the Fine and Coarse Mode,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 14, no. 13, p. 2978, Jun. 2022, doi: 10.3390/RS14132978.
- [59] Earth Engine Data Catalog, “MCD19A2.061: Terra & Aqua MAIAC Land Aerosol Optical Depth Daily 1km | Earth Engine Data Catalog | Google for Developers.” Accessed: May 18, 2025. [Online]. Available: https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/MODIS_061_MCD19A2_GRANULES?hl=es-419

- [60] Z. Cao *et al.*, “Evaluation and Comparison of Multi-Satellite Aerosol Optical Depth Products over East Asia Ocean,” *Toxics*, vol. 11, no. 10, Oct. 2023, doi: 10.3390/toxics11100813.
- [61] V. M. R. Muggeo, “Estimating regression models with unknown break-points,” *Stat Med*, vol. 22, no. 19, pp. 3055–3071, Oct. 2003, doi: 10.1002/sim.1545.
- [62] M. Phesa, N. Mbatha, and A. Ikudayisi, “MODIS Evapotranspiration Forecasting Using ARIMA and ANN Approach at a Water-Stressed Irrigation Scheme in South Africa,” *Hydrology*, vol. 11, no. 10, p. 176, Oct. 2024, doi: 10.3390/HYDROLOGY11100176.
- [63] M. Sorek-Hamer, R. Chatfield, and Y. Liu, “Review: Strategies for using satellite-based products in modeling PM_{2.5} and short-term pollution episodes,” *Environ Int*, vol. 144, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.envint.2020.106057.
- [64] S. Meng *et al.*, “Research on the Spatiotemporal Variation Characteristics of Different Aerosol Types and Aerosol Optical Depth Based on MODIS Data,” *Aerosol Air Qual Res*, vol. 24, no. 12, p. 240027, Dec. 2024, doi: 10.4209/AAQR.240027.
- [65] Z. Tian, J. Wei, and Z. Li, “How Important Is Satellite-Retrieved Aerosol Optical Depth in Deriving Surface PM_{2.5} Using Machine Learning?,” *Remote Sens (Basel)*, vol. 15, no. 15, p. 3780, Jul. 2023, doi: 10.3390/RS15153780.
- [66] P. Gupta and S. A. Christopher, “Particulate matter air quality assessment using integrated surface, satellite, and meteorological products: Multiple regression approach,” *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, vol. 114, no. 14, p. 14205, Jul. 2009, doi: 10.1029/2008JD011496.
- [67] A. Van Donkelaar, R. V. Martin, M. Brauer, and B. L. Boys, “Use of satellite observations for long-term exposure assessment of global concentrations of fine particulate matter,” *Environ Health Perspect*, vol. 123, no. 2, pp. 135–143, 2015, doi: 10.1289/ehp.1408646.
- [68] E. Zender-Świercz, B. Galiszewska, M. Telejko, and M. Starzomska, “The effect of temperature and humidity of air on the concentration of particulate matter - PM_{2.5} and PM₁₀,” *Atmos Res*, vol. 312, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.atmosres.2024.107733.
- [69] X. Sun, T. Zhao, D. Liu, S. Gong, J. Xu, and X. Ma, “Quantifying the influences of PM_{2.5} and relative humidity on change of atmospheric visibility over recent winters in an urban area of East China,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 11, no. 5, May 2020, doi: 10.3390/ATMOS11050461.
- [70] Y. Wang, Y. Xie, W. Dong, Y. Ming, J. Wang, and L. Shen, “Adverse effects of increasing drought on air quality via natural processes,” *Atmos Chem Phys*, vol. 17, no. 20, pp. 12827–12843, Oct. 2017, doi: 10.5194/acp-17-12827-2017.