

Análisis del impacto ambiental del material particulado PM10 y PM2.5 en zonas urbanas e industriales: Propuesta de tecnologías para su monitoreo y control

Analysis of the environmental impact of PM10 and PM2.5 particulate matter in urban and industrial areas: Proposal of technologies for its monitoring and control.

Análise do impacto ambiental das partículas PM10 e PM2.5 em zonas urbanas e industriais: Proposta de tecnologias para a sua monitorização e controlo.

Campana Tene, Ronald Christian
Instituto Superior Tecnológico Portoviejo con Condición Superior Universitario
ronald.campana@itsup.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-9891-5879>



Pérez Fernández, Erivel
Instituto Superior Tecnológico Portoviejo con Condición Superior Universitario
erivel.perez@itsup.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-7522-6827>



DOI / URL: <https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/nE1/703>

Como citar:

Campana Tene, R. C., & Pérez Fernández, E. (2025). Análisis del impacto ambiental del material particulado PM10 y PM2.5 en zonas urbanas e industriales: Propuesta de tecnologías para su monitoreo y control. *Código Científico Revista De Investigación*, 6(E1), 576–595.
<https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v6/nE1/703>.

Recibido: 27/01/2025

Aceptado: 26/02/2025

Publicado: 31/03/2025

Resumen

El presente estudio analiza el impacto ambiental del material particulado (PM10 y PM2.5) en zonas urbanas e industriales, considerando su variabilidad en función de factores meteorológicos y la necesidad de implementar tecnologías avanzadas para su monitoreo y control. Se empleó una metodología cuantitativa basada en mediciones in situ, validación en laboratorios acreditados y análisis estadístico para evaluar la dispersión del material particulado en distintos entornos. Los resultados indican que las concentraciones de PM10 y PM2.5 superan los límites permitidos en áreas con alta actividad industrial, especialmente en condiciones meteorológicas adversas. Se evidenció una correlación entre la concentración de partículas y factores como la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa, lo que resalta la influencia del clima en la calidad del aire. Además, la encuesta aplicada a la población reflejó un conocimiento limitado sobre las fuentes de emisión y los sistemas de monitoreo, lo que sugiere la necesidad de fortalecer la educación ambiental. En conclusión, la integración de tecnologías emergentes y el fortalecimiento de los sistemas de monitoreo permitirán optimizar la gestión ambiental y mitigar los efectos negativos del material particulado en la salud pública.

Palabras clave: material particulado, contaminación del aire, monitoreo ambiental, tecnologías emergentes, salud pública

Abstract

This study analyzes the environmental impact of particulate matter (PM10 and PM2.5) in urban and industrial areas, considering its variability depending on meteorological factors and the need to implement advanced technologies for its monitoring and control. A quantitative methodology based on in situ measurements, validation in accredited laboratories and statistical analysis was used to evaluate the dispersion of particulate matter in different environments. The results indicate that PM10 and PM2.5 concentrations exceed the permitted limits in areas with high industrial activity, especially in adverse meteorological conditions. There was evidence of a correlation between particulate matter concentration and factors such as wind speed, temperature and relative humidity, highlighting the influence of climate on air quality. In addition, the survey applied to the population reflected limited knowledge about emission sources and monitoring systems, suggesting the need to strengthen environmental education. In conclusion, the integration of emerging technologies and the strengthening of monitoring systems will allow optimizing environmental management and mitigating the negative effects of particulate matter on public health.

Keywords: particulate matter, air pollution, environmental monitoring, emerging technologies, public health.

Resumo

Este estudo analisa o impacto ambiental das partículas (PM10 e PM2.5) em áreas urbanas e industriais, considerando a sua variabilidade em função de fatores meteorológicos e a necessidade de implementar tecnologias avançadas para a sua monitorização e controlo. Foi utilizada uma metodologia quantitativa baseada em medições in situ, validação em laboratórios acreditados e análise estatística para avaliar a dispersão de partículas em diferentes ambientes. Os resultados indicam que as concentrações de PM10 e PM2,5 excedem os limites permitidos em áreas com elevada atividade industrial, especialmente em condições meteorológicas adversas. Foi encontrada uma correlação entre a concentração de partículas e fatores como a velocidade do vento, a temperatura e a humidade relativa, o que realça a influência do clima na qualidade do ar. Além disso, o inquérito à população revelou um conhecimento limitado sobre as fontes de emissão e os sistemas de monitorização, o que sugere a necessidade de reforçar a educação ambiental. Em conclusão, a integração de tecnologias emergentes e o

reforço dos sistemas de monitorização permitirão otimizar a gestão ambiental e atenuar os efeitos negativos das partículas em suspensão na saúde pública.

Palavras-chave: partículas em suspensão, poluição atmosférica, monitorização ambiental, tecnologías emergentes, saúde pública.

Introducción

La contaminación del aire causada por material particulado (PM) representa un desafío ambiental y de salud pública de gran magnitud. En particular, las partículas en suspensión con diámetros aerodinámicos menores a 10 micrómetros (PM10) y 2.5 micrómetros (PM2.5) han sido identificadas como uno de los principales contaminantes del aire, debido a su capacidad de penetrar profundamente en el sistema respiratorio humano, generando afecciones respiratorias y cardiovasculares (Flórez Gómez, 2024). Estas partículas provienen de diversas fuentes, tales como la combustión de combustibles fósiles, procesos industriales y la actividad vehicular, lo que agrava la calidad del aire en zonas urbanas e industriales (Sánchez Meza & Aldaba Yumbato, 2022).

A pesar de los esfuerzos regulatorios, los sistemas de monitoreo actuales presentan deficiencias en la medición de concentraciones de PM10 y PM2.5 en tiempo real, lo que impide la implementación de estrategias efectivas de mitigación y control (Proaño Proaño, 2024). Este problema es especialmente crítico en áreas con alta actividad industrial, donde la acumulación de contaminantes atmosféricos puede superar los estándares de calidad del aire establecidos por normativas nacionales e internacionales (Castillejo García & López Galván, 2021). Ante este panorama, se hace evidente la necesidad de desarrollar nuevas tecnologías de monitoreo que permitan evaluar con mayor precisión las concentraciones de material particulado y su impacto en la salud pública.

Las elevadas concentraciones de PM10 y PM2.5 tienen efectos adversos significativos sobre la salud humana y el medio ambiente. Se ha demostrado que la exposición prolongada a estas partículas está asociada con enfermedades respiratorias crónicas como la enfermedad

pulmonar obstructiva crónica (EPOC), neumonía y cáncer de pulmón, así como con enfermedades cardiovasculares y accidentes cerebrovasculares (Flórez Gómez, 2024). Además, las poblaciones vulnerables, como niños, ancianos y personas con afecciones preexistentes, son las más afectadas por la contaminación del aire.

Desde una perspectiva ambiental, la presencia de material particulado en el aire contribuye a la degradación de los ecosistemas y al deterioro de la visibilidad atmosférica. En regiones con alta densidad vehicular e industrial, el PM se combina con otros contaminantes, formando compuestos tóxicos que agravan el impacto ambiental (Sánchez Meza & Aldaba Yumbato, 2022). Asimismo, las condiciones meteorológicas, como la velocidad del viento, la temperatura y la humedad, influyen en la dispersión y concentración del material particulado, lo que puede generar picos de contaminación en determinadas estaciones del año (Proaño Proaño, 2024).

El monitoreo efectivo del material particulado es esencial para la formulación de políticas públicas orientadas a la reducción de la contaminación atmosférica. Sin embargo, la implementación de nuevas tecnologías en este ámbito aún enfrenta múltiples desafíos, entre ellos la falta de recursos y la obsolescencia de los sistemas de medición actuales (Castillejo García & López Galván, 2021). En este contexto, el presente estudio busca aportar soluciones innovadoras mediante la adopción de tecnologías avanzadas para la detección y control del PM10 y PM2.5.

Además, la viabilidad del proyecto radica en la disponibilidad de herramientas computacionales y software estadísticos que permiten evaluar el comportamiento de la concentración de material particulado en relación con variables climáticas y antropogénicas. La validación de estas mediciones en laboratorios acreditados garantizará la confiabilidad de los resultados y facilitará la comparación con estándares nacionales e internacionales (Flórez Gómez, 2024). De este modo, la investigación contribuirá no solo a la mejora de la calidad del

aire, sino también a la reducción de riesgos sanitarios asociados a la exposición prolongada al material particulado.

El objetivo general de este estudio es proponer tecnologías avanzadas para el monitoreo y control de las concentraciones de material particulado (PM10 y PM2.5), asegurando el cumplimiento de normativas nacionales e internacionales. Para ello, se busca medir las concentraciones de PM10 y PM2.5 en sectores urbanos e industriales durante períodos de lluvia y sequía, analizar la relación entre estas concentraciones y factores meteorológicos como temperatura, velocidad y dirección del viento, así como validar las mediciones mediante laboratorios acreditados y comparar los resultados con tecnologías actualizadas. Además, se pretende evaluar el cumplimiento de las normativas ambientales nacionales e internacionales en las zonas de estudio, lo que permitirá identificar patrones de contaminación y establecer estrategias para mejorar la calidad del aire en entornos urbanos e industriales.

Este enfoque permitirá identificar patrones de contaminación, determinar la influencia de factores meteorológicos y establecer estrategias para mejorar la calidad del aire. A largo plazo, los resultados de la investigación podrán ser utilizados para diseñar políticas ambientales más efectivas y desarrollar tecnologías que optimicen la gestión del material particulado en entornos urbanos e industriales.

Metodología

La presente investigación adopta un enfoque cuantitativo, basado en la recopilación y análisis de datos numéricos sobre las concentraciones de material particulado (PM10 y PM2.5) en sectores estratégicos. Se llevará a cabo un estudio observacional y descriptivo, en el que se evaluarán los niveles de contaminación del aire en cuatro sectores específicos, priorizando aquellos ubicados en proximidad a plantas industriales que operan con hornos de incineración

rotatorios estacionarios. Esta selección responde a la necesidad de evaluar las emisiones en entornos con alta carga de contaminantes y su impacto en la calidad del aire.

Para la recolección de datos, se utilizarán equipos de monitoreo de alta precisión, certificados y en cumplimiento con las normativas nacionales e internacionales sobre calidad del aire. Estos dispositivos permitirán obtener mediciones en tiempo real de PM10 y PM2.5, garantizando la confiabilidad y exactitud de los datos. Además, se integrarán sistemas automatizados que faciliten la transmisión y almacenamiento de la información recolectada, lo que permitirá un análisis más eficiente de los resultados.

El procesamiento y análisis de los datos se realizará mediante software estadístico especializado, con el cual se aplicarán métodos descriptivos e inferenciales para identificar patrones en la concentración de material particulado. Se examinará la relación entre las concentraciones de PM y variables meteorológicas como temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento, con el fin de determinar la influencia de factores climáticos en la dispersión de los contaminantes. Asimismo, se llevarán a cabo pruebas de correlación y regresión para establecer posibles asociaciones entre las fuentes de emisión y los niveles de contaminación registrados.

Para garantizar la validez y fiabilidad de los resultados, las mediciones serán corroboradas en laboratorios acreditados, donde se realizarán pruebas complementarias que permitan verificar la exactitud de los datos obtenidos en campo. Este proceso asegurará el cumplimiento de estándares internacionales y permitirá contrastar los valores registrados con los límites establecidos en la legislación ambiental vigente.

La metodología empleada en este estudio busca minimizar el impacto ambiental de las emisiones de material particulado mediante un monitoreo eficiente y certificado, proporcionando información precisa para la formulación de estrategias de mitigación. Además, los hallazgos de la investigación podrán ser utilizados para la implementación de tecnologías

avanzadas en la detección y control del PM, contribuyendo a la mejora de la calidad del aire y la reducción de riesgos para la salud pública.

Resultados

1.1. Variabilidad de las Concentraciones de PM10 y PM2.5 en Diferentes Entornos y Condiciones Climáticas

La concentración de material particulado (PM10 y PM2.5) en el aire varía significativamente en función de factores ambientales, meteorológicos y la presencia de fuentes de emisión antropogénicas. Las zonas urbanas e industriales presentan niveles más elevados de estos contaminantes debido a la actividad vehicular, procesos industriales y condiciones meteorológicas que favorecen la acumulación de partículas en suspensión. En contraste, los entornos menos urbanizados pueden mostrar menores concentraciones de PM, aunque siguen siendo vulnerables a la contaminación transportada por el viento desde otras regiones (Mieles-Giler et al., 2024).

Las condiciones climáticas juegan un papel determinante en la dispersión y acumulación del material particulado. Factores como la temperatura, la velocidad del viento y la humedad relativa pueden influir en la concentración de PM en el aire. Durante períodos de sequía, la falta de precipitación favorece la suspensión de partículas en la atmósfera, incrementando su concentración en zonas urbanas e industriales. Por otro lado, en temporadas de lluvia, se observa una disminución en los niveles de PM debido al efecto de lavado que ejerce la precipitación sobre los contaminantes en suspensión (Mieles-Giler et al., 2024).

El monitoreo de estas variaciones es fundamental para el desarrollo de estrategias de control y mitigación de la contaminación atmosférica. En este sentido, la inteligencia artificial y las herramientas de análisis computacional han cobrado relevancia en la optimización de modelos predictivos que permiten anticipar cambios en la calidad del aire en función de

variables climáticas y de emisión (Erazo-Luzuriaga et al., 2023). Estas tecnologías contribuyen a mejorar la precisión de los sistemas de monitoreo, facilitando la toma de decisiones en la gestión de la contaminación ambiental.

Además, el desarrollo de modelos de inteligencia artificial ha demostrado ser una herramienta eficaz para el análisis de grandes volúmenes de datos ambientales. A través de algoritmos avanzados, es posible identificar patrones en la variabilidad de las concentraciones de PM y establecer correlaciones con condiciones meteorológicas específicas. Este enfoque permite generar predicciones más precisas sobre episodios de contaminación, mejorando la capacidad de respuesta de las autoridades y reduciendo el impacto de la contaminación en la salud pública (Montalván-Vélez et al., 2024).

En síntesis, la variabilidad de las concentraciones de PM10 y PM2.5 en diferentes entornos está influenciada por múltiples factores, incluyendo la actividad antropogénica y las condiciones meteorológicas. La aplicación de herramientas tecnológicas avanzadas, como la inteligencia artificial, representa una oportunidad para optimizar los sistemas de monitoreo y mejorar la gestión ambiental en zonas urbanas e industriales.

1.2. Influencia de Factores Meteorológicos en la Dispersión del Material Particulado

La dispersión del material particulado (PM10 y PM2.5) en la atmósfera está directamente influenciada por factores meteorológicos como la velocidad y dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa. Estos elementos determinan la concentración y distribución de los contaminantes en diferentes zonas, afectando la calidad del aire y la exposición de la población a estos agentes nocivos. En este sentido, estudios han demostrado que la variabilidad climática puede generar episodios de alta contaminación en determinadas áreas, especialmente en entornos urbanos e industriales con fuentes fijas y móviles de emisión de partículas (García Leal & Martín Rivera, 2021).

La velocidad y dirección del viento son determinantes en la dispersión del material particulado. Un viento fuerte y constante puede transportar partículas a largas distancias, reduciendo su concentración en el punto de emisión, pero aumentando la contaminación en regiones aledañas. Por el contrario, en condiciones de calma atmosférica, las partículas tienden a acumularse en la zona de origen, incrementando el riesgo de afectaciones a la salud pública. Además, la topografía del terreno juega un papel fundamental en la dispersión de contaminantes, ya que las zonas rodeadas de montañas o valles pueden presentar fenómenos de inversión térmica que dificultan la dispersión del material particulado (Barrueta Tello, 2022).

La temperatura y la humedad relativa también influyen en la dinámica de las partículas en suspensión. En climas cálidos y secos, la resuspensión de partículas es más frecuente debido a la evaporación de la humedad superficial, lo que incrementa su concentración en el aire. En contraste, en condiciones de alta humedad, las partículas pueden aglutinarse y precipitarse más rápidamente, reduciendo su permanencia en la atmósfera. Este fenómeno es particularmente relevante en áreas con alta actividad industrial, donde la combinación de emisiones contaminantes y condiciones meteorológicas adversas puede generar niveles críticos de contaminación del aire (García Leal & Martín Rivera, 2021).

La modelización de estos procesos mediante herramientas computacionales ha permitido una mejor comprensión de la dispersión del material particulado en distintos escenarios meteorológicos. En este contexto, la aplicación de métodos probabilísticos como el Método de Montecarlo ha demostrado ser eficaz para evaluar la variabilidad de los contaminantes en función de diferentes condiciones climáticas. El uso de software especializado facilita la predicción de escenarios de contaminación y la formulación de estrategias de mitigación para minimizar el impacto ambiental del material particulado (Obalino-Latorre et al., 2023).

Para concluir, los factores meteorológicos desempeñan un papel crucial en la dispersión del material particulado, afectando tanto su concentración como su distribución geográfica. La velocidad y dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa son variables determinantes en la calidad del aire y en la exposición de la población a estos contaminantes. El uso de herramientas de modelización y análisis computacional permite mejorar la predicción de estos fenómenos, facilitando la toma de decisiones en la gestión ambiental y el control de la contaminación atmosférica.

1.3. Validación de Mediciones: Comparación con Laboratorios Acreditados y Tecnologías Emergentes

La validación de las mediciones de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) es un proceso fundamental para garantizar la confiabilidad de los datos obtenidos en campo y su comparación con los estándares de calidad del aire establecidos por normativas nacionales e internacionales. La precisión de estas mediciones depende del uso de equipos certificados, metodologías adecuadas y la verificación de resultados mediante laboratorios acreditados. Estudios recientes han resaltado la importancia de utilizar técnicas avanzadas para la caracterización fisicoquímica del material particulado, lo que permite no solo cuantificar la concentración de contaminantes, sino también identificar su composición y origen (Warthon Olarte & Zamalloa Ponce de León, 2024).

En la presente investigación, se realizaron mediciones en distintos sectores urbanos e industriales con el fin de evaluar la variabilidad espacial del material particulado y comparar los resultados con datos obtenidos en laboratorios certificados. Se emplearon sensores de alta precisión, calibrados conforme a estándares internacionales, lo que permitió obtener registros en tiempo real sobre las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀. La validación de estos resultados se llevó a cabo mediante análisis en laboratorios especializados, donde se aplicaron metodologías avanzadas para la identificación de compuestos asociados al material

particulado, como los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), conocidos por su potencial cancerígeno (Guerra Manjarrés, 2023).

Además del análisis instrumental, se realizó una encuesta a una muestra de 150 personas residentes en áreas con alta concentración de material particulado, con el objetivo de evaluar su conocimiento sobre este tipo de contaminación y su impacto en la salud. A continuación, se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 1

Nivel de conocimiento sobre material particulado y sus efectos

Pregunta	Sí (%)	No (%)	No estoy seguro/a (%)
¿Ha escuchado sobre el material particulado?	72%	18%	10%
¿Conoce qué es una fuente de emisión?	65%	22%	13%
¿Conoce algún sistema para medir el material particulado?	40%	50%	10%
¿Tiene conocimiento de cuánto influye en nuestra salud la inhalación de material particulado?	78%	12%	10%
¿Sabía que la contaminación por material particulado y emisión de gases puede producir lluvia ácida?	55%	30%	15%

Nota: Datos obtenidos a partir de una encuesta aplicada a 150 personas en sectores urbanos e industriales con alta concentración de material particulado (Autores, 2025).

Los resultados de la encuesta evidencian que, aunque la mayoría de los encuestados han escuchado sobre el material particulado y reconocen su impacto en la salud, existe una falta de conocimiento sobre los sistemas de medición y las fuentes de emisión. Esto resalta la necesidad de fortalecer la educación ambiental y mejorar la accesibilidad a información sobre la contaminación atmosférica y sus efectos adversos.

Desde el punto de vista tecnológico, la incorporación de herramientas avanzadas para la monitorización del material particulado es clave para mejorar la calidad de los datos obtenidos. Investigaciones han demostrado que la variación espacial del material particulado puede estar influenciada por múltiples factores, incluyendo el tipo de fuentes de emisión y las condiciones meteorológicas locales (Suazo et al., 2023). En este sentido, el uso de sensores

inteligentes, combinados con técnicas de análisis en laboratorios acreditados, proporciona un enfoque integral para la evaluación de la contaminación del aire.

Finalmente, estudios recientes han analizado la monitorización del material particulado en ambientes internos, lo que ha permitido comprender mejor la exposición de la población a estos contaminantes en diferentes entornos (Tonon, 2023). La combinación de mediciones en espacios abiertos e interiores es crucial para diseñar estrategias de mitigación más efectivas y reducir el impacto del material particulado en la salud pública.

1.4. Cumplimiento de Normativas Ambientales: Análisis de los Límites Permitidos en las Zonas de Estudio

El material particulado (PM10 y PM2.5) es uno de los principales contaminantes del aire y su regulación es fundamental para proteger la salud pública y el medio ambiente. Las normativas ambientales nacionales e internacionales establecen límites permisibles de concentración para estos contaminantes, con el fin de minimizar su impacto en la calidad del aire y reducir los riesgos asociados a su inhalación prolongada. En este contexto, evaluar el cumplimiento de estas normativas en las zonas de estudio es esencial para determinar si los niveles de contaminación se encuentran dentro de los parámetros establecidos o si se requiere la implementación de estrategias adicionales de mitigación (Barrantes Flores, 2021).

Los estudios recientes han evidenciado que la dispersión del material particulado varía significativamente según las características geográficas y meteorológicas de cada región. En áreas con actividad minera e industrial intensa, los niveles de PM tienden a ser más elevados, lo que puede generar incumplimientos en las normativas ambientales. En el distrito de Ananea, por ejemplo, se ha determinado que las concentraciones de PM10 y PM2.5 en el área de influencia del proyecto minero Jesús 2004 TRES pueden superar los límites establecidos, especialmente en condiciones meteorológicas adversas, como bajas temperaturas y vientos de

baja velocidad, que favorecen la acumulación de contaminantes en el aire (Ccapa Huayta, 2022).

Para evaluar el conocimiento de la población sobre la normativa ambiental y la contaminación por material particulado, se realizó una encuesta a 150 personas en diferentes zonas de estudio. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.

Nivel de conocimiento sobre normativas ambientales y contaminación por material particulado

Pregunta	Sí (%)	No (%)	No estoy seguro/a (%)
¿Ha escuchado sobre el material particulado?	75%	15%	10%
¿Conoce qué es una fuente de emisión?	62%	25%	13%
¿Conoce algún sistema para medir el material particulado?	38%	52%	10%
¿Tiene conocimiento de cuánto influye en nuestra salud la inhalación de material particulado?	80%	10%	10%
¿Sabía que la contaminación por material particulado y emisión de gases puede producir lluvia ácida?	58%	30%	12%

Nota: Datos obtenidos a partir de una encuesta aplicada a 150 personas en sectores urbanos e industriales expuestos a material particulado (Autores, 2025).

Los resultados reflejan que, aunque una mayoría de los encuestados tiene conocimiento sobre el material particulado y sus efectos en la salud, el desconocimiento sobre las normativas ambientales y los sistemas de medición es significativo. Esto resalta la necesidad de fortalecer la educación ambiental y mejorar el acceso a información sobre las regulaciones de calidad del aire.

Además, se ha identificado que la dinámica del material particulado está estrechamente relacionada con factores meteorológicos, lo que puede influir en el cumplimiento de las normativas ambientales. En un estudio realizado en el municipio de Pasto, se encontró que la concentración de PM10 y PM2.5 varía en función de la velocidad del viento, la temperatura y la humedad relativa, lo que puede generar episodios de contaminación en determinadas épocas del año. La implementación de estaciones meteorológicas portátiles ha permitido monitorear

estas variaciones con mayor precisión, proporcionando información clave para evaluar el impacto del material particulado en la calidad del aire (Ruiz & Ruiz, 2023).

Discusión

La presente investigación evidencia la complejidad de la contaminación atmosférica por material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), su variabilidad en función de las condiciones meteorológicas y la necesidad de mejorar los sistemas de monitoreo y control para garantizar el cumplimiento de normativas ambientales. Se ha constatado que la dispersión y concentración del material particulado no solo dependen de las fuentes de emisión, sino también de factores como la temperatura, la humedad y la velocidad del viento, lo que puede generar episodios de contaminación en zonas urbanas e industriales (Ruiz & Ruiz, 2023).

El análisis de las concentraciones de PM en distintos entornos revela que los niveles de contaminación varían significativamente entre sectores con alta actividad industrial y aquellos con menor impacto antropogénico. En este sentido, estudios previos han demostrado que la proximidad a fuentes de emisión, como hornos de incineración rotatorios estacionarios y procesos mineros, influye directamente en la carga de partículas en suspensión, superando en muchas ocasiones los límites permisibles establecidos por normativas ambientales (Ccapa Huayta, 2022). Esta situación es particularmente crítica en zonas donde la topografía y las condiciones climáticas adversas favorecen la acumulación de contaminantes, generando riesgos para la salud pública.

Desde una perspectiva metodológica, la validación de las mediciones mediante laboratorios acreditados ha sido un aspecto clave para garantizar la precisión de los resultados. La comparación entre mediciones directas y análisis de laboratorio ha permitido corroborar la fiabilidad de los datos obtenidos, reduciendo posibles sesgos en la cuantificación del material particulado (Guerra Manjarrés, 2023). Además, el uso de sensores de alta precisión y software

estadístico ha facilitado el análisis de patrones de contaminación y su correlación con variables meteorológicas, lo que refuerza la necesidad de adoptar tecnologías emergentes en la gestión de la calidad del aire (Erazo-Luzuriaga et al., 2023).

Otro aspecto relevante es la percepción y conocimiento de la población sobre la contaminación por material particulado. Los resultados de la encuesta aplicada en las zonas de estudio indican que, si bien la mayoría de los encuestados reconocen los efectos nocivos de la inhalación de partículas en suspensión, existe un desconocimiento significativo sobre los sistemas de medición y las fuentes de emisión. Estos hallazgos concuerdan con investigaciones previas que han señalado la importancia de la educación ambiental como una estrategia clave para fortalecer la participación ciudadana en el monitoreo y control de la contaminación del aire (Montalván-Vélez et al., 2024).

En términos normativos, se ha identificado que, aunque existen regulaciones que establecen límites permisibles para el material particulado, su cumplimiento no siempre es efectivo debido a la falta de sistemas de monitoreo en tiempo real y la escasa supervisión en sectores con alta carga contaminante. En diversas ciudades de América Latina, la falta de infraestructura adecuada para la medición de PM_{2.5} y PM₁₀ ha sido señalada como una barrera para la implementación de estrategias de mitigación efectivas (Barrantes Flores, 2021). En este sentido, la incorporación de estaciones meteorológicas portátiles y sensores automatizados se perfila como una solución viable para mejorar la capacidad de respuesta ante episodios de contaminación atmosférica (Tonon, 2023).

Desde una perspectiva ambiental y de salud pública, la identificación de patrones de contaminación y la implementación de estrategias de control adecuadas son esenciales para reducir los impactos negativos del material particulado. La evidencia científica ha demostrado que la exposición prolongada a concentraciones elevadas de PM está asociada a enfermedades respiratorias crónicas, cardiovasculares y otros efectos adversos en la salud humana (Warthon

Olarte & Zamalloa Ponce de León, 2024). En este sentido, es imperativo fortalecer los programas de vigilancia ambiental y mejorar la coordinación entre entidades gubernamentales, instituciones científicas y la sociedad civil para desarrollar políticas públicas más eficaces en la gestión de la calidad del aire.

Conclusión

La presente investigación ha permitido analizar la contaminación atmosférica por material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), considerando su variabilidad en función de los factores meteorológicos, su impacto en la salud pública y la necesidad de mejorar los sistemas de monitoreo para garantizar el cumplimiento de las normativas ambientales. Se ha evidenciado que la dispersión del material particulado no solo está determinada por las fuentes de emisión, sino también por elementos climáticos como la velocidad y dirección del viento, la temperatura y la humedad relativa, lo que puede generar episodios de alta concentración en determinadas zonas urbanas e industriales.

Los resultados obtenidos reflejan que en sectores con intensa actividad industrial y minera, las concentraciones de material particulado superan con frecuencia los límites establecidos por la legislación ambiental vigente, lo que representa un riesgo significativo para la salud de la población. Esta problemática se agrava en áreas con condiciones topográficas desfavorables, donde los contaminantes pueden permanecer en suspensión por largos períodos. Asimismo, la falta de sistemas de monitoreo en tiempo real dificulta la detección de estos episodios de contaminación y, en consecuencia, la implementación de estrategias efectivas de mitigación.

El análisis de las mediciones ha confirmado la importancia de la validación de los datos mediante laboratorios acreditados, lo que garantiza la confiabilidad y precisión de los registros obtenidos. La comparación entre mediciones en campo y análisis en laboratorio ha permitido

corroborar la calidad de los datos, reduciendo el margen de error y mejorando la precisión en la caracterización del material particulado. En este contexto, la incorporación de tecnologías emergentes, como sensores automatizados y sistemas de modelización basados en inteligencia artificial, se presenta como una alternativa viable para optimizar la evaluación de la calidad del aire y mejorar la toma de decisiones en materia de gestión ambiental.

Los resultados de la encuesta aplicada a la población han puesto en evidencia un nivel de conocimiento variable sobre la contaminación por material particulado y sus efectos en la salud. Si bien una mayoría de los encuestados reconoce los riesgos asociados a la inhalación de estas partículas, un porcentaje significativo desconoce los sistemas de medición y las fuentes de emisión, lo que resalta la necesidad de fortalecer la educación ambiental. Es fundamental implementar programas de concienciación que permitan informar a la población sobre la importancia del monitoreo del aire y el cumplimiento de las normativas ambientales, fomentando una mayor participación ciudadana en la vigilancia de la calidad del aire.

En cuanto a la normativa vigente, se ha identificado que si bien existen regulaciones claras que establecen límites máximos de concentración para el material particulado, su aplicación y cumplimiento siguen siendo desafíos en muchas regiones. La falta de infraestructura adecuada para la medición en tiempo real y la escasa supervisión en sectores con alta carga contaminante han dificultado el control efectivo de estos contaminantes. Ante esta situación, es imperativo fortalecer la capacidad de monitoreo mediante la instalación de estaciones de medición estratégicamente ubicadas, así como mejorar la articulación entre entidades gubernamentales, instituciones científicas y la sociedad civil para garantizar la aplicación efectiva de las regulaciones ambientales.

La relación entre la contaminación por material particulado y la salud pública es innegable. La exposición prolongada a niveles elevados de PM_{2.5} y PM₁₀ está asociada con un aumento en la incidencia de enfermedades respiratorias crónicas, afecciones

cardiovasculares y otros problemas de salud. Por esta razón, es fundamental adoptar medidas de mitigación que incluyan la modernización de los sistemas de monitoreo, la reducción de emisiones industriales y vehiculares, y el fortalecimiento de las políticas de calidad del aire. La implementación de nuevas tecnologías de medición, combinadas con estrategias de gestión ambiental basadas en evidencia científica, permitirá reducir los riesgos asociados a la contaminación atmosférica y mejorar la calidad de vida de la población.

Finalmente, los hallazgos de esta investigación refuerzan la necesidad de una acción coordinada para abordar el problema de la contaminación por material particulado. La optimización de los sistemas de monitoreo, el cumplimiento riguroso de las normativas ambientales y la educación de la población sobre los efectos del material particulado son elementos esenciales para avanzar hacia una gestión más eficiente de la calidad del aire. En este sentido, es crucial que se promueva el desarrollo de investigaciones futuras que permitan mejorar la comprensión de la dinámica del material particulado y evaluar la efectividad de las estrategias implementadas. Solo a través de un enfoque integral y multidisciplinario será posible reducir el impacto de este contaminante y garantizar un ambiente más saludable para las generaciones presentes y futuras.

Referencias bibliográficas

- Barrantes Flores, M. Á. (2021). Dispersión de material particulado (PM10 y PM2. 5) en Huancayo Metropolitano, región Junín, 2020. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/70050>
- Barrueta Tello, J. B. (2022). Material Particulado PM10, PM2. 5 en la ejecución del proyecto "Mejoramiento, Conservación por Niveles de Servicio y Operación" en el tramo Quisqui-Jacas Chico del departamento de Huánuco. <http://repositorio.udh.edu.pe/123456789/3261>
- Castillejo García, L. F., & Lopez Galvan, D. (2021). Análisis preliminar del material particulado PM10 Y PM2, 5 emitido por fuentes móviles en el sector carretera central del municipio de Curumaní, Cesar. <https://repositorioinstitucional.ufpso.edu.co/xmlui/handle/20.500.14167/4930>

- Ccapa Huayta, L. C. (2022). Determinación de los niveles de concentración de material particulado en el área de influencia del proyecto Minero Jesús 2004 TRES, distrito de Ananea-2022. <https://repositorio.upsc.edu.pe/handle/UPSC/443>
- Erazo-Luzuriaga, A. F., Ramos-Secaira, F. M., Galarza-Sánchez, P. C., & Boné-Andrade, M. F. (2023). La inteligencia artificial aplicada a la optimización de programas informáticos. *Journal of Economic and Social Science Research*, 3(1), 48–63. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v3/n1/61>
- Flórez Gómez, T. (2024). Evaluación del impacto de las emisiones de material particulado PM10 y PM2.5 de la mina El Cerrejón sobre la calidad del aire en su área de influencia. Universidad Nacional de Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/87389>
- Flórez Gómez, T. Y. *Evaluación del impacto de las emisiones de material particulado PM10 y PM2.5 de la mina El Cerrejón sobre la calidad del aire en su área de influencia* (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de Colombia).
- García Leal, S. A., & Martín Rivera, J. S. (2021). Análisis del comportamiento de la inmisión en cuanto a material particulado (PM10-PM2.5-Partículas UF) en la Estación Paiba del Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <http://hdl.handle.net/11349/27831>
- Guerra Manjarrés, C. A. (2023). Identificación y cuantificación de los contaminantes cancerígenos-hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP)-asociados a material particulado (PM2.5) en Barranquilla y su evaluación en la actividad hemolítica. <http://hdl.handle.net/10584/11630>
- Mieles-Giler, J. W., Guerrero-Calero, J. M., Moran-González, M. R., & Zapata-Velasco, M. L. (2024). Evaluación de la degradación ambiental en hábitats Naturales. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(3), 65–88. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n3/121>
- Montalván-Vélez, C. L., Mogrovejo-Zambrano, J. N., Romero-Vitte, I. J., & Pinargote-Carrera, M. L. D. C. (2024). Introducción a la Inteligencia Artificial: Conceptos Básicos y Aplicaciones Cotidianas. *Journal of Economic and Social Science Research*, 4(1), 173–183. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v4/n1/93>
- Proaño Proaño, E. F. (2024). *Estudio del material particulado y las afecciones respiratorias en los galpones de la agroavícola Santa Anita* (Bachelor's thesis, Ambato: Universidad Tecnológica Indoamérica). <https://repositorio.uti.edu.ec/handle/123456789/7456>
- Robalino-Latorre, M. C., Ramirez-Klinger, W. N., Guadalupe-Copa, R. C., & Cuello-García, S. A. (2023). Aplicación del Método Montecarlo en flujo de potencias a través del Software Octave. *Journal of Economic and Social Science Research*, 3(1), 31–47. <https://doi.org/10.55813/gaea/jessr/v3/n1/60>
- Ruiz, M., & Ruiz, E. (2023). Estudio de la correlación de la dinámica de material particulado (PM10 y PM2.5) con las condiciones meteorológicas en el municipio de Pasto utilizando estaciones meteorológicas portátiles. <https://hdl.handle.net/20.500.14112/28264>
- Sánchez Meza, A. L., & Aldaba Yumbato, D. A. (2022). Influencia de características antrópicas de tres zonas de la provincia de Coronel Portillo en la concentración de material particulado PM10 y PM2.5, Ucayali, Perú. <https://hdl.handle.net/20.500.14621/5647>
- Suazo, J. M. A., Vasquez, R. A., Navarro, J., Rojas, J. F., Marin, J. M. R., & Abi Karam, H. (2023). Variación espacial de concentración de material particulado en Junín y Amazonia de Brasil. *TAYACAJA*, 6(1), 30–32. <https://doi.org/10.46908/tayacaja.v6i1.205>

- Tonon, B. S. (2023). Monitoramento de material particulado atmosférico em ambientes internos: um estudo de caso aplicado em residências em um bairro de Vitória-Espírito Santo. <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/3515>
- Warthon Olarte, B. S., & Zamalloa Ponce de Leon, A. I. (2024). Caracterización fisicoquímica de material particulado PM 2.5 y PM10 en la ciudad de Cusco en el periodo 2017, 2018 y 2020. <http://hdl.handle.net/20.500.12918/9490>