



scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico

233 - 245



ARTÍCULO
Científico

Simulación de la Difusión de PM_{2.5}, PM₁₀ y SO₂ en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Modeling PM_{2.5}, PM₁₀, and SO₂ Dispersion in Two Huamachuco Mining Zones Using the HYSPLIT Model

Pedro Amilcar Custodio Laiza (Autor Corresponsal)

pcustodio@unitru.edu.pe



ORCID: 0000-0002-2627-470X

Universidad César Vallejo, Lima, Perú

Aceptación: 26 de mayo de 2025

Publicación: 30 de junio de 2025

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo analizar la simulación de la difusión de contaminantes atmosféricos generados por actividades mineras en Cerro El Toro y La Arena, ubicadas en Huamachuco, Perú, durante el año 2022. Se empleó un enfoque cuantitativo con diseño descriptivo, transversal y tipo de investigación aplicada. La técnica utilizada fue la observación indirecta mediante el procesamiento de datos atmosféricos en el modelo HYSPLIT, lo que permitió estimar la trayectoria, superficie y distancia alcanzada por los contaminantes PM_{2.5}, PM₁₀ y SO₂. Los resultados mostraron que la dirección del viento predominante fue de este a oeste. En ambos casos, las concentraciones de contaminantes superaron los valores de referencia nacionales, alcanzando distancias menores a 7.84 km y superficies de hasta 1,904 ha. En Cerro El Toro se evidenció un mayor impacto sobre zonas pobladas, mientras que en La Arena los efectos se limitaron al ecosistema circundante. Se concluye que la difusión de estos contaminantes constituye un riesgo potencial para la salud pública y el ambiente, especialmente en áreas habitadas próximas a operaciones mineras sin monitoreo atmosférico permanente.

Palabras clave: Contaminación Atmosférica; Simulación; HYSPLIT; Minería; Huamachuco

Abstract

This study aimed to analyze the simulation of atmospheric pollutant dispersion generated by mining activities at Cerro El Toro and La Arena, located in Huamachuco, Peru, during 2022. A quantitative approach with a descriptive, cross-sectional design and applied research type was employed. The technique used was indirect observation through the processing of atmospheric data in the HYSPLIT model, enabling the estimation of the trajectory, area, and distance reached by PM_{2.5}, PM₁₀, and SO₂ pollutants. Results showed the predominant wind direction was from east to west. In both cases, pollutant concentrations exceeded national reference values, reaching distances less than 7.84 km and areas up to 1,904 ha. Cerro El Toro demonstrated a greater impact on populated areas, while at La Arena, the effects were confined to the surrounding ecosystem. It is concluded that the dispersion of these pollutants constitutes a potential risk to public health and the environment, especially in inhabited areas near mining operations lacking permanent atmospheric monitoring.

Keywords: Atmospheric Pollution; Simulation; HYSPLIT; Mining; Huamachuco

Simulación de la Difusión de PM_{2.5}, PM₁₀ y SO₂ en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Pedro Amilcar Custodio Laiza

ORCID: 0000-0002-2627-470X

<https://revista.scienceevolution.com>





scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico
233 - 245

Simulación de la Difusión de PM_{2.5}, PM₁₀ y SO₂ en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Pedro Amílcar Custodio Laiza

ORCID: 0000-0002-2627-470X

<https://revista.scienceevolution.com>



Introducción

La exposición a contaminantes atmosféricos representa un grave riesgo para la salud humana, el medio ambiente y la economía, ya que, según la [Organización Mundial de la Salud \(OMS, 2024\)](#), la contaminación del aire exterior causa aproximadamente 4.2 millones de muertes prematuras anuales debido a enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer, asociadas principalmente a partículas finas (PM_{2.5}); además, esta contaminación afecta al hábitat, contribuye a la pérdida de productividad y genera costos económicos significativos, especialmente en zonas urbanas y rurales donde no se cumplen los estándares de calidad del aire. En esa línea, el [Office of Environmental Health Hazard Assessment \(OEHHA, s.f.\)](#) del Estado de California en Estados Unidos, la materia particulada o PM (por sus siglas en inglés) 2.5 son partículas muy pequeñas en el aire que tienen un diámetro de 2.5 micrómetros (aproximadamente 1 diezmilésimas de pulgada), lo que equivale a un grosor inferior al de un cabello humano; para la [United States Environmental Protection Agency \(EPA, s.f.\)](#), las partículas son uno de los seis criterios de contaminantes del aire, y estas PM son una mezcla que puede incluir sustancias químicas orgánicas, polvo, hollín y metales, con fuentes comunes como los automóviles, camiones, fábricas, quema de madera y otras actividades.

En el contexto peruano, Lima Metropolitana, Perú, las concentraciones de material particulado PM_{2.5} han superado repetidamente los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire; norma emitida según Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM ([Ministerio del Ambiente del Perú \[MINAM\] 2017](#)). Los datos del Informe Nacional sobre el Estado del Ambiente 2014-2019 ([MINAM, 2020](#)), durante ese periodo los niveles anuales de PM_{2.5} en la capital peruana oscilaron entre 25 y 30 µg/m³, valores que duplican el límite recomendado por la OMS (15 µg/m³ como promedio anual); estas altas concentraciones están asociadas a fuentes como el parque vehicular, la industria y las condiciones geográficas de la ciudad, que favorecen la acumulación de contaminantes, y el monitoreo evidencia la necesidad urgente de políticas públicas para reducir la exposición de la población a este contaminante, vinculado con enfermedades respiratorias y cardiovasculares. Aunque, durante el estado de emergencia por la COVID-19, se observó una mejora significativa en la calidad del aire en Lima, con reducciones en las concentraciones de material particulado (PM₁₀ y PM_{2.5}) debido a la disminución de actividades industriales y vehiculares; sin embargo, se advierte que en condiciones normales, en ciudades como Lima frecuentemente se superan los límites permisibles de contaminación atmosférica establecidos por los ECA, lo que representa un riesgo para la salud pública, especialmente en áreas con alta densidad poblacional y tráfico vehicular intenso ([Municipalidad de Lima, 2020](#)).

A diferencia del entorno urbano, en las zonas mineras Cerro el Toro y La Arena en Huamachuco, Perú, los contaminantes como el material particulado (PM_{2.5}, PM₁₀) y el dióxido de azufre (SO₂) superan los límites máximos permisibles, afectando tanto a comunidades cercanas como a ecosistemas vulnerables; estudios previos evidencian que la minería en Cerro de Pasco, por ejemplo, ha generado contaminación en agua, suelo y aire, con concentraciones peligrosas de metales pesados como plomo y arsénico ([Collyns, 2024](#)); sin embargo, en Huamachuco, la falta de un sistema efectivo de monitoreo y control de la dispersión aérea agrava el riesgo para la salud pública y el medio ambiente, destacando la urgencia de implementar medidas de mitigación y vigilancia ambiental.

En términos generales, la contaminación atmosférica se define como la alteración del aire debido a emisiones industriales, en este caso, generadas por actividades mineras que liberan material particulado (PM₁₀, PM_{2.5}) y gases tóxicos como el dióxido de azufre (SO₂); estas emisiones deterioran la calidad ambiental y representan un riesgo significativo para la salud humana, especialmente en lo que respecta a enfermedades respiratorias y cardiovasculares, y según la [Organización Mundial de la Salud \(OMS, 2024\)](#), la exposición prolongada a estos contaminantes está asociada con millones de muertes prematuras anuales, lo que destaca la urgencia de implementar medidas de control y monitoreo en zonas afectadas por operaciones industriales.

Las fracciones sólidas o líquidas en suspensión, conocidas como material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), representan un riesgo significativo para la salud debido a su capacidad de ingresar al sistema respiratorio, ya que las partículas PM_{2.5}, con un diámetro menor a 2.5 micras, pueden alcanzar los alvéolos pulmonares e incluso ingresar al torrente sanguíneo, mientras que las PM₁₀ (diámetro ≤10 micras) se depositan en las vías respiratorias superiores; su composición heterogénea, que incluye metales pesados, sulfatos y carbono negro, está asociada con enfermedades cardiopulmonares, cáncer y mortalidad prematura, especialmente en poblaciones expuestas a altas concentraciones ([Chandra Joshi, 2025](#)).

Además, el material particulado (PM) consiste en fracciones sólidas o líquidas suspendidas en el aire, clasificadas según su tamaño en PM₁₀ (diámetro ≤10 µm) y PM_{2.5} (diámetro ≤2.5 µm); estas partículas pueden penetrar profundamente en el sistema respiratorio, llegando a los alvéolos pulmonares e



scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico
233 - 245

Simulación de la Difusión de PM_{2.5}, PM₁₀ y SO₂ en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Pedro Amílcar Custodio Laiza

ORCID: 0000-0002-2627-470X

<https://revista.scienceevolution.com>



incluso al torrente sanguíneo, lo que las asocia con efectos severos en la salud, como enfermedades cardiovasculares, respiratorias y aumento de la mortalidad prematura, y su composición heterogénea, que incluye metales pesados, sulfatos y carbono negro, potencia su toxicidad, especialmente en contextos de alta exposición como zonas mineras o urbanas con tráfico vehicular intenso ([Thangavel, 2022](#)).

Por su parte, el SO₂ es un gas tóxico incoloro que se genera principalmente por la combustión de combustibles fósiles y procesos industriales; en concentraciones elevadas, contribuye a la formación de lluvia ácida, afectando ecosistemas y estructuras, además de causar daños pulmonares y cardiovasculares en la población expuesta ([Swartz et al., 2020](#)).

En ese marco, el Modelo HYSPLIT es un sistema híbrido lagrangiano-euleriano utilizado para simular trayectorias y dispersión de contaminantes en la atmósfera; desarrollado inicialmente en la década de 1980, combina un marco de referencia móvil que sigue parcelas de aire (lagrangiano) con una malla fija tridimensional para calcular concentraciones de contaminantes (euleriano), y ha sido validado y aplicado operativamente por NOAA en diversos escenarios, como liberaciones de materiales radiactivos, cenizas volcánicas, incendios forestales y estudios climatológicos; su versatilidad y precisión lo han consolidado como una herramienta esencial para agencias gubernamentales, investigadores y gestores de emergencias ([Rolph et al. 2017](#)). Asimismo, el Modelo HYSPLIT destaca por su capacidad para integrarse con herramientas de visualización geográfica como Google Earth, facilitando la representación de resultados en formatos estandarizados como KML. Este enfoque permite superponer datos de inventarios de emisiones con simulaciones de dispersión, lo que mejora la interpretación y aplicación en gestión ambiental y emergencias. Además, HYSPLIT ha sido adaptado para funcionar en dispositivos móviles, ampliando su accesibilidad y utilidad en campo. Su interoperabilidad con sistemas de información geográfica (GIS) y su uso en estudios como la dispersión de cenizas volcánicas o contaminantes industriales refuerzan su relevancia en la investigación y la toma de decisiones ([Ortínez-Álvarez, 2021](#)).

Con relación a ello, [Cruz Núñez y Bulnes Aquino \(2019\)](#) simularon la difusión de PM_{2.5} por incendios forestales y determinaron que, aunque no hubo afectación directa a la población, sí se dañó el ecosistema. Por otro lado, [Bera et al. \(2022\)](#) identificaron la relación entre altos niveles de PM y el incremento de muertes por COVID-19 en ciudades contaminadas. Mientras, [Ambastha y Haritash \(2022\)](#), evaluaron cómo la extracción minera emite PM₁₀ y PM_{2.5} que alcanzan distancias de hasta 40 km y afectan a trabajadores y población. También, [Shikwambana et al. \(2021\)](#), analizaron la quema de caña de azúcar y cómo las columnas contaminantes alcanzan hasta 6,600 km afectando países vecinos.

No obstante, la mayoría de estudios se centra en incendios o contextos urbanos; hay poca evidencia regional sobre la difusión de contaminantes por minería en zonas altoandinas como Huamachuco, La Libertad, Perú. Por consiguiente, la presente investigación aporta evidencia empírica local utilizando un modelo validado, en un territorio sin monitoreo oficial continuo. Su objetivo general del estudio es analizar la simulación de la difusión de contaminantes atmosféricos generados por las actividades mineras en Cerro el Toro y La Arena, Huamachuco – 2022. Entre los objetivos específicos, se encuentran: determinar los efectos del PM₁₀, PM_{2.5} y SO₂ en la simulación de la difusión de contaminantes atmosféricos, determinar la superficie afectada por la difusión de contaminantes atmosféricos en ambas zonas mineras y estimar la distancia alcanzada por los contaminantes atmosféricos simulados desde las zonas mineras.

Método

Enfoque Metodológico

El estudio se aplicó bajo un enfoque cuantitativo-descriptivo, con un diseño transversal y aplicado, porque combinó el análisis de datos numéricos y modelamiento, la descripción de un fenómeno en un momento específico y la aplicación práctica para solucionar un problema ambiental; este enfoque es empleado de manera recurrente en investigaciones ambientales que requieren evaluar impactos puntuales mediante herramientas tecnológicas y métricas objetivas.

Diseño de Estudio

El diseño fue el descriptivo transversal, porque este permite recopilar datos en un momento específico para evaluar la prevalencia, los efectos y la magnitud en una población durante un período definido. Este enfoque, caracterizado por ser rápido, económico y eficiente para obtener muestras y resultados inmediatos ([Cvetkovic Vega et al., 2021](#)), se aplica en esta investigación con el propósito de

analizar la simulación de la dispersión de contaminantes atmosféricos y su impacto en ciudades aledañas al área de estudio dentro de un intervalo temporal determinado.

Tipo de Estudio

Esta investigación aplicada, fundamentada en evidencia científica e implementación innovadora de tecnología, aborda problemáticas colectivas mediante soluciones prácticas ([Hernández-Carrillo et al., 2018](#)); se destaca por su enfoque en la optimización de procesos, mejorando la eficiencia y la calidad ([Ramos Díaz et al., 2021](#)), y aporta significativamente al monitoreo de contaminantes atmosféricos, al analizar su interacción con variables meteorológicas como la dirección, la dispersión y las concentraciones en áreas urbanas adyacentes.

Población y Muestra

El estudio se centra en evaluar la influencia de la minería en el Cerro el Toro y La Arena sobre la población de Huamachuco, Perú, utilizando el modelo HYSPLIT para analizar la dispersión de contaminantes (PM_{2.5}, PM₁₀ y SO₂). Se consideraron variables como coordenadas UTM, altura, condiciones meteorológicas y características del área, aplicando un muestreo dirigido en puntos críticos cercanos a los tajos mineros. La investigación, de enfoque cuantitativo, requirió datos precisos y representativos para modelar el impacto ambiental, siguiendo metodologías validadas en estudios previos por [Ferrero et al. \(2019\)](#) y [Hernández-Garcés et al. \(2016\)](#).

Técnicas de Recolección de Datos

La técnica empleada fue la observación de superficies meteorológicas, para lo cual se utilizaron recursos bibliográficos como libros, tesis y artículos científicos, así como la revisión de estudios ambientales, documentos provenientes de páginas web como SENAMHI y MINAM, además de recursos informáticos como Internet, Google Earth, HYSPLIT y mapas meteorológicos.

Instrumentos

Cuaderno con notas, fichas, registro de datos, registro de comentarios existente, estos datos se emplearán para el programa Hysplit, en siguiente registro se llenará dicha información.

Tabla 1
Registro de datos

N°	Ubicación Minería.	Coordenadas UTM (Longitud, Latitud)	Fecha	Altura (m)	Periodo (horas)	Flujo másico contaminante*			Superficie del contaminante (m ²)	Longitud de contaminante (m)
						PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂		
1	Cerro el Toro.									
2	La Arena.									

En la Tabla 1 se recopiló la información necesaria para el estudio, la cual posteriormente fue incorporada al modelo HYSPLIT. Como parte de la investigación, se utilizaron datos de ubicación de las minas Cerro el Toro y La Arena, los cuales fueron ingresados en la plataforma HYSPLIT-NOAA (Imagen 1), donde se procesaron todos los parámetros requeridos para evaluar la dispersión de contaminantes. Este enfoque permitió visualizar y analizar los resultados directamente en herramientas como Google Earth, lo que facilitó la interpretación de los impactos ambientales. Los pasos para ingresar al [HYSPLIT \(2025\)](#) fueron:

- Ingresar a la página: <https://www.ready.noaa.gov/index.php>
- Ejecutar el modelo de trayectoria HYSPLIT (no es necesario registrarse)
- Seleccionar dispersión del archivo informático
- Determinar el tipo de lanzamiento: Material Desconocido (Masa Genérica, < 24 hrs)
- Seleccionar Meteorología: GDAS (1 grado, global, 2006-presente)
- Cerrar Limitaciones de HYSPLIT
- Ingresar coordenadas UTM (Latitud y Longitud)
- Configurar en opciones avanzadas: Si; ingresar Parámetros del término fuente; Parámetros de tiempo de ejecución; Opciones avanzadas; Opciones de pantalla.
- Solicitar ejecución de dispersión para obtener los resultados.



scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico
233 - 245

Simulación de la Difusión de PM_{2.5}, PM₁₀ y SO₂ en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Pedro Amilcar Custodio Laiza

ORCID: 0000-0002-2627-470X

<https://revista.scienceevolution.com>



Imagen 1
Plataforma de la NOAA



Análisis de Datos

La indagación alcanzada contempló la creación de la base de datos, la cual fue cargada posteriormente en el programa HYSPLIT; la información obtenida durante este proceso se comparó con los valores de calidad del aire establecidos por los Estándares de Calidad Ambiental (ECA). El modelo HYSPLIT permitió calcular trayectorias simples del aire y realizar simulaciones complejas de esparcimiento de contaminantes, utilizando un procedimiento de sistematización basado en el método lagrangiano, donde el aire se desplaza dentro de un espacio determinado para resolver procesos de difusión y advección, complementado por el enfoque euleriano. Este modelo integra información geográfica y requiere únicamente datos meteorológicos relacionados con el viento, los cuales son proporcionados por el sistema Global Forecast System (GFS) de la NOAA. A continuación, se presenta la información procesada en el programa HYSPLIT utilizando el registro correspondiente (Tabla 1).

Resultados

Imagen 2
Superficie alcanzada de la difusión del PM_{2.5}, minería Cerro el Toro

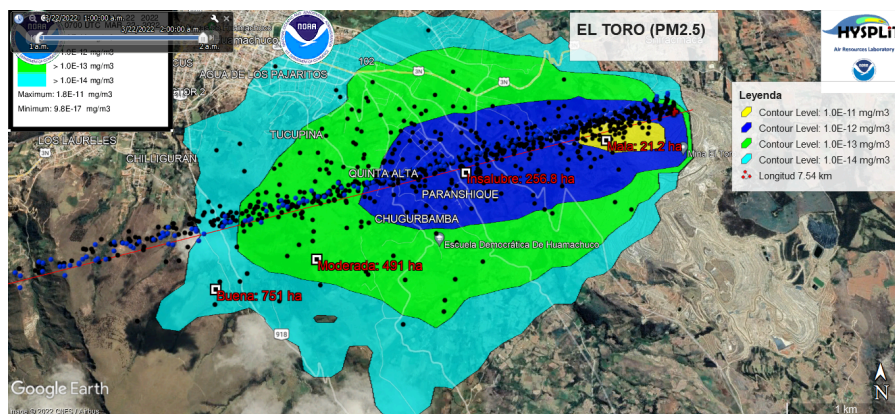
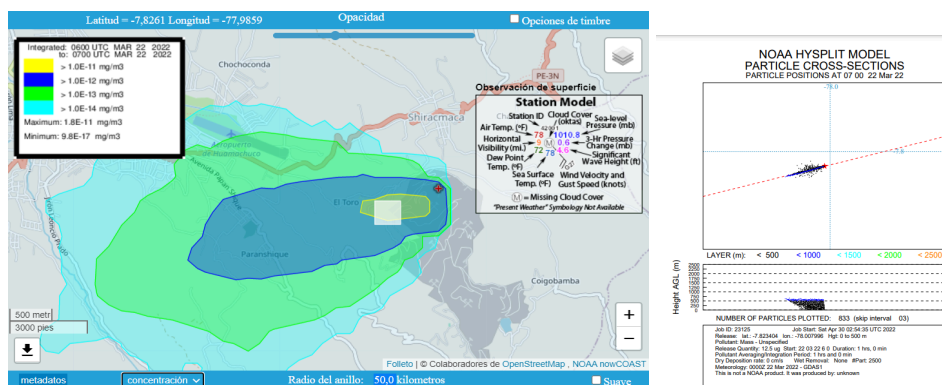


Imagen 3
Longitud de la difusión del PM_{2.5}, minería Cerro el Toro





scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico
233 - 245

Simulación de la Difusión de PM2.5, PM10 y SO2 en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Pedro Amilcar Custodio Laiza

ORCID: 0000-0002-2627-470X

<https://revista.scienceevolution.com>



En las Imágenes 2 y 3 se presenta la simulación de la dispersión de PM2.5 desde la minería del cerro El Toro, donde la dirección predominante del viento, de este a oeste, determina el patrón de afectación. Las concentraciones superiores a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, consideradas perjudiciales para la salud, cubren una superficie de 21.2 hectáreas hasta una distancia de 0.77 km desde el punto de emisión. El estado insalubre para grupos sensibles afecta 256.8 hectáreas, incluyendo localidades como Paranshique y Chugurgamba en un radio de 3.16 km, mientras que la calidad del aire clasificada como moderada abarca 491 hectáreas (4.36 km) y la calidad buena comprende 751 hectáreas (5.15 km). El impacto total alcanza 1,520 hectáreas con un radio máximo de 7.54 km, lo que evidencia la amplia influencia de las emisiones procedentes de la actividad minera.

Imagen 4

Superficie alcanzada en la difusión del PM₁₀, minería Cerro el Toro

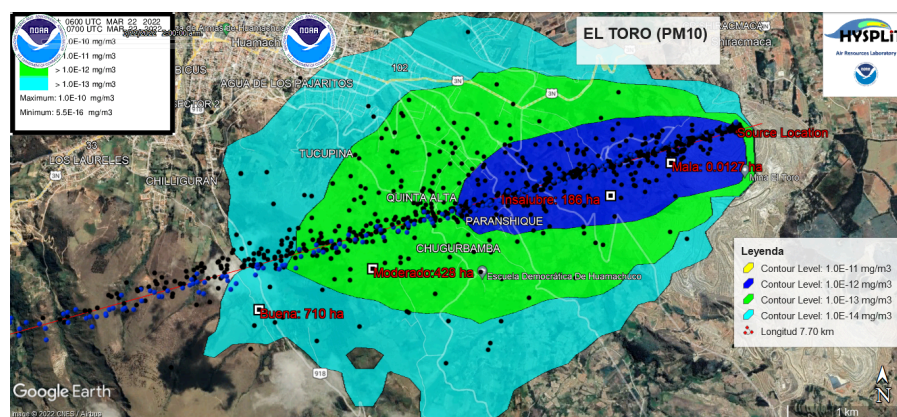
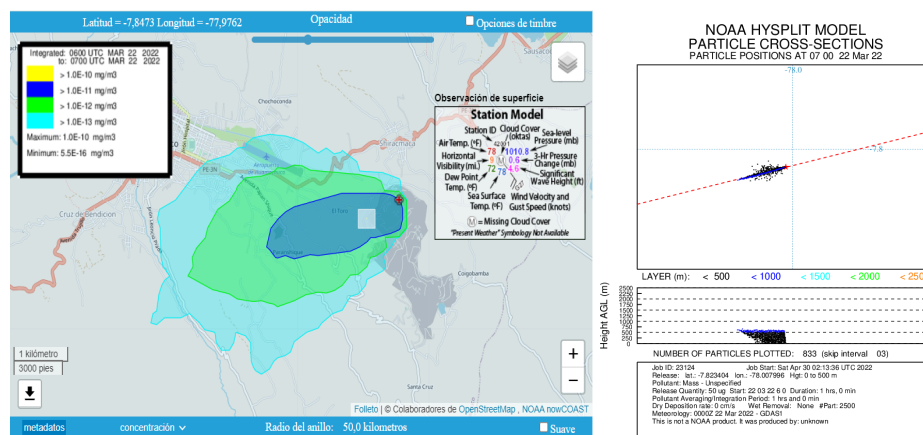


Imagen 5

Longitud de la difusión del PM₁₀, minería Cerro el Toro



En las imágenes 4 y 5 se muestra la simulación de la dispersión del PM10 desde la minera Cerro El Toro, con dirección predominante de este a oeste. Las concentraciones superiores a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$, consideradas perjudiciales para la salud, abarcan una superficie de 0.0127 ha y se extienden hasta 0.87 km desde el punto de emisión. El estado insalubre para grupos sensibles afecta un área de 186 ha, incluyendo zonas como Paranshique y Chugurgamba, dentro de un radio de 2.94 km; por su parte, la calidad del aire catalogada como moderada se extiende sobre 428 ha en un radio de 4.27 km, y la calidad buena abarca 710 ha hasta una distancia de 5.95 km. En conjunto, el impacto máximo del PM10 alcanza una superficie de 1,324 ha y una distancia de 7.70 km desde el origen.



scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico
233 - 245

Simulación de la Difusión de PM2.5, PM10 y SO2 en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Pedro Amilcar Custodio Laiza

ORCID: 0000-0002-2627-470X

<https://revista.scienceevolution.com>



Imagen 6

Superficie alcanzada de la difusión del SO₂, minería Cerro el Toro

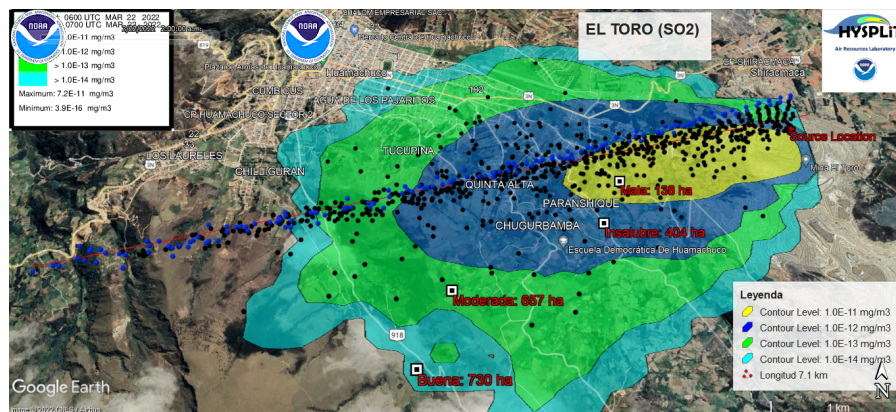
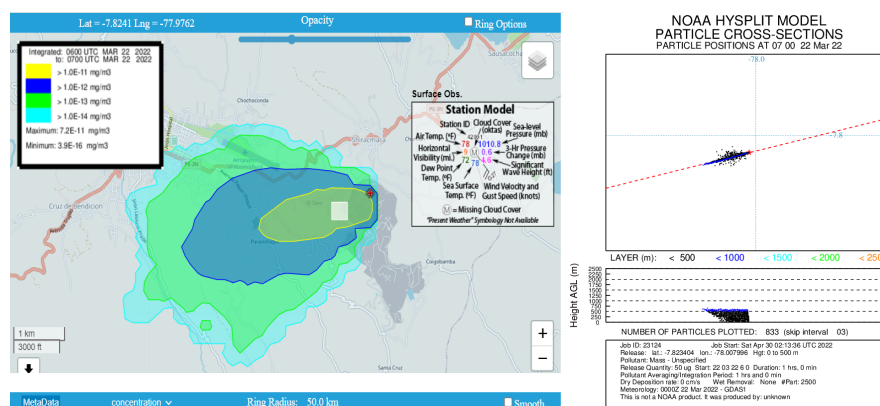


Imagen 7

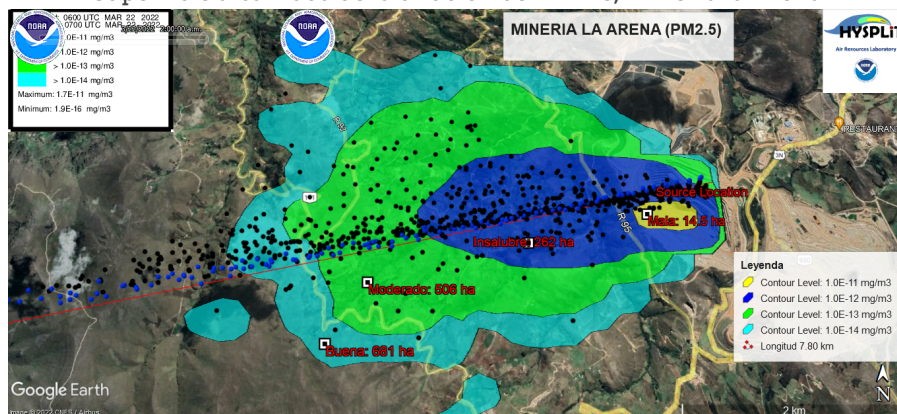
Longitud de la difusión del SO₂, minería Cerro el Toro



En las imágenes 5 y 6 se presenta la simulación de la difusión de contaminantes atmosféricos desde la minería de Cerro el Toro, evidenciándose una dirección del aire que va de este a sur a oeste. Los niveles de SO₂ superan los 250 µg/m³, lo que clasifica la calidad del aire como mala para la salud y afecta un área de 138 hectáreas, con un alcance de 2.23 km. Asimismo, el estado insalubre para grupos sensibles abarca una superficie de 404 ha y una distancia de 3.77 km, impactando a poblaciones cercanas como Paranshique, Chugurgamba y La Quinta Alta. La calidad del aire considerada moderada se extiende por 657 ha y 4.68 km, mientras que la zona con buena calidad del aire cubre 730 ha y alcanza una distancia de 5.35 km, sin llegar a afectar a la ciudad de Huamachuco. En total, el área máxima impactada por el SO₂ es de 1,904 hectáreas, con una distancia de dispersión que alcanza hasta 7.1 km.

Imagen 8

Superficie alcanzada de la difusión del PM2.5, minería la Arena





scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico
233 - 245

Simulación de la Difusión de PM2.5, PM10 y SO2 en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Pedro Amílcar Custodio Laiza

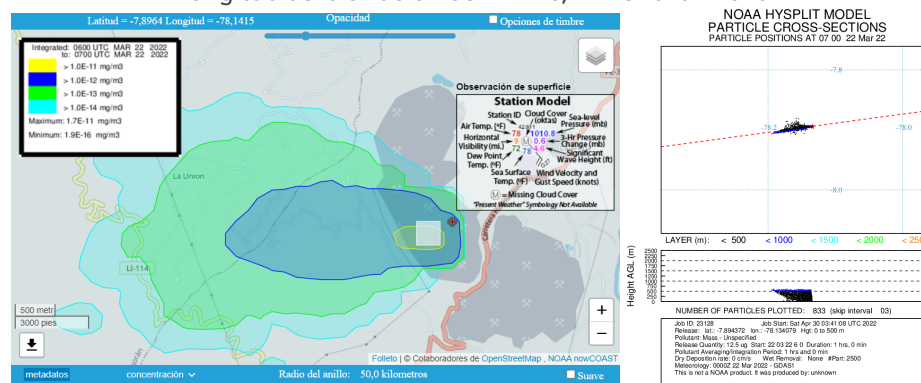
ORCID: 0000-0002-2627-470X

<https://revista.scienceevolution.com>



Imagen 9

Longitud de la difusión del PM2.5, minería la Arena



En las Imágenes 8 y 9, la simulación de la difusión de contaminantes atmosféricos en una zona minera muestra que la dirección del viento predominante es de este a oeste. Las partículas PM_{2.5}, con concentraciones superiores a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y consideradas perjudiciales para la salud, cubren un área de 14.5 ha y se extienden hasta 0.77 km desde el origen; en niveles insalubres para grupos sensibles, el área afectada se incrementa a 262 ha, con un radio de 2.88 km, sin impacto en población cercana pero con afectación a la flora y fauna local. La calidad del aire catalogada como moderada abarca 506 ha (4.18 km), mientras que la calidad buena alcanza 681 ha (5.26 km), siendo el área total máxima afectada por PM_{2.5} de 1,463 ha, con un radio de dispersión de hasta 7.80 km.

Imagen 10

Superficie alcanzada de la difusión del PM10, minería la Arena

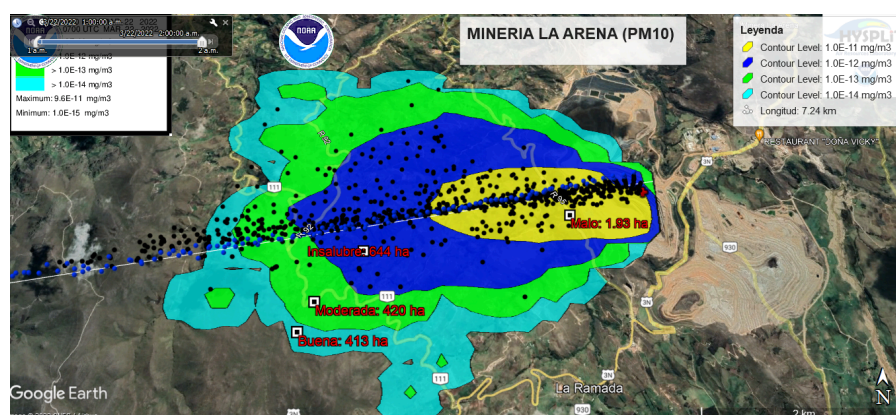
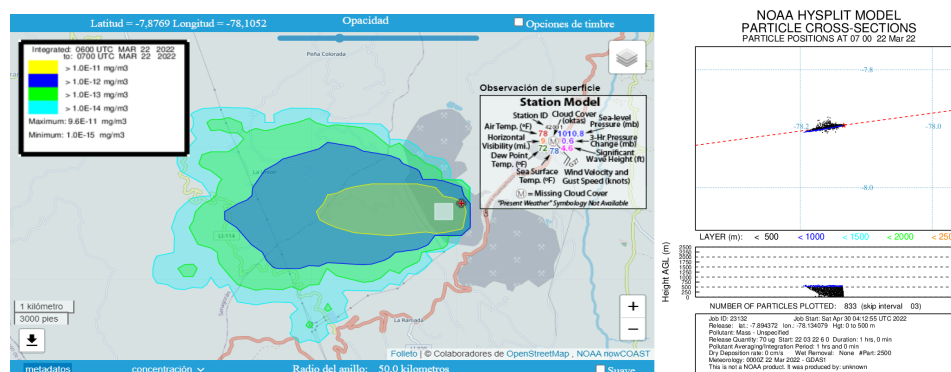


Imagen 11

Longitud de la difusión del PM10, minería la Arena



En las Imágenes 10 y 11 se presenta la simulación de la dispersión de PM10 desde la minería La Arena, donde la dirección predominante del viento es de este a oeste. Las concentraciones superiores a 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, consideradas perjudiciales para la salud, cubren un área de 1.93 ha y se extienden hasta 2.47 km desde el origen. Aunque se identificó un estado insalubre para grupos sensibles en 644 ha, no hubo impacto poblacional al no existir comunidades en un radio de 4 km. La calidad del aire moderada



scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico
233 - 245

Simulación de la Difusión de PM_{2.5}, PM₁₀ y SO₂ en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Pedro Amílcar Custodio Laiza

ORCID: 0000-0002-2627-470X

<https://revista.scienceevolution.com>



abarcó 420 ha (4.62 km de alcance), mientras que la buena calidad alcanzó 413 ha (5.48 km). En total, el PM₁₀ afectó un área máxima de 1,478.93 ha, con una distancia máxima de dispersión de 7.24 km.

Imagen 12

Superficie alcanzada de la difusión del SO₂, minería la Arena

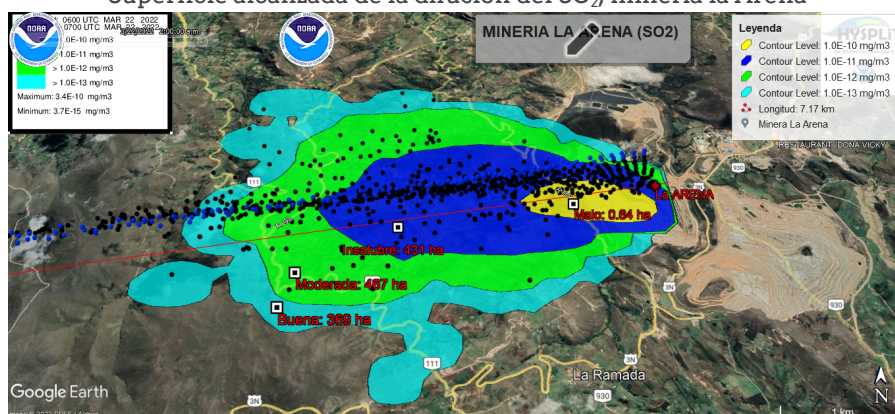
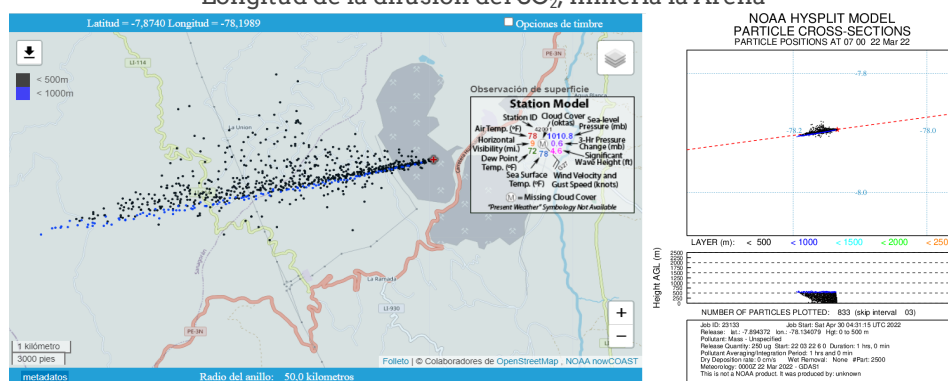


Imagen 13

Longitud de la difusión del SO₂, minería la Arena



En las Imágenes 12 y 13 se observa la simulación de la dispersión de contaminantes atmosféricos generados por la minería de arena, donde la dirección del viento predominante es de este a suroeste. Los niveles de SO₂ superan los 250 µg/m³, lo que representa un estado de calidad del aire perjudicial para la salud, afectando un área de 0.64 hectáreas y extendiéndose hasta 1.37 km. Además, se identificó una zona insalubre para grupos sensibles que abarca 431 hectáreas y 3.53 km, sin impactar directamente a las poblaciones cercanas. La calidad del aire moderada cubre 467 hectáreas y 4.39 km, mientras que la buena calidad alcanza 369 hectáreas y 5.20 km, sin llegar a afectar a la ciudad de Huamachuco. La superficie máxima contaminada por SO₂ es de 1,267 hectáreas, con una distancia máxima de dispersión de 7.17 km.

Discusión

En ambas mineras, la dirección predominante del viento es de este a oeste. En la minera Cerro el Toro, las partículas PM_{2.5} con concentraciones superiores a 50 µg/m³ niveles considerados peligrosos para grupos sensibles se dispersaron hasta 4.36 km desde el origen, afectando un área de 491 ha, lo que impactó a las poblaciones de Paranshique, Chugurgamba y Quinta Alta, así como a ecosistemas aledaños (Imágenes 2 y 3).

En contraste, en la minera La Arena, las PM_{2.5} alcanzaron 2.88 km y cubrieron 262 ha, afectando principalmente al ecosistema debido a la ausencia de población cercana (Imágenes 7 y 8). Respecto a las PM₁₀ (concentraciones >70 µg/m³), en Cerro el Toro se registró un alcance de 2.94 km y una superficie afectada de 186 ha, perjudicando a las mismas zonas pobladas; mientras que en La Arena, el impacto fue mayor, con un radio de 4 km y 644 ha de área contaminada, aunque sin afectación directa a comunidades (Imágenes 4, 5, 9 y 10).



scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico

233 - 245

Simulación de la Difusión de PM_{2.5}, PM₁₀ y SO₂ en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Pedro Amílcar Custodio Laiza

ORCID: 0000-0002-2627-470X

<https://revista.scienceevolution.com>



En el caso del SO₂ (>250 µg/m³), Cerro el Toro presentó una dispersión de 3.77 km y 404 ha, con efectos en la salud de la población local, y en La Arena el contaminante alcanzó 3.53 km y 431 ha, nuevamente con mayor impacto ambiental que humano (Imágenes 6, 7, 11 y 12).

Estos hallazgos coinciden con investigaciones previas como las de [Cruz Núñez y Bulnes Aquino \(2019\)](#), quienes reportaron que el PM_{2.5} proveniente de incendios forestales superó los límites permisibles, afectando un radio de 2 km; [Bera et al. \(2022\)](#), quienes identificaron partículas en rangos de 0.1 a 1 km que incrementaron la mortalidad por COVID-19; [Shen et al. \(2017\)](#), quienes registraron que penachos de plantas nucleares alcanzaron los 30 km; [Ambastha y Haritash \(2022\)](#), quienes señalaron que emisiones mineras impactaron hasta 40 km, afectando la salud respiratoria; y [Shikwambana et al. \(2021\)](#), quienes documentaron columnas de humo que recorrieron entre 3,000 y 6,600 km afectando países vecinos. No obstante, estudios como los de [Shahid et al. \(2019\)](#) y [Alva Huamán \(2019\)](#) reportaron niveles de SO₂ y PM dentro de los estándares establecidos, lo que diverge de nuestros resultados.

[Monaci et al. \(2022\)](#), advierten que la minería es una de las actividades industriales con mayor impacto en la calidad del aire, generando emisiones significativas de material particulado (PM), metales pesados (como plomo, arsénico y mercurio) y gases contaminantes (SO₂, NO_x y CO) que afectan tanto a los ecosistemas como a la salud humana. En zonas cercanas a operaciones mineras, estas emisiones pueden exceder los límites recomendados por la OMS, tal como se ha evidenciado en el presente estudio, como el de otros investigadores mencionados líneas arriba, lo que incrementa el riesgo de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y cáncer en la población expuesta. Además, la dispersión de contaminantes mediante el viento puede extender su impacto a regiones alejadas, degradando suelos, cuerpos de agua y la biodiversidad. Por consiguiente, la exposición prolongada a estas emisiones se asocia con mayores tasas de morbilidad y mortalidad en comunidades mineras, destacando la necesidad de implementar tecnologías de mitigación y políticas de control más estrictas para reducir su huella ambiental.

[Moghimi Dehkordi et al. \(2024\)](#), alerta que la contaminación atmosférica en las zonas mineras de América Latina es un importante problema medioambiental y de salud pública, sobre todo en las regiones con explotaciones mineras a cielo abierto. Los estudios han demostrado una fuerte correlación entre los niveles elevados de partículas en suspensión (PM₁₀) y el aumento de las enfermedades respiratorias, especialmente en los niños. Las actividades mineras, incluidas las voladuras, la excavación y el transporte de materiales, contribuyen a la liberación de polvo y otros contaminantes en el aire. En consonancia con ello, la dispersión de contaminantes detectados en ambas mineras de Huamachuco, evidencia riesgos significativos para la salud pública y los ecosistemas, con alcances que superan los 4 km en algunos casos, y estos datos refuerzan la necesidad de implementar medidas de mitigación y monitoreo continuo, especialmente en zonas pobladas.

En ese sentido, los resultados obtenidos, se recomienda que las autoridades de fiscalización, como el OEFA, el Gobierno Regional de La Libertad, el Gobierno Local y demás entidades competentes, implementen medidas preventivas en las zonas de influencia de estas mineras, con el fin de evitar que la población y el ecosistema sufran efectos futuros relacionados con enfermedades pulmonares y se vea afectado el entorno natural, incluyendo el agua, el suelo y el aire del área de influencia.

Por lo tanto, la población sensible debe evitar realizar ejercicios o esfuerzos al aire libre y tener especial cuidado ante la presencia de síntomas como tos o dificultades respiratorias, por lo que se sugiere evitar actividades a la intemperie en zonas cercanas a las mineras, conforme a lo indicado en el Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM ([MINAM, 2017](#)).

Se recomienda tomar medidas para la mitigación de la contaminación atmosférica en operaciones mineras, aunque ello requiera un enfoque integral que combine tecnologías avanzadas, prácticas operativas sostenibles y monitoreo continuo. Entre las estrategias clave destacan la implementación de sistemas de supresión de polvo (como rociadores de agua y agentes químicos), el uso de filtros y precipitadores electrostáticos para capturar partículas, y la optimización de maquinaria con combustibles más limpios o energía renovable. Además, el monitoreo en tiempo real mediante sensores de calidad del aire porque permiten identificar fuentes de emisión críticas y ajustar procesos para reducir impactos. Estas medidas, junto con protocolos de reforestación y barreras naturales, no solo cumplen con regulaciones ambientales, sino que también protegen la salud de trabajadores y comunidades cercanas, minimizando riesgos de enfermedades respiratorias y daños ecosistémicos ([Clarity, 2023](#)).

Asimismo, se sugiere que en futuras investigaciones sobre simulación de contaminantes atmosféricos se utilice el método HYSPLIT aplicándolo en diferentes horas del día, con el objetivo de obtener mayor información sobre el recorrido y el radio de influencia de los contaminantes según la dirección del viento.



scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico

233 - 245

Simulación de la Difusión de PM_{2.5}, PM₁₀ y SO₂ en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Pedro Amilcar Custodio Laiza

ORCID: 0000-0002-2627-470X

<https://revista.scienceevolution.com>



Finalmente, dado que no existen monitoreos continuos de calidad atmosférica en el área de influencia de las mineras, se recomienda que las autoridades consideren la aplicación del modelo HYSPLIT, tal como se empleó en esta investigación, con el propósito de contribuir a una atmósfera más limpia, lo que redundará en beneficios directos para la salud de la población del área evaluada.

Conclusiones

Los resultados del estudio revelaron que la simulación de la dispersión de contaminantes atmosféricos en las mineras Cerro el Toro y La Arena mostró una dirección predominante de este a oeste, con niveles de PM₁₀, PM_{2.5} y SO₂ que superaron los Estándares de Calidad Ambiental (ECA), clasificándose como malos e insalubres para la salud humana.

En Cerro el Toro, las concentraciones extremadamente altas afectaron tanto a la población de sectores como Paranshique, Chugurgamba y Quinta Alta como al ecosistema, con una superficie impactada de 491 hectáreas y una dispersión máxima de 4.36 km.

En contraste, La Arena registró un impacto en 644 hectáreas, limitado al ecosistema debido a la ausencia de población en la trayectoria, con una dispersión de 4 km. Aunque la magnitud exacta de la contaminación no pudo cuantificarse con precisión, se determinó que en ambas operaciones los contaminantes no superaron los 7.84 km de distancia ni las 1,904 hectáreas de superficie afectada, lo que sugiere un alcance espacial acotado pero con efectos críticos en zonas pobladas.

Estos hallazgos resaltan la necesidad de monitoreo continuo de emisiones en áreas mineras, especialmente donde coexisten operaciones y comunidades; de medidas de mitigación más estrictas para reducir la exposición a PM₁₀, PM_{2.5} y SO₂ en zonas vulnerables; y de estudios complementarios que evalúen impactos a largo plazo en la salud y ecosistemas, así como la eficacia de las estrategias de control implementadas.

En síntesis, el estudio evidencia que, pese a las diferencias en el alcance poblacional, ambas mineras operan con niveles de contaminación inadmisibles, requiriendo intervenciones urgentes para alinear sus emisiones con los estándares ambientales y proteger la salud pública y los entornos naturales.

Conflicto de interés

Los autores declaran que no existen conflictos de interés relacionados con la publicación de este artículo.

Referencias

- Alva Huamán, D. A. (2019). *Concentración de material particulado, monóxido de carbono, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en la planta de producción de óxido de calcio Puylucana, Cajamarca 2018* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Cajamarca]. Repositorio Institucional UNC. <http://hdl.handle.net/20.500.14074/3523>
- Ambastha, S. K., & Haritash, A. K. (2022). Emission of respirable dust from stone quarrying, potential health effects, and its management. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 6670–6677. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16079-4>
- Bera, B., Bhattacharjee, S., Sengupta, N., & Saha, S. (2022). Variation and dispersal of PM₁₀ and PM_{2.5} during COVID-19 lockdown over Kolkata metropolitan city, India investigated through HYSPLIT model. *Geoscience Frontiers*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2021.101291>
- Chandra Joshi, D., Negi, P., Devi, S., Lohani, H., Kumar, R., Gupta, M., & Chiau Ming, L. (2025). Fine particulate matter (PM_{2.5}, PM₁₀): A silent catalyst for chronic lung diseases in India; a comprehensive review. *Environmental Challenges*, 20, 101215. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2025.101215>
- Clarity. (2023). *Monitoreo de la calidad del aire en la minería: importancia y mejores prácticas*. <https://www.clarity.io/blog/monitoring-air-quality-in-mining-importance-best-practices>
- Collyns, D. (2024). Perú: Comunidades envenenadas por minería en Cerro de Pasco. *Mongabay*. <https://es.mongabay.com/2024/01/peru-comunidades-envenenadas-por-mineria-cerro-de-pasco/>
- Cruz Núñez, X., & Bulnes Aquino, E. (2019). Emission impact of wildfires: El Tepozteco 2016. *Atmósfera*, 32(2), 85–93. <https://doi.org/10.20937/ATM.2019.32.02.01>
- Cvetkovic Vega, A., Maguiña, J. L., Soto, A., Lama-Valdivia, J., & Correa-López, L. E. (2021). Estudios transversales. *Revista de la Facultad de Medicina Humana*, 21(1), 179–185. <https://revistas.urp.edu.pe/index.php/RFMH/article/view/3069/4422>



scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico

233 - 245

Simulación de la Difusión de PM_{2.5}, PM₁₀ y SO₂ en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Pedro Amílcar Custodio Laiza

ORCID: 0000-0002-2627-470X

<https://revista.scienceevolution.com>



Ferrero, F., Abrutzky, R., Ossorio, M. F., & Torres, F. (2019). Efectos de la contaminación y el clima en las consultas pediátricas por infección respiratoria aguda en la Ciudad de Buenos Aires. *Archivos Argentinos de Pediatría*, 117(6), 368–374. <http://dx.doi.org/10.5546/aap.2019.368>

Hernández-Carrillo, F., Campillo Labrandero, M., & Sánchez-Mendiola, M. (2018). Investigación traslacional en ciencias de la salud: implicaciones educativas y retos. *Investigación en educación médica*, 7(28), 85–97. <https://doi.org/10.22201/facmed.20075057e.2018.28.18146>

Hernández-Garcés, A., Jáuregui-Haza, U., González, J. A., Casares-Long, J. J., Saavedra-Vázquez, S., Guzmán-Martínez, F., & Torres-Valle, A. (2016). Aplicaciones del modelo lagrangiano de dispersión atmosférica CALPUFF. *Ciencias de la Tierra y el Espacio*, 17(1), 32–44. <https://www.iga.cu/vol17-no1-art3/>

HYSPLIT. (2025). READY. Sistema de Visualización y Aplicaciones Ambientales en Tiempo Real. <https://www.ready.noaa.gov/index.php>

Ministerio del Ambiente del Perú. (2017). *Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM: Aprueban los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen disposiciones complementarias*. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). <https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-estandares-calidad-ambiental-eca-aire-establecen-disposiciones>

Ministerio del Ambiente del Perú. (2020). *Concentración del material particulado (PM_{2.5}) en Lima Metropolitana, 2014-2019 (µg/m³)*. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). <https://sinia.minam.gob.pe/inea/indicadores/concentracion-del-material-particulado-pm2-5-en-lima-metropolitana-2014-2019-ug-m3/>

Moghimidehkhordi, M., Pournuroz Nodeh, Z., Soleimani Dehkordi, K., Salmanvandi, H., Rasouli Khorjistan, R., & Ghaffarzadeh, M. (2024). Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: Sources of pollution, environmental impacts, and prevention and control methods. *Results in Engineering*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102729>

Monaci, F., Ancora, S., Paoli, L., Loppi, S., & Franzaring, J. (2022). Calidad del aire en pueblos postmineros: seguimiento de elementos potencialmente tóxicos mediante hojas de árboles. *Environmental Geochemistry and Health*, 45, 843–859. <https://doi.org/10.1007/s10653-022-01252-6>

Municipalidad de Lima. (2020). *Calidad del aire en Lima mejoró durante estado de emergencia, según monitoreo sobre partículas contaminantes*. Gobierno del Perú. <https://www.gob.pe/institucion/munilima/noticias/576974-calidad-del-aire-en-lima-mejoro-durante-estado-de-emergencia-segun-monitoreo-sobre-particulas-contaminantes>

Office of Environmental Health Hazard Assessment (OEHHHA), State of California. (s.f.). PM_{2.5}. Recuperado el 16 de mayo de 2025 de <https://oehha.ca.gov/calenviroscreen/indicator/pm25>

Organización Mundial de la Salud. (2024). *Contaminación del aire ambiente (exterior)*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

Ortíz-Alvarez, A., Ruiz-Suárez, L. G., Ortega, E., García-Reynoso, A., Peralta, O., López-Gaona, A., Castro, T., & Martínez-Arroyo, A. (2021). Emission inventory point source visualization on Google Earth and integrated with HYSPLIT model. *Atmósfera*, 34(2), 143–156. <https://doi.org/10.20937/ATM.52834>

Ramos Díaz, R., Viña Romero, M. M., & Gutiérrez Nicolás, F. (2020). Investigación aplicada en tiempos de COVID-19. *Revista de la OFIL*, 30(2), 93. <https://dx.doi.org/10.4321/s1699-714x2020000200003>

Rolph, G., Stein, A., & Stunder, B. (2017). Real-time Environmental Applications and Display sYstem: READY. *Environmental Modelling & Software*, 95, 210–228. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.06.025>

Shahid, I., Chishtie, F., Bulbul, G., Shahid, M. Z., Shafique, S., & Lodhi, A. (2019). State of air quality in twin cities of Pakistan: Islamabad and Rawalpindi. *Atmósfera*, 32(1), 71–84. <https://doi.org/10.20937/atm.2019.32.01.06>

Shen, Y., Hu, X., Ma, Y., & Chen, G. (2017). Warning Technology for Air Nuclear Pollution Diffusion of Nuclear Power Plant. *Journal of Northeastern University Natural Science*, 38(10), 1482–1486. <https://doi.org/10.12068/j.issn.1005-3026.2017.10.023>

Shikwambana, L., Nciphya, X., Sangeetha, S. K., Sivakumar, V., & Mhangara, P. (2021). Qualitative study on the observations of emissions, transport, and the influence of climatic factors from sugarcane burning: A South African perspective. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(14), 7672. <https://doi.org/10.3390/ijerph18147672>



scienceevolution

ISSN: 2810-8728 (En línea)

4.2

ABRIL - JUNIO
2025

Artículo Científico

233 - 245

Simulación de la Difusión de PM2.5, PM10 y SO2 en Dos Zonas Mineras de Huamachuco mediante HYSPLIT

Pedro Amilcar Custodio Laiza

ORCID: 0000-0002-2627-470X

<https://revista.scienceevolution.com>



Swartz, J. S., Van Zyl, P. G., Beukes, J. P., Labuschagne, C., Brunke, E. G., Portafaix, T., Galy-Lacaux, C., & Pienaar, J. J. (2020). Twenty-one years of passive sampling monitoring of SO₂, NO₂ and O₃ at the Cape Point GAW station, South Africa. *Atmospheric Environment*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117128>

Thangavel, P., Park, D., & Lee, Y. C. (2022). Recent insights into particulate matter (PM_{2.5})-mediated toxicity in humans: An overview. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(12). <https://doi.org/10.3390/ijerph19127511>

United States Environmental Protection Agency. (s.f.). *Regulatory and guidance information by topic: Air*. Recuperado el 16 de mayo de 2025 de <https://www.epa.gov/regulatory-information-topic/regulatory-and-guidance-information-topic-air>