La Granja: Revista de Ciencias de la Vida
pISSN:1390-3799; eISSN:1390-8596
https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.10

Artículo científico / Scientific paper

Ciencias Ambientales

Evaluación de la composición de aerosoles sedimentables en el área urbana del cantón Espíndola, provincia de Loja, Ecuador

Evaluation of the Composition of Settleable Aerosols in the Urban Area of Espíndola Canton, Loja Province, Ecuador

David Emmanuel del Pozo, María de los Angeles Alvarez* y Bryan Gabriel Valle

*Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador. [*https://ror.org/04dvbth24*]*

*Autor para correspondencia: mdalvarez8@utpl.edu.ec, mddel@utpl.edu.ec

Manuscrito recibido el 16 de abril de 2025. Aceptado, tras revisión el 9 de julio de 2025. Publicado el 1 de septiembre de 2026.

Resumen

El presente trabajo analiza la composición y concentración del material particulado sedimentable (MPS) en el área urbana del cantón Espíndola, con base en la limitada información sobre la calidad del aire en pequeñas comunidades rurales donde las emisiones vehiculares y la extracción de materiales representan fuentes de contaminación. Se planteó como objetivo determinar la concentración y composición química del MPS, específicamente la presencia de metales pesados como el cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb) y cobre (Cu), comparando los resultados de las concentraciones de MPS con la normativa ambiental del Ecuador (Acuerdo Ministerial 097-A), que establece un valor límite de 1 mg/cm^2 por 30 días. La metodología empleó un muestreo sistemático durante cinco meses en cinco puntos del área urbana; por medio de métodos gravimétricos y análisis químicos se obtuvieron los resultados con base en las concentraciones de MPS, los cuales, pese a encontrarse por debajo del límite máximo permisible, identificaron la presencia de metales pesados en las muestras. La distribución de estos metales mostró mayor correlación con las variaciones mensuales que con el uso del suelo. Se concluye que, si bien los niveles de MPS cumplen con la normativa ambiental, no se exime la presencia de metales pesados. Estos hallazgos resaltan la relevancia de monitorear continuamente la calidad del aire en regiones rurales como Espíndola, donde las actividades humanas, aunque limitadas, pueden contribuir a la contaminación atmosférica y a la dispersión de elementos tóxicos.

Palabras clave: Material particulado sedimentable, metales pesados, contaminación atmosférica, métodos gravimétricos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Abstract

The present study analyzes the composition and concentration of settleable particulate matter (SPM) in the urban area of the Espíndola canton. It is based on the limited information available regarding air quality in small rural communities, where vehicular emissions and material extraction represent sources of pollution. The objective is to determine the concentration and chemical composition of SPM, specifically the presence of heavy metals such as cadmium (Cd), chromium (Cr), lead (Pb), and copper (Cu), comparing the SPM concentration results with Ecuador's environmental regulation (Ministerial Agreement 097-A), which establishes a limit value of 1 mg/cm^2 over 30 days. The methodology involved systematic sampling over five months at five points within the urban area. Using gravimetric methods and chemical analyses, results were obtained based on SPM concentrations. Although levels were below the maximum permissible limit, the presence of heavy metals was identified in the SPM samples. The distribution of these metals showed a stronger correlation with monthly variations than with land use. It is concluded that, while SPM levels comply with environmental regulations, the presence of heavy metals cannot be ruled out. These findings highlight the importance of continuously monitoring air quality in rural regions such as Espíndola, where human activities, although limited, may contribute to atmospheric pollution and the dispersion of toxic elements.

Keywords: Settleable particulate matter, heavy metals, air pollution, gravimetric methods.

Forma sugerida de citar: del Pozo, D. E., Álvarez, M. A. y Valle, B. G. (2026). Evaluación de la composición de aerosoles sedimentables en el área urbana del cantón Espíndola, provincia de Loja, Ecuador. *La Granja: Revista de Ciencias de la Vida*. Vol. 44(2):171-184. https://doi.org/10.17163/lgr.n44.2026.10.

Orcid IDs:

David Emmanuel del Pozo Meza: https://orcid.org/0009-0008-9162-7410
María de los Angeles Alvarez Correa: https://orcid.org/0009-0008-5236-9498
Bryan Gabriel Valle Esparza: https://orcid.org/0009-0002-0689-7640

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

1 Introducción

La calidad del aire es un problema global que no se limita a una región específica, ya que el aire no tiene fronteras geográficas (Pérez Cárdenas, 2017). Los contaminantes atmosféricos, como el material particulado sedimentable (MPS), pueden ser transportados por el viento y afectar áreas menos contaminadas, ocasionando efectos adversos en la salud humana, los ecosistemas y la seguridad alimentaria (OPS, 2018). El MPS se define, según el anexo 4 del Acuerdo Ministerial 097-A, como las partículas sólidas o líquidas que, por acción de la gravedad, se depositan sobre una superficie horizontal, y cuyo tamaño permite su recolección en dispositivos estáticos durante un periodo determinado. Estas partículas están relacionadas con diversas fuentes, tanto naturales como antropogénicas. Entre las primeras se encuentran el polen, las esporas, los incendios forestales y las erupciones volcánicas (Suárez y Vásquez, 2017). Sin embargo, las actividades humanas, como la combustión de combustibles fósiles, las actividades industriales y el transporte vehicular, generan la mayor cantidad de contaminantes (Morocho, 2024).

El material particulado sedimentable (MPS) es un componente importante de la contaminación del aire (P. Santillán y cols., 2021). Este incluye partículas de diámetro aerodinámico mayor a 10 micrómetros ($PM_{>10}$), que debido a su tamaño no permanecen suspendidas en el aire por mucho tiempo, sedimentándose rápidamente sobre el suelo y otras superficies (Suárez y Vásquez, 2017). Su composición química incluye tanto metales pesados (Cd, Cr, Pb, Cu, Mg, Zn, Al, Ni, Mn), como aniones (cloruros, nitratos y sulfatos), que representan un riesgo significativo para la salud humana y el medio ambiente, debido a su toxicidad y capacidad de acumulación en la cadena alimentaria (Reyes y cols., 2016; Mejía y cols., 2018).

En Ecuador, la problemática de la calidad del aire afecta tanto a las grandes ciudades como a zonas rurales con menor desarrollo industrial (López y cols., 2022). Ciudades como Quito y Cuenca se han destacado por la inversión de recursos destinados al monitoreo de contaminantes atmosféricos, entre ellos el material particulado sedimentable, que ha permitido identificar concentraciones de hasta 2.86 mg/cm^2 por 30 días en la ciudad de Quito, según el reporte de la calidad ambiental del año 2013 (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2015). Por otra parte, en la ciudad de Cuenca se han registrado concentraciones más bajas entre 0.28 y 0.35 mg/cm^2 por 30 días (EMOV EP, 2021), reflejando la presencia de concentraciones variables de MPS, incluso en zonas de mayor monitoreo.

Algunos estudios han demostrado que factores como la resuspensión eólica del polvo urbano y el tráfico vehicular son fuentes significativas de partículas sedimentables, especialmente en zonas con infraestructura vial deficiente o tráfico lento que, en combinación con factores estacionales, contribuyen significativamente a la distribución y concentración de MPS y sus componentes en el aire (Valencia y cols., 2019; Villacis, 2023). A pesar de ello, los estudios sobre contaminación del aire en áreas rurales pequeñas son limitados o inexistentes, resaltando la importancia de investigaciones que evalúen la composición y los efectos de las partículas sedimentables en estos lugares (Solórzano, 2023).

El cantón Espíndola, en la provincia de Loja, presenta un contexto particular por ser una zona fronteriza con constante tránsito de transporte pesado, sumado a la presencia de actividades extractivas que podrían contribuir a la emisión de contaminantes atmosféricos que afectan la salud de los 1388 habitantes que residen en su área urbana (INEC, 2001). Por tal razón, el presente estudio tiene como objetivo principal evaluar la composición de aerosoles sedimentables en el área urbana del cantón Espíndola, con énfasis en la identificación de la concentración de material particulado sedimentable y la evaluación de la presencia de metales pesados en su composición.

2 Materiales y Métodos

2.1 Área de Estudio

El estudio se llevó a cabo en la zona urbana del cantón Espíndola, en la parroquia Amaluza, donde se seleccionaron cinco puntos representativos mediante un muestreo aleatorio estratificado.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 1. Distribución de puntos de muestreo

Sector	Punto	Uso de suelo	Descripción
Centro	1	CM	Centro urbano con alto tráfico vehicular.
Terminal	2	EQ2	Caracterizado por flujo continuo de vehículos.
Río	3	IND	Presencia de talleres mecánicos, balnearios y minería de áridos cercana.
Dolorosa	4	R1	Cercano a vías sin pavimentar.
Colegio	5	EQ1	Alto flujo vehicular asociado al horario escolar.

Puntos de muestreo y distribución en base al uso de suelo. Comercial (CM), Equipamiento de servicios sociales (EQ1), Equipamiento de servicios públicos (EQ2), Industrial (IND), Residencial (R1).

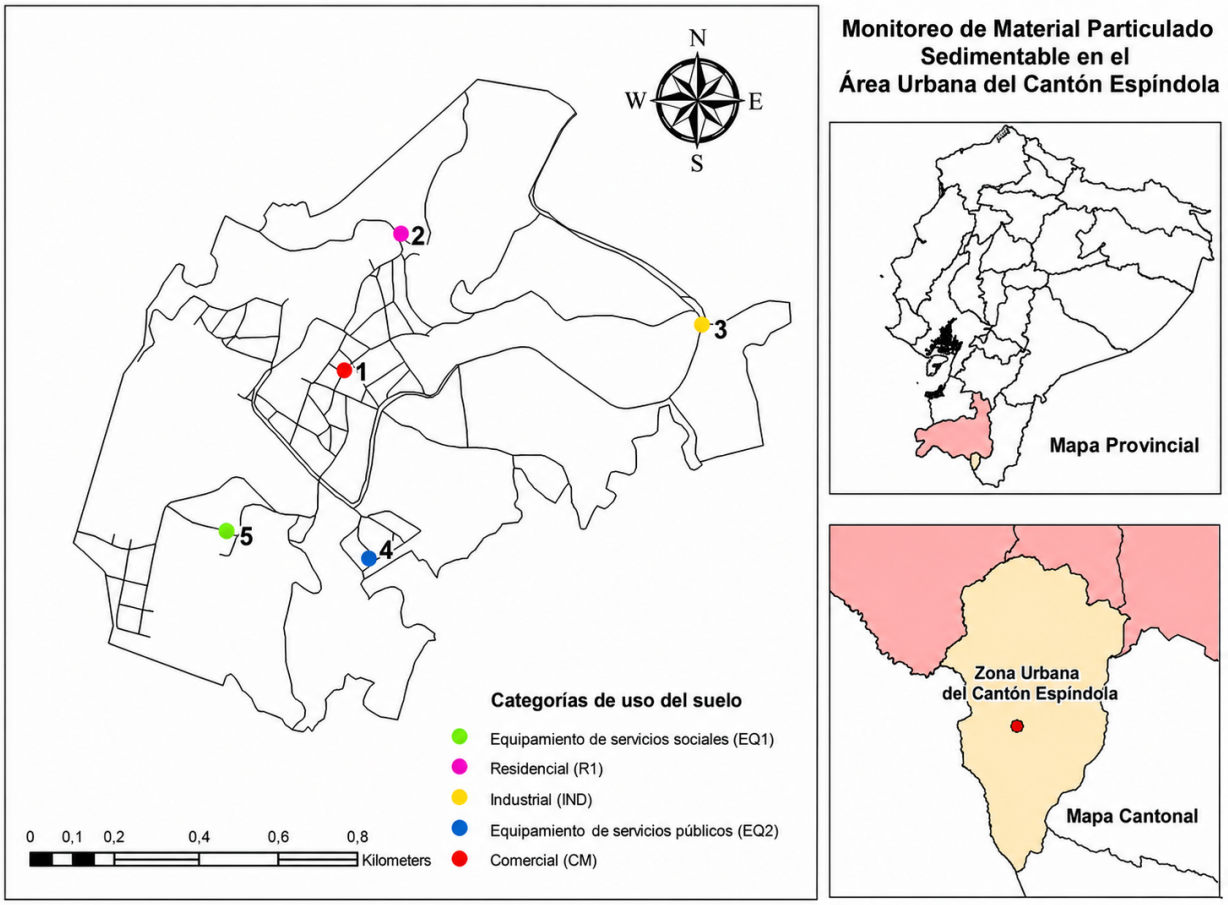


Figura 1. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

2.2 Información meteorológica del cantón Espíndola

De forma complementaria al muestreo de MPS, se recopiló información disponible sobre las condiciones meteorológicas predominantes del cantón Espíndola durante el periodo de muestreo. De acuerdo con los datos históricos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), 2024) y del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Espíndola (Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Espíndola, 2015), durante este periodo (marzo - julio) se presenta una marcada transición entre la época lluviosa y seca en la región. Por tanto, se recopilaron variables como precipitación, velocidad y dirección del viento, las cuales fueron tomadas en cuenta para el análisis de resultados, con el objetivo de relacionarlas con la dinámica del material particulado sedimentable.

2.3 Diseño e instalación de captadores

Los captadores de material particulado sedimentable (MPS) fueron diseñados siguiendo el Método 502 del manual *Methods of Air Sampling and Analysis* (Intersociety Committee, 1988) y en cumplimiento del Acuerdo Ministerial 097-A. Están fabricados con tubería de PVC de 15.24 cm de diámetro y un embudo del mismo tamaño, conectado a un contenedor de plástico de un galón. En la parte superior cuenta con una malla electrosoldada que filtra contaminantes gruesos, garantizando muestras representativas. Los captadores se instalaron a más de 2.5 metros sobre el nivel del suelo.



Figura 2. Captador de Material Particulado Sedimentable.

2.4 Recolección de muestras

El periodo de muestreo tuvo una duración de cinco meses continuos, buscando abarcar dos épocas estacionales entre los meses de marzo y julio del año 2024. La recolección de muestras se realizó cada 30 días conforme a los lineamientos establecidos en el anexo 4 del Acuerdo Ministerial 097-A. Una vez transcurrido ese tiempo se retiraron las muestras, realizando previamente un lavado con agua destilada para arrastrar las partículas adheridas tanto en las paredes del tubo del captador, como en el embudo, hacia el envase colector. Finalmente, se instaló un nuevo envase para la recolección de la muestra del siguiente mes.

Las muestras llevadas al laboratorio fueron separadas en fracciones solubles e insolubles, mediante la aplicación del método gravimétrico.

2.5 Análisis gravimétrico

Para cuantificar el material particulado sedimentable (MPS), se utilizaron filtros de cuarzo de 47 mm y cápsulas de porcelana, secados a 105 °C en la estufa para pesarse antes y después de la filtración. El equipo de filtración al vacío permitió la retención eficiente de partículas en los filtros. La concentración de MPS se calculó en mg/cm^2 por 30 días, utilizando la diferencia de peso entre los filtros y cápsulas antes y después del proceso, mediante la

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

aplicación de las siguientes ecuaciones en el software Microsoft Excel:

La tasa de caída de partículas insolubles se determinó mediante la ecuación (1):

$$Cf = \frac{Pf - Pi}{AT} \quad (1)$$

Donde: Cf es la concentración de partículas insolubles; Pi es el peso inicial del filtro antes de filtrar; Pf es el peso final del filtro después de filtrar; A representa el área de apertura del contenedor de precipitación de partículas expresada en m^2; y T es el tiempo de duración del monitoreo (30 días).

Para el cálculo de las tasas de caída de partículas solubles se empleó la ecuación (2):

$$Cs = \frac{(Mfs - Mis)}{AT} \frac{V1}{V2} \quad (2)$$

Donde: Cs es la concentración de partículas solubles; Mis es el peso inicial de la cápsula antes de filtrar; Mfs es el peso final de la cápsula después de filtrar; A es el área de apertura del contenedor de precipitación de partículas en m^2; T denota el tiempo de duración del monitoreo (30 días); $V1$ corresponde al volumen de todo el líquido filtrado expresado en litros; y $V2$ equivale al volumen de todo el líquido extraído convertido en litros.

Finalmente, la tasa total de caída de partículas se obtuvo a través de la ecuación (3):

$$Ct = Cu + Cs \quad (3)$$

Donde: Ct representa la tasa total de precipitación de partículas expresada en g/m^2 al mes; Cu es la tasa de caída de partículas insolubles en g/m^2 al mes; y Cs es la tasa de caída de partículas solubles expresada igualmente en g/m^2 al mes.

2.6 Comparación con límites establecidos para MPS

Para determinar si las concentraciones del material particulado exceden los límites recomendados, se tomaron como referencia los valores estipulados por el anexo 4 del Acuerdo Ministerial 097-A, como se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2. Límite máximo permisible para MPS

Legislación Ambiental Ecuatoriana TULSMA AM-097, Anexo 4
1 mg/cm^2 por 30 días

El valor de referencia corresponde a una concentración acumulada durante 30 días.

2.7 Digestión ácida y análisis de metales

Para evaluar metales pesados en el material particulado sedimentable (MPS), se realizó una digestión ácida asistida por microondas. Las muestras se incineraron a 500 °C durante tres horas para eliminar la materia orgánica, luego se trataron con 9 ml de ácido nítrico (HNO3) y 3 ml de ácido fluorhídrico (HF). La mezcla se digirió en microondas siguiendo el método US EPA 3052, se enfrió, filtró y diluyó a 25 ml con agua destilada.

La concentración de metales pesados se determinó mediante espectroscopía de absorción atómica (AA), utilizando estándares certificados para garantizar la precisión del análisis. Se seleccionaron cuatro metales: cobre (Cu), plomo (Pb), cadmio (Cd) y cromo (Cr), debido a su alta toxicidad y presencia común en fuentes antrópicas asociadas al transporte y actividades extractivas (Morales Tates y cols., 2024; Dall'Osto y cols., 2014). Además, esta selección se basó en la disponibilidad de insumos y reactivos y en el objetivo central del estudio, orientado a identificar la presencia o ausencia de metales pesados en el material particulado sedimentable.

3 Resultados y Discusión

Las condiciones climáticas recopiladas del Cantón Espíndola se describen en la Tabla 3. Durante los cinco meses de monitoreo el cantón atravesó una transición estacional característica de la región surandina del Ecuador, pasando de una época lluviosa a una seca, viéndose reflejada en la disminución de las precipitaciones y en el aumento en la velocidad del viento a partir del mes de mayo.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Tabla 3. Condiciones climáticas en el Cantón Espíndola

Mes	Precipitación promedio (mm)	Velocidad promedio del viento (km/h)	Dirección predominante
Marzo	160–200	8–12	Este–Noreste
Abril	130–170	9–14	Este–Noreste
Mayo	60–90	11–16	Este–Noreste
Junio	25–45	14–20	Este–Noreste
Julio	10–25	15–22	Este–Noreste

Intervalos de precipitación, velocidad del viento y dirección predominante.

Tabla 4. Caracterización química de MPS

Uso de suelo	Punto	Mes	MPS (mg/cm^2 × 30 días)	Cd (μg/L)	Cu (μg/L)	Pb (μg/L)	Cr (μg/L)
CM	1	Marzo	0.17	51.4	262.3	696.5	5.7
EQ1	2		0.22	217.4	282.1	1 042.2	21
IND	3		0.43	49.3	310.7	919.9	100.5
R1	4		0.28	41.2	234.1	872	7
EQ2	5		0.3	28.3	150.4	563.5	0
EQ1	2	Abril	0.39	31.4	157.2	662.5	69
IND	3		0.42	28.8	180.1	777.2	0
R1	4		0.22	25.1	131.8	580	0
EQ2	5		0.28	684	176.3	910.2	95.1
CM	1	Mayo	0.3	46.3	320	908.7	8.3
EQ1	2		0.31	67.1	277.6	837.6	89
IND	3		0.35	81.7	257.6	836.3	87.1
R1	4		0.27	108	213.7	758.3	72.5
EQ2	5		0.38	130.9	353.6	1 235.2	163.1
CM	1	Junio	0.25	38	242.6	769.9	0
EQ1	2		0.27	39.2	192.9	771.3	76.9
IND	3		0.51	43.8	350.3	910.5	95.5
R1	4		0.33	41.3	365.1	1 075.2	38
EQ2	5		0.25	19	130.5	538.6	0.3
CM	1	Julio	0.21	20.1	116	538.5	0
EQ1	2		0.3	17.7	112.8	536.8	0
IND	3		0.33	9.2	111.8	537.3	0
R1	4		0.27	19	216.6	703	68
EQ2	5		0.23	19.3	109.6	509.8	29

El MPS se expresa en mg/cm^2 por 30 días y Cd, Cu, Pb y Cr en μg/L. No se registraron concentraciones de MPS superiores al límite normativo de 1 mg/cm^2 por 30 días.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Las concentraciones del material particulado sedimentable (MPS) y metales pesados (Cd, Cu, Pb, Cr) obtenidos durante cinco meses de monitoreo continuo en diferentes usos de suelo se presentan en la Tabla 4. Si bien las concentraciones de MPS se mantuvieron dentro de los límites máximos permisibles de la normativa ambiental ecuatoriana, el análisis reveló la presencia de metales pesados, siendo el plomo el elemento más abundante. A pesar de que Ecuador eliminó el plomo en la gasolina en 1998 (Ministerio de Energía y Minas, 1998), sus efectos persisten debido a la acumulación histórica de este metal en suelos y sedimentos, que pueden liberarse nuevamente al medio ambiente (Tong y cols., 2016). En América Latina, la combinación de fuentes agrícolas, residuos de combustibles con plomo y materiales de construcción deteriorados genera perfiles atmosféricos complejos (Bergametti y cols., 2020; Iglesias y cols., 2012). Esta presencia de metales pesados concuerda con lo reportado en la literatura, donde se asocian a procesos industriales, desgaste vehicular y abrasión de sus componentes metálicos (Huang y cols., 2022).

La Figura 3 revela las concentraciones de material particulado sedimentable (MPS) en cada punto de muestreo, destacando al punto de muestreo número 3 (IND), ubicado en un área de uso industrial, como el que presentó las concentraciones más elevadas, con un promedio de 0.41 mg/cm^2 por 30 días y un pico máximo de 0.51 mg/cm^2 por 30 días. Estos valores podrían sugerir la influencia combinada de fuentes fijas y móviles en la zona industrial, como la extracción de materiales áridos y el tránsito de vehículos pesados, factores que propician la liberación y dispersión de partículas en la zona (Alloway, 2013; Muñoz P. y cols., 2021). Igualmente, en las zonas de uso industrial pueden intervenir otras fuentes, como talleres de mecánica y actividades de procesamiento de materiales áridos locales, que, aunque no siempre se encuentren formalmente registradas, pueden emitir partículas enriquecidas con metales como Cu y Cr. Estos sectores, al generar polvo resuspendido y desgaste de materiales metálicos, representan una fuente significativa de contaminantes atmosféricos en ambientes urbanos e industriales no regulados (Huang y cols., 2022; BaLich y cols., 2024). Por otra parte, el punto 1 (CM), asociado a un uso de suelo comercial, presentó las concentraciones más bajas, con una media de 0.23 mg/cm^2 por 30 días.

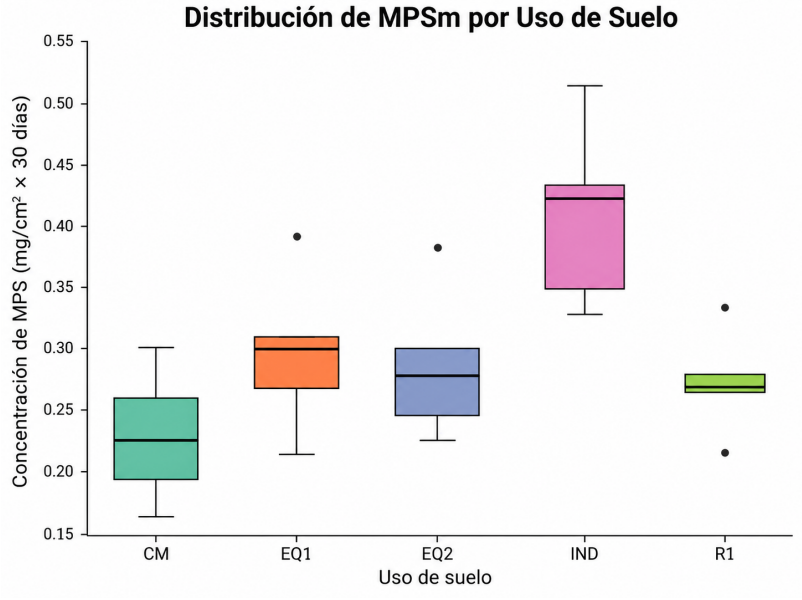


Figura 3. Diagrama de cajas de las concentraciones de material particulado sedimentable según el uso del suelo.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

La Figura 4 presenta las concentraciones de MPS a lo largo de los cinco meses de monitoreo, evidenciando una relativa estabilidad en los promedios mensuales, que oscilan entre 0.27 y 0.33 mg/cm^2 por 30 días. Pese a que durante este periodo se produce una transición climática marcada por la disminución progresiva de las lluvias y el aumento en la velocidad del viento desde mayo en adelante (Tabla 3), no se observaron diferencias considerables en las concentraciones promedio de MPS entre meses, mostrando que las condiciones meteorológicas por sí solas no explican completamente la variabilidad del material particulado sedimentable. La disminución de precipitaciones podría reducir el lavado atmosférico de partículas, mientras que el aumento de la velocidad del viento favorece la resuspensión de partículas previamente depositadas, facilitando el transporte de partículas, efecto que puede amplificarse en superficies sin pavimentar, zonas agrícolas secas y áreas industriales con baja cobertura vegetal (Zhao y cols., 2018).

Por otra parte, al analizar la dispersión de los datos se puede observar que los rangos de las concentraciones tienden a ser más estrechos en los meses más secos, lo cual podría deberse a factores como el tipo de uso del suelo, la intensidad del tráfico vehicular y las actividades locales que ejercen una mayor influencia sobre las concentraciones de MPS. Esto puede observarse durante el mes de junio, cuando se registró la concentración más alta del estudio (0.51 mg/cm^2 en 30 días) en la zona de uso industrial (IND).

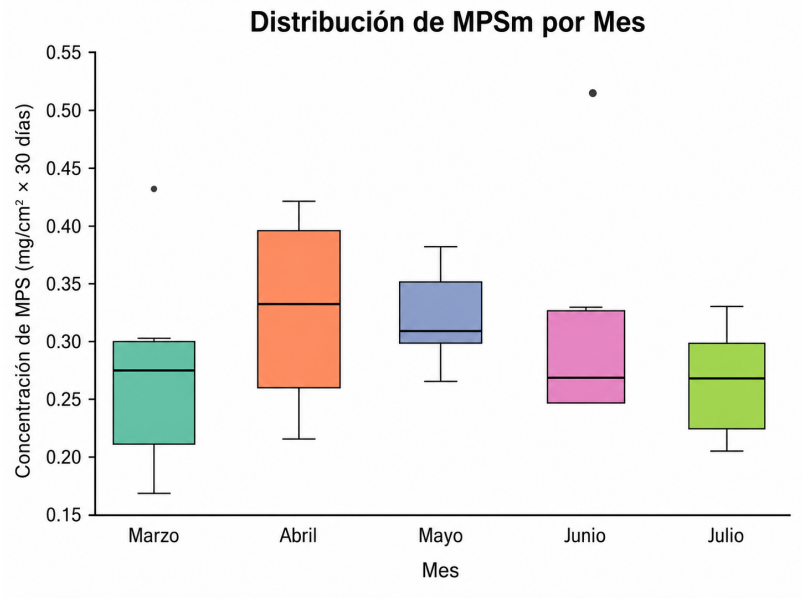


Figura 4. Diagrama de cajas de las concentraciones de material particulado sedimentable según el mes.

La Figura 5 muestra los resultados de la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis, revelando diferencias significativas en las concentraciones de MPS según el uso del suelo ($p = 0.020$), lo que sugiere que los niveles de material particulado sedimentable varían en función de las actividades y características ambientales propias de cada zona.

De forma similar, la prueba de Kruskal-Wallis aplicada a las concentraciones mensuales (Figura 6) muestra diferencias estadísticamente significativas para Cd, Cu y Pb ($p = 0.006$, 0.015 y 0.038, respectivamente). Estas fluctuaciones mensuales podrían atribuirse a factores como la orografía de Espíndola y la dinámica del transporte atmosférico, que podrían favorecer el arrastre de contaminantes desde otras zonas en función de las condiciones meteorológicas, así como a la estacionalidad de actividades agrícolas.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

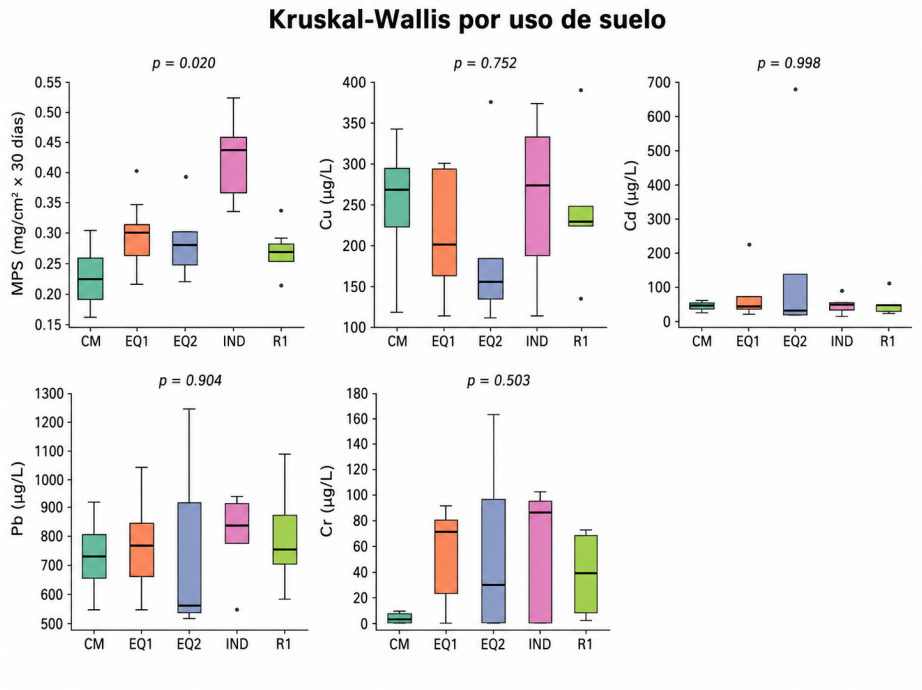


Figura 5. Prueba de kruskal-Wallis para diferencia de medias entre las concentraciones de MPS y metales por uso de suelo

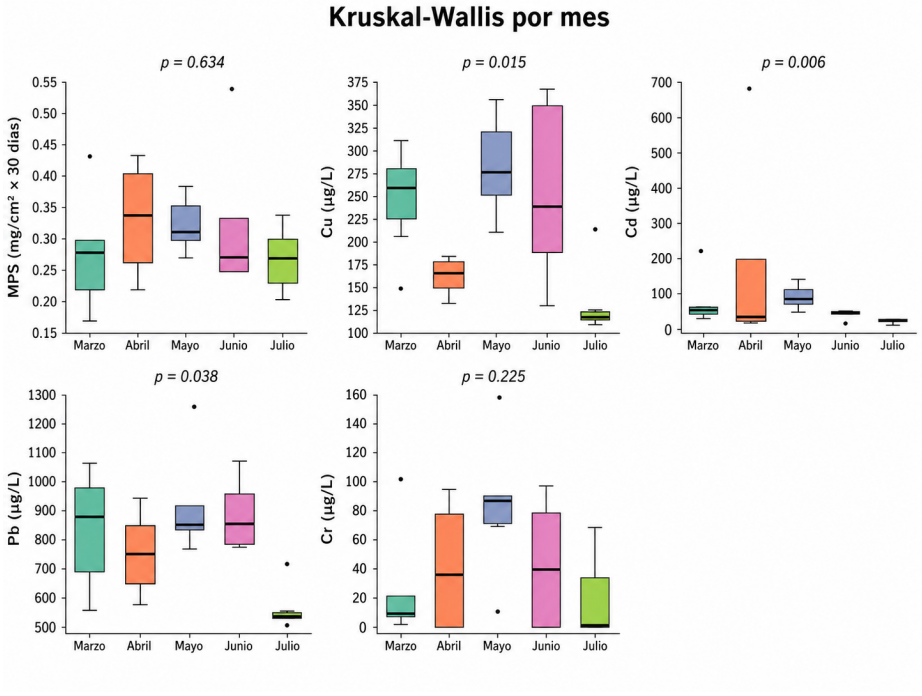


Figura 6. Prueba de kruskal-Wallis para diferencia de medias entre las concentraciones de MPS mensuales.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

El análisis de correlación de Spearman, cuyos resultados se resumen en la Figura 7, reveló una correlación positiva significativa entre Pb y MPS ($r = 0.421$, $p = 0.040$), así como entre Cr y MPS ($r = 0.435$, $p = 0.033$), lo que sugiere que estos metales tienden a acumularse o transportarse junto con el material particulado sedimentable, posiblemente debido a su afinidad por las partículas sólidas presentes en el aire y el suelo (Guo y cols., 2021; Zhao y cols., 2018). Además, se observaron correlaciones significativas entre los metales Cd, Cu, Pb y Cr, destacando especialmente la fuerte relación entre Pb y Cu ($r = 0.893$, $p = 0.000$), lo que apunta a la posibilidad de una interacción geoquímica o una fuente de emisión común provocada por el tráfico vehicular, abrasión de neumáticos, frenos y combustibles, así como del polvo resuspendido en áreas urbanas no pavimentadas (BaLich y cols., 2024; Cesari y cols., 2012; Huang y cols., 2022).

Estas correlaciones entre metales podrían estar influenciadas por las condiciones agroambientales y el manejo de suelos en Espíndola. Específicamente, la aplicación de fertilizantes fosfatados y plaguicidas en cultivos como café y caña de azúcar, prácticas comunes en la región, podría explicar la presencia de Cd, como señala Alloway (2013), quien identifica a estos insumos agrícolas como una fuente relevante de este metal en el suelo. Adicionalmente, la persistencia de Pb y Cu en partículas orgánicas y minerales, como se ha documentado en áreas impactadas por actividades agrícolas (Zhang y cols., 2020; Wang y cols., 2022), podría contribuir a la fuerte correlación observada entre estos dos metales.

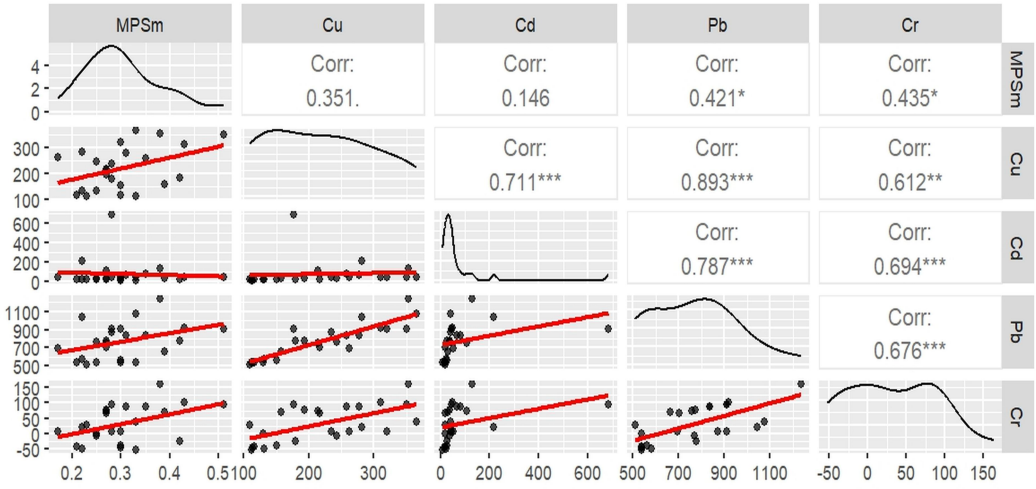


Figura 7. Matriz de correlación de Spearman entre el material particulado sedimentable y los metales analizados.

La correlación observada entre metales pesados como cadmio (Cd), cromo (Cr), plomo (Pb) y cobre (Cu) en el material particulado sedimentable está más influenciada por factores mensuales que por el uso del suelo en la zona estudiada. Estos metales son capaces de adherirse a partículas sólidas presentes en el aire y el suelo, como minerales (silicatos y óxidos de hierro) y materia orgánica, que actúan como vectores para su transporte y acumulación en diferentes áreas (Saeedi y cols., 2015). Este comportamiento se debe a la interacción de los metales con las superficies de estas partículas, donde quedan atrapados y protegidos frente a procesos de lixiviación, especialmente bajo condiciones de viento o disturbios mecánicos provocados por actividades humanas (Guo y cols., 2021; Zhao y cols., 2018).

El Pb y el Cu tienden a tener lugar en áreas impactadas por actividades agrícolas, ya que su persistencia en partículas orgánicas y minerales facilita su acumulación en suelos y sedimentos (Valdivieso y cols., 2024). Estas asociaciones están estrechamente vinculadas al uso de fertilizantes y pesticidas que contienen compuestos metálicos, lo que intensifica su presencia en el ambiente (Villacis, 2023). En contraste, la movilidad de metales como el Cr y Cd es mayor en ambientes ácidos, lo cual es co-

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

mún en suelos agrícolas perturbados por el uso de fertilizantes, plaguicidas y actividades de labranza. Según Abad (2014), estos compuestos, al estar solubilizados, pueden adherirse a partículas finas y facilitar su transporte aéreo, sobre todo en condiciones secas y ventosas. Esto puede observarse particularmente durante las estaciones secas, cuando la reducción de la humedad en el suelo y el aumento de la actividad del viento favorecen la dispersión de partículas contaminadas (Zhang y cols., 2020; Wang y cols., 2022).

Este patrón de correlación refleja las propiedades intrínsecas de los metales, como su afinidad por partículas minerales y orgánicas, así como la posible influencia de las condiciones climáticas específicas del área de estudio (Zegarra y cols., 2020). Las variaciones estacionales, especialmente durante periodos secos, podrían intensificar la movilidad de partículas cargadas de metales (Lara, 2022). La acción del viento en estas estaciones favorece la resuspensión y el transporte de material particulado sedimentable a largas distancias, redistribuyendo los metales en el ambiente (G. Santillán y cols., 2025). Esto resalta cómo las posibles dinámicas climáticas locales pueden contribuir a la dispersión y acumulación de Cd, Cr, Pb y Cu, contribuyendo a patrones de concentración marcados por variaciones mensuales (Wang y cols., 2022; Zhang y cols., 2020).

4 Conclusiones

Se detectaron incrementos puntuales en determinados periodos, asociados a posibles factores locales y estacionales. Además, la caracterización química evidenció la presencia de metales pesados como Cd, Cr, Pb y Cu en las muestras, incluso en áreas con concentraciones totales de MPS bajas. Estos hallazgos resaltan que, aunque el MPS cumpla con los estándares establecidos, su composición química puede representar riesgos para el ambiente y la salud humana.

Las correlaciones estadísticas sugieren que factores como la intensidad de los vientos, la orografía del terreno, la cercanía a fuentes específicas de emisión, y la movilización de partículas por actividades humanas desempeñan un papel crucial en la dispersión y acumulación de estos elementos. Se observó que las dinámicas climáticas locales, como los periodos secos y la resuspensión de partículas, aumentan la presencia de metales en el aire.

En conjunto, los resultados indican que la dinámica del material particulado sedimentable en Espíndola está determinada principalmente por condiciones locales específicas y la naturaleza de las fuentes emisoras, mientras que la influencia climática, si bien presente, no parece ser el factor predominante en la variabilidad de las concentraciones de MPS; no obstante, se encontró una influencia de la variación climática sobre los metales (Cd, Pb, Cu) a lo largo de los meses.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Técnica Particular de Loja por el apoyo y el financiamiento brindado en el desarrollo de esta investigación. Su respaldo fue clave para llevar a cabo el estudio y el análisis de los datos.

Declaración de uso de inteligencia artificial

Los autores DECLARAN que, durante la preparación del artículo titulado «Evaluación de la composición de aerosoles sedimentables en el área urbana del cantón Espíndola, provincia de Loja, Ecuador», se utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa exclusivamente como apoyo en la traducción y mejora de redacción de apartados puntuales del manuscrito. Estas herramientas no fueron empleadas para el análisis, interpretación de datos, generación de resultados, elaboración de conclusiones ni sustitución del criterio académico y científico de los autores.

Los autores asumen plena responsabilidad por el contenido, la originalidad, la integridad y la versión final del artículo.

Contribución de los autores

M.A.A.C.: Conceptualización, análisis de datos, muestreo. **B.G.V.E.:** Estadística, muestreo. **D.E.P.M.:** Diseño experimental, análisis de datos.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Referencias

Abad, M. (2014). *Fitotoxicidad del material particulado sedimentable (MPS) generado en la zona urbana del cantón Cuenca.* Online: https://short-url.cc/1yHlV (Disponible en línea)

Alloway, B. J. (2013). *Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. Springer. Online: https://short-url.cc/1taxP

BaLich, P., Anh Duc, T., Huy Thong, V., y Van Linh, N. (2024). Geochemical speciation, pollution assessment, and source identification of heavy metals in sediment cores of the Cau River basin, Hai Duong province, Vietnam. *RSC Sustainability*. Online: https://short-url.cc/1taxY

Bergametti, G., Formenti, P., Desboeufs, K., y Triquet, S. (2020). Trace elements in atmospheric aerosols: Sources and implications. *Elements*, 339–344.

Cesari, D., Contini, D., Genga, A., Siciliano, M., Elefante, C., Baglivi, F., y Daniele, L. (2012). Analysis of raw soils and their re-suspended PM10 fractions: Characterisation of source profiles and enrichment factors. *Applied Geochemistry*, *27*(6), 1238–1246. Online: https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.01.006

Dall'Osto, M., Beddows, D. C. S., Gietl, J. K., Olatunbosun, O. A., Yang, X., y Harrison, R. M. (2014). Characteristics of tyre dust in polluted air: Studies by single particle mass spectrometry (ATOFMS). *Atmospheric Environment*, *94*, 224–230. Online: https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.033

EMOV EP. (2021). *Informe de calidad del aire Cuenca 2020-2021* (Inf. Téc.). Cuenca, Ecuador: Empresa Pública de Movilidad, Tránsito y Transporte de Cuenca. Online: https://short-url.cc/1yHmj

Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal de Espíndola. (2015). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de Espíndola 2014-2019* (Inf. Téc.). Espíndola, Loja, Ecuador: GAD Municipal de Espíndola. Online: https://short-url.cc/1yHmn

Guo, J., Li, X., Wang, Y., y Zhao, L. (2021). Adsorption of heavy metals onto soil minerals: A review of recent advances. *Journal of Hazardous Materials*.

Huang, L., Zhang, X., Meng, Y., Yu, Y., y Qi, M. (2022). Sources and formation mechanisms of heavy metals in road dust: A review. *Environmental Pollution*, *303*.

Iglesias, V., Carreras, H., Pongrac, C., Alvarez, L., y Mateos, A. (2012). Atmospheric lead deposition in the Argentine Pampas: Historical trends from c. 1995–2006 in a fast-developing agricultural region. *Environmental Pollution*, 140–147.

INEC. (2001). *Instituto Nacional de Estadística y Censos.* Online: https://goo.gl/iczP53

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). (2024). *Datos históricos meteorológicos.* Quito, Ecuador. Online: https://geoservicios.inamhi.gob.ec/#/

Intersociety Committee. (1988). *Methods of air sampling and analysis*. Lewis Publishers. Online: https://short-url.cc/1yHmu

Lara, R. (2022). *Material particulado en suspensión y depósitos en la zona oeste de la aglomeración de Gijón* (Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo). Online: https://short-url.cc/1yHmz

López, J., Correa, J., Cano, Y., y Bermúdez, J. (2022). Evaluación de los gases de combustión y material particulado en el aire de parqueaderos del distrito metropolitano de Quito, Ecuador. *Revista Científica ECOCIENCIA*, *19*.

Mejía, D., Zegarra, R., Astudillo, A., y Moscoso, D. (2018). Análisis de partículas sedimentables y niveles de presión sonora en el área urbana y periférica de Cuenca. *Revista de la Facultad de Ciencias Químicas*, *19*.

Ministerio de Energía y Minas. (1998). *Acuerdo Ministerial No. 112: Autorización para la producción y comercialización a nivel nacional de gasolinas extra y súper sin plomo.* Registro Oficial No. 308 del 30 de abril de 1998. Quito, Ecuador.

Morales Tates, J., Morocho, L., Garzón, L., y Cepeda, M. (2024). Evaluación de la concentración de material particulado sedimentable en Fertisa Sur de Guayaquil. *Polo del Conocimiento*, *9*(3), 9–24. Online: https://doi.org/10.23887/pc.v9i3.6697

Morocho, D. (2024). Fuentes de contaminación atmosférica en zonas rurales. *Ciencia y Desarrollo Ambiental*, 27–39.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2015). *Informe de calidad del aire Quito* (Inf. Téc.). Quito, Ecuador: Dirección Metropolitana de Ambiente. Online: https://short-url.cc/1yHmE

Muñoz P., S., Salcedo R., J., y Sotomayor M., A. (2021). *Contaminación ambiental producida por el tránsito vehicular y sus efectos en la salud humana: revisión de literatura.* Online: https://goo.gl/abcd12

OPS. (2018). *Organización Panamericana de la Salud.* Online: https://short-url.cc/1yHmH

Pérez Cárdenas, A. (2017). Contaminación atmosférica: Una amenaza global. *Revista Internacional de Ciencias Ambientales*, 25–38.

Reyes, P., Morales, H., y Gómez, F. (2016). Impacto de los metales pesados en el ambiente y la salud humana. *Ciencia y Salud Ambiental*, 18–34.

Saeedi, M., Daneshvar, S., y Karbassi, A. (2015). Role of riverine sediment and particulate matter in adsorption of heavy metals. *International Journal of Environmental Science & Technology*. Online: https://www.bioline.org.br/pdf?st04017

Santillán, G., Rodríguez, M., Orozco, J., Paredes, M., Maldonado, C., y Rivadeneira, J. (2025). Determinación de la concentración de material particulado sedimentable en el barrio Juan Montalvo en el Cantón Riobamba. *TESLA Revista Científica*, *18*.

Santillán, P., Rodríguez, M., Orozco, J., Ríos, I., y Bayas, K. (2021). Evaluación de la concentración y distribución espacial de material particulado en los campus de la UNACH - Riobamba. *Scielo*. Online: https://short-url.cc/1yHmL (1 de diciembre)

Solórzano, P. (2023). *Monitoreo de material particulado sedimentable en la parroquia Coronel Marcelino Maridueña, provincia del Guayas durante el período 2023.* Online: https://short-url.cc/1yHmR

Suárez, L., y Vásquez, M. (2017). Composición y riesgos del material particulado. *Journal of Environmental Studies*, *10*(2), 56–67.

Tong, Y., Liu, X., y Zhang, Z. (2016). Status and phases of lead in typical garden soils from Beijing urban area. *Environmental Science and Pollution Research*.

Valdivieso, J., Coral, K., y Esteban, J. (2024). Determinación de la concentración de metales pesados mediante la caracterización de material particulado sedimentable en la reserva biológica Limoncocha, Ecuador. *Atena Editora*. Online: https://short-url.cc/1tayK (1 de abril)

Valencia, P., Sánchez, F., Tigua, M., y Mena, S. (2019). Cálculo referencial de material particulado en el aire como factor de contaminación en Pujilí. *Revista Científica Cienciamerica*, *8*(2), 15–24.

Villacis, O. (2023). *Plomo en material particulado sedimentable aledañas en terminales de transporte masivo, Guayaquil-Ecuador.* Online: https://short-url.cc/1tayN (Agosto)

Wang, F., Qiao, H., y Zhao, J. (2022). The influence of climatic variability on the resuspension and transport of sediment-bound heavy metals. *Environmental Research*.

Zegarra, R., Andrade, S., Parra, M., Mejía, D., y Rodas, C. (2020). Análisis espacial de PM10 en el aire y su composición de metales con relación a factores ambientales alrededor de centros de educación preescolar en Cuenca. *Maskana*. Online: https://short-url.cc/1yHn4 (29 de abril)

Zhang, Z., Chen, Y., y Xiao, H. (2020). High-efficiency solar evaporator prepared by one-step carbon nanotubes loading on cotton fabric toward water purification. *Science of the Total Environment*. Online: https://short-url.cc/1yHn9

Zhao, Y., Shao, M., y Zhang, Z. (2018). Heavy metals in agricultural soils from a typical mining region in China: Spatial distribution, risk assessment, and sources. *Ecotoxicology and Environmental Safety*.

©2026, Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador.