

# Innovación metodológica en la captura de metales pesados emitidos por lechos de secado de lodos en el Parque Tecnológico Ambiental Antanas

**Juan José Morán Cortés**

Estudiante de Ingeniería Ambiental  
Universidad Mariana

**Juan Carlos Narváez Burgos**

Profesor de Ingeniería Ambiental  
Universidad Mariana

## Resumen

Este estudio presenta una innovación adaptativa en la metodología de muestreo para la determinación de metales pesados emitidos durante el proceso de secado de lodos en el Parque Tecnológico Ambiental Antanas de la ciudad de Pasto, Nariño, Colombia. La investigación se centró en el desarrollo y aplicación de un método optimizado utilizando un muestreador de alto volumen (Hi-Vol) invertido, posicionado a 10 cm de la superficie de los lechos de secado, cuya metodología adaptada se basó en los métodos IO-3.1 e IO-3.2 de la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés), modificados para permitir un muestreo más preciso y cercano a la fuente de emisión. Se hizo muestreos continuos de 24 horas, seguidos de un análisis por espectrofotometría de absorción atómica para cuantificar las concentraciones de cobre, hierro y zinc. Los resultados revelaron patrones de emisión distintos para cada metal, donde el cobre mostró concentraciones iniciales elevadas que disminuyeron gradualmente; el hierro presentó una variabilidad significativa a lo largo del tiempo, y el zinc mantuvo concentraciones relativamente estables. Estas observaciones proporcionan información valiosa sobre las dinámicas de emisión en los lechos de secado de lodos y es aquí donde la innovación metodológica demostró varias ventajas sobre los métodos convencionales, incluyendo una mayor resolución temporal, sensibilidad mejorada y una caracterización más precisa de las emisiones específicas de la fuente. Estos beneficios tienen implicaciones significativas para la evaluación de riesgos ambientales y el desarrollo de estrategias de mitigación más efectivas. Finalmente, el estudio concluye que esta adaptación metodológica representa un avance importante en la monitorización y comprensión de las emisiones de metales pesados en instalaciones de tratamiento de residuos; los hallazgos subrayan la importancia de considerar la variabilidad espacial y temporal en las emisiones, y ofrecen una base sólida para futuras investigaciones y mejoras en las prácticas de gestión ambiental. Así pues, este trabajo contribuye significativamente al campo de la gestión de residuos y la calidad del aire, proporcionando una herramienta innovadora para la caracterización detallada de emisiones de metales pesados en entornos de tratamiento de lodos residuales.

## Introducción

La gestión de los residuos sólidos urbanos y el tratamiento de lixiviados en los rellenos sanitarios representan desafíos ambientales significativos para la sociedad actual, particularmente en lo que respecta a la emisión de contaminantes atmosféricos de alta complejidad; entre estos, los metales pesados, que son de especial preocupación. Debido a su persistencia en el medio, diversos elementos conforman los bienes y servicios ecosistémicos en la matriz ambiental; esto puede llevar a efectos perjudiciales en la salud humana y en los propios ecosistemas (Ojedokun y Bello, 2016).

Específicamente, en este estudio se recoge muestras, donde los procesos de secado de lodos derivados del tratamiento de los lixiviados son una fuente potencial efectiva de emisión de estos contaminantes. Para el correcto muestreo se realizó una adaptación metodológica con la cual se logró una muestra exitosa de emisiones provenientes de una superficie de secado.

La evaluación de las emisiones de metales pesados en entornos de tratamiento de residuos ha sido objeto de numerosos estudios; sin embargo, las metodologías convencionales de muestreo atmosférico a menudo no logran capturar adecuadamente las emisiones específicas de los lechos de secado de lodos. Como señalan Yu et al. (2019), “las técnicas de muestreo estándar pueden subestimar las concentraciones de contaminantes en las proximidades inmediatas de las fuentes de emisión” (p. 583).

En respuesta a esta limitación, la presente investigación propone una innovación adaptativa de los métodos IO-3.1 e IO-3.2 establecidos por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (Centro de Información de Investigación del Medio Ambiente, Oficina de Investigación y Desarrollo y Agencia de Protección Ambiental (EPA), 1999). Esta adaptación implica la modificación del muestreador de alto volumen Hi-Vol Thermo Andersen G10557 para permitir la captura de muestras de aire en material particulado suspendido en estrecho contacto con la superficie del lodo. Según Galvão et al. (2018), “la optimización de las técnicas de muestreo es crucial para obtener una representación precisa de las emisiones de contaminantes en condiciones específicas” (p. 587).

La metodología propuesta busca superar las limitaciones de los enfoques convencionales al posicionar el Hi-Vol de forma inversa a lo recomendado, a una distancia de diez centímetros sobre la superficie de los lechos de secado. Este enfoque innovador permite una caracterización más precisa de las emisiones de metales pesados en la interfaz aire-lodo, proporcionando datos fundamentales para la evaluación de riesgos ambientales y la formulación de estrategias de gestión más efectivas. El objetivo principal fue desarrollar y validar un método de muestreo y preparación de muestras optimizado para la cuantificación por absorción atómica de metales pesados generados durante el proceso de secado de lodos a escala de laboratorio. La importancia de este estudio radica en su potencial para mejorar nuestra comprensión de las dinámicas de emisión de metales pesados en procesos de tratamiento de lixiviados, contribuyendo así al desarrollo de prácticas de gestión ambiental más sostenibles y eficaces en el contexto de los rellenos sanitarios.

## Materiales y Métodos

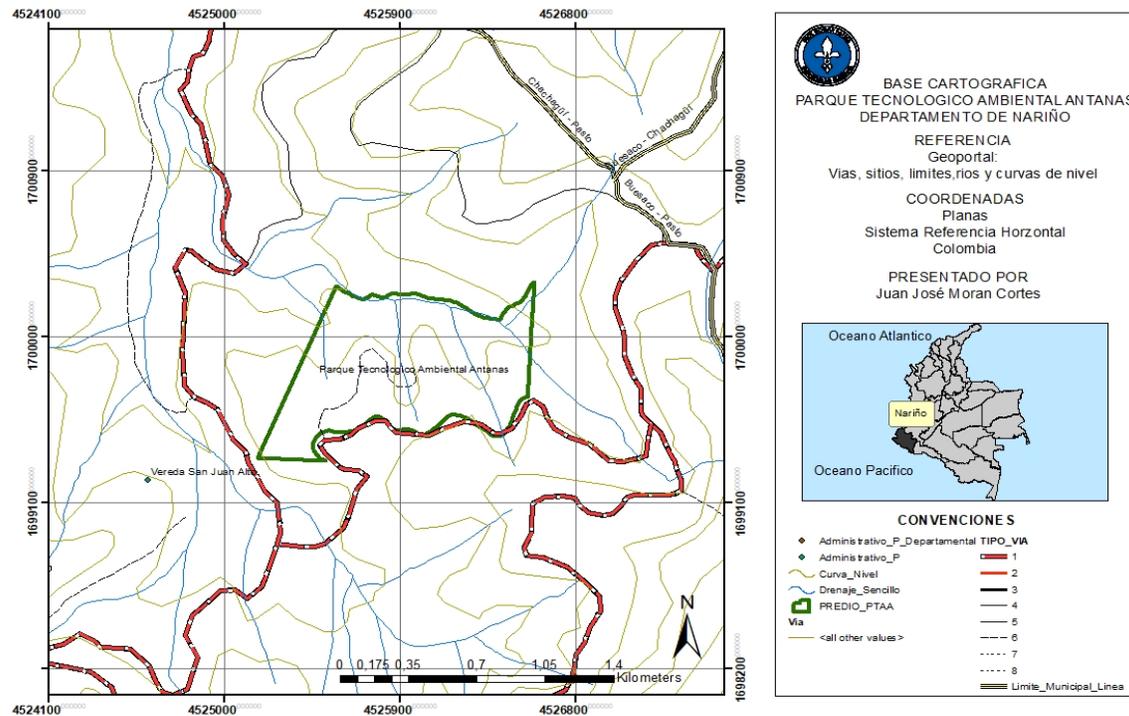
La presente investigación se basa en la captura efectiva de las emisiones provenientes de un sistema de secado de lodos residuales provenientes del tratamiento de lixiviados en un reactor biológico secuencial discontinuo para procesos de nitrificación (aerobia) y desnitrificación (anaerobia), ubicado en el Relleno Sanitario Antanas.

Los lodos obtenidos del reactor son sometidos inicialmente a un proceso de remoción de carga orgánica en un reactor de lodos activos, lo que permite reducir la carga orgánica en un 70 %. Posteriormente, los lodos son dispuestos en un proceso de secado en piscinas ubicadas en el Parque Tecnológico Ambiental Antanas. Este sistema es gestionado por la empresa EMAS By Veolia, y está ubicado a 13 kilómetros al norte de la capital nariñense en la vereda La Josefina, como se evidencia en la Figura 1.

Cabe destacar que en este lugar la empresa dispone de una instalación dedicada a la disposición final de residuos sólidos, donde se lleva a cabo el tratamiento de lixiviados generados por la descomposición de residuos orgánicos.

Figura 1

Mapa base de ubicación de zona de estudio Parque Ambiental Antanas



El espacio de estudio es adyacente a las piscinas de secado de lodos, como se aprecia en la Figura 2, en donde se hizo mediciones y recolección de muestras estratégicas para obtener datos representativos de las emisiones de metales pesados durante el secado. Además, se tuvo en cuenta las condiciones ambientales y meteorológicas durante el período de estudio. Se registró datos como la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar, con el fin de evaluar su influencia en las emisiones de los metales pesados analizados.

Figura 2

Zona de estudios en lechos de secado



La determinación de metales pesados en muestras de aire se efectuó mediante una adaptación innovadora de los métodos IO-3.1 e IO-3.2 de la EPA (1999). El proceso de muestreo se llevó a cabo utilizando algunos componentes de un muestreador de alto volumen (Hi-Vol), tales como bomba de succión, Venturi de regulación de caudal, Cámara de vacío y porta filtros TSP. Esta disposición está diseñada específicamente para capturar material particulado suspendido en proximidad a la superficie de los lechos de secado de lodos, como se evidencia en la Figura 3, en donde se posicionó el Hi-Vol invertido a una distancia de 10 cm sobre la superficie del lodo.

Esta configuración permite una captura efectiva de las emisiones en la interfaz aire-lodo. Esta modificación representa una innovación significativa en la metodología de muestreo, abordando las limitaciones de los enfoques convencionales señaladas por Yu et al. (2019).

### Figura 3

Modificación del posicionamiento del Hi-Vol de forma invertida para toma de muestra



Para el muestreo, se seleccionó filtros de fibra de cuarzo Whatman™ de grado QM-H debido a su bajo contenido de metales, baja higroscopicidad, resistencia química y térmica, características que aseguran una captura fiable de los analitos de interés (Galvão et al., 2018). Previo y posterior al muestreo, los filtros fueron acondicionados en un ambiente controlado, manteniendo una humedad relativa inferior al 50 % y una temperatura entre 15 y 35 °C, siguiendo las recomendaciones de la EPA (1999).

El periodo de muestreo se extendió por 24 horas continuas; tras la recolección, las muestras fueron pesadas, selladas en bolsas ziploc esterilizadas para prevenir contaminación y, transportadas al Laboratorio de Química de la Universidad Mariana, Sede Alvernia, en donde se procedió a la preparación de las muestras para análisis. Se cortó cuidadosamente tiras de 2.5 cm por 20 cm de los filtros, las cuales fueron transferidas a vasos de precipitados de 100 mL. A cada muestra se le añadió 30 mL de una solución ácida mixta, compuesta por ácido clorhídrico (HCl) al 5,55 % y ácido nítrico (HNO<sub>3</sub>) al 16,75 %, en una proporción 1:1. Esta etapa de digestión ácida es crucial para la liberación de los metales del material particulado fijado en el filtro, como señalan Ojedokun y Bello (2016). Las muestras fueron sometidas a un calentamiento en baño maría durante 30 minutos, seguido de un periodo de enfriamiento de igual duración. Posteriormente, se realizó una filtración para eliminar material insoluble que pudiera interferir en el análisis. Las soluciones resultantes fueron transferidas a balones aforados de 50 mL, ajustando el volumen final con agua destilada.

Para el análisis cuantitativo se preparó una curva de calibración específica para cada metal de interés: cobre (Cu), hierro (Fe) y zinc (Zn), utilizando soluciones estándar y asegurando la consistencia de los parámetros instrumentales entre muestras y estándares, como se evidencia en las figuras 4, 5 y 6. El análisis se hizo mediante espectrofotometría de absorción atómica, utilizando el equipo Thermo Scientific iCE 3000. Como parte del control de calidad, se analizó filtros sin muestra (blancos) para identificar y corregir posibles interferencias provenientes del material del filtro; este paso es esencial para garantizar la precisión en la detección de metales pesados, como lo recomiendan Galvão et al. (2018).

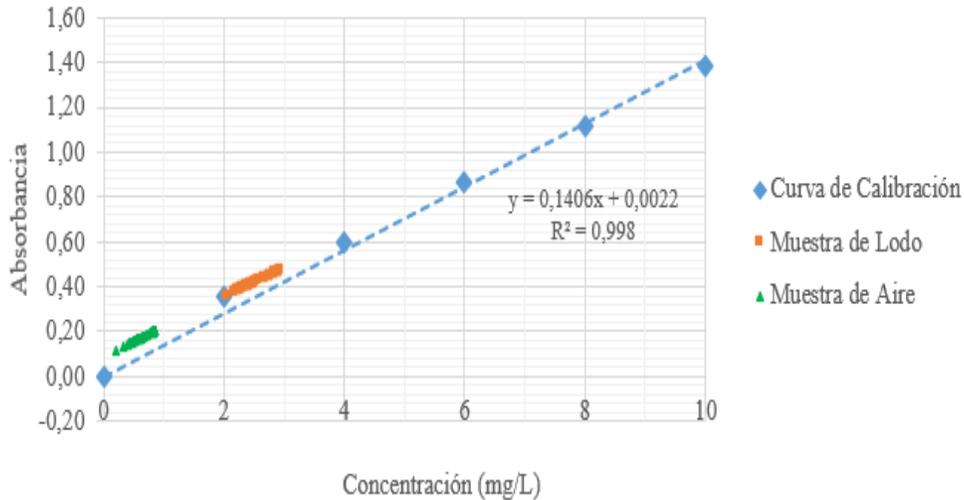
### Resultados

Como se puede apreciar en las figuras 4, 5 y 6, se presenta las curvas de calibración para cada metal, utilizando cinco diluciones para representar una regresión lineal; la pendiente de la regresión es de 0.1406, destacándose el valor de bondad del ajuste R<sup>2</sup> para la gráfica, de 0.998, lo que indica que cuenta con un alto nivel de determinación. Buscio et al. (2009) evaluaron la determinación de metales pesados en muestras textiles mediante espectrofotometría

de absorción atómica con atomización electrotérmica de horno de grafito y obtuvieron un valor de  $R^2$  de 0.9977 para la curva de calibración; esto indica una similitud en los resultados de la curva de calibración, indicando que la metodología de calibración utilizada, según las pautas de la EPA, es efectiva y produce resultados consistentes.

**Figura 4**

Curva de calibración en absorción atómica de cobre



Peñaloza et al. (2023) evaluaron la técnica espectroscópica de absorción atómica para determinaciones en química ambiental; evidenciaron que, para sus curvas de calibración tanto para hierro y zinc, los valores de un  $R^2$  son de 0.9988 para hierro y de 0.9983 para zinc, siendo estos valores, similares a los datos obtenidos en el presente estudio. Cabe resaltar que estos autores utilizaron un equipo de lectura de absorción atómica Perkin Elmer AAnalyst 200.

**Figura 5**

Curva de calibración en absorción atómica de hierro

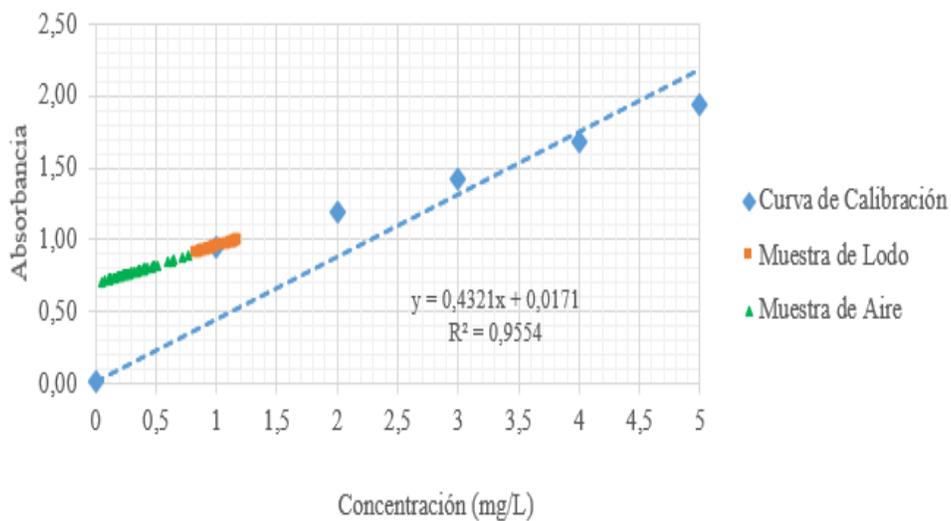
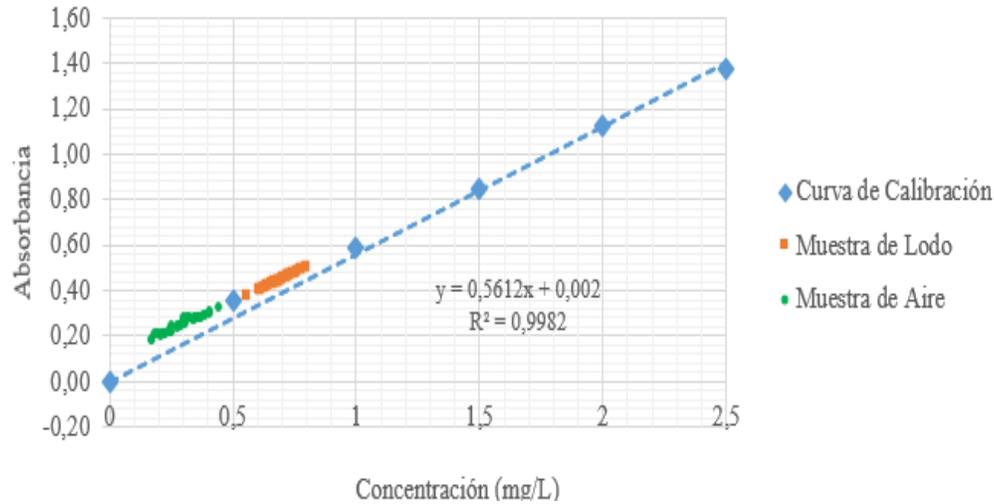


Figura 6

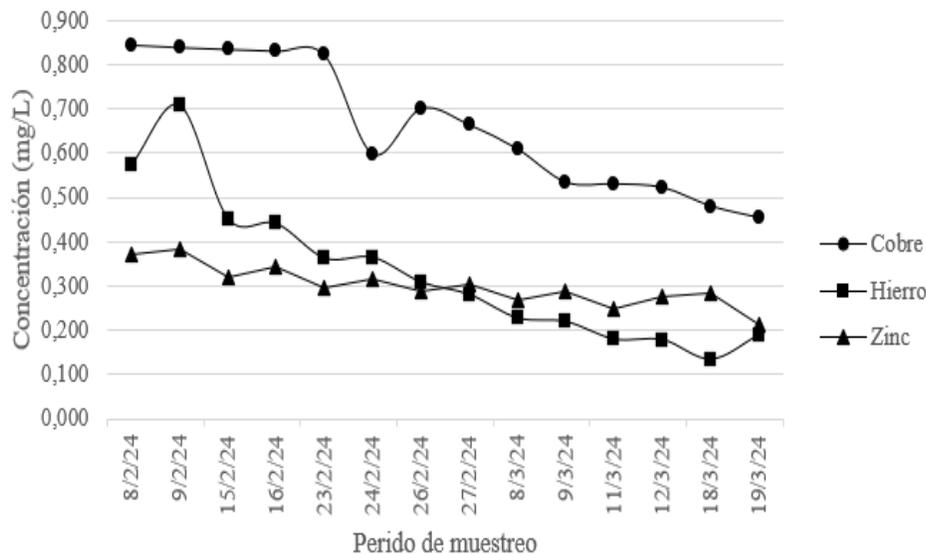
Curva de calibración en absorción atómica de zinc



La implementación del muestreador de alto volumen (Hi-Vol) invertido como innovación metodológica para la captura de metales pesados en proximidad a los lechos de secado de lodos ha generado resultados significativos que aportan nueva luz sobre las dinámicas de emisión en estos entornos. Este enfoque adaptado permitió la detección y cuantificación precisa de Cu, Fe y Zn en el aire adyacente a la superficie de secado, ofreciendo una perspectiva única sobre los patrones de emisión de estos metales. El análisis de las concentraciones de Cu, Fe y Zn a lo largo del período de muestreo reveló patrones temporales distintivos para cada metal, como se ilustra en la Figura 7.

Figura 7

Concentraciones promedio de Cu, Fe y Zn en aire ambiente de zona de estudio durante periodo de muestreo



El Cu exhibió las concentraciones más elevadas entre los metales analizados, con valores promedio de 0,66 mg/L con una desviación estándar de 0,17 mg/L. Esta tendencia sugiere una liberación inicial significativa de cobre durante las primeras etapas del proceso de secado, posiblemente debido a la volatilización de compuestos de cobre más lábiles. La liberación de metales pesados durante el tratamiento de lodos puede estar influenciada por factores como el pH, la temperatura y la actividad microbiana, con fases iniciales que a menudo muestran tasas de emisión más altas. Por otro

lado, el Fe presentó una notable variabilidad, con valores promedios de 0,33 mg/L con una desviación estándar de 0,17 mg/L; esto podría indicar la influencia de factores ambientales o procesos específicos del tratamiento de lodos en la emisión de hierro. Según Guo et al. (2021), las fluctuaciones en las concentraciones de hierro en emisiones atmosféricas pueden estar relacionadas con cambios en las condiciones redox del lodo durante el proceso de secado.

Finalmente, el Zn demostró mayor estabilidad en sus concentraciones a lo largo del tiempo, con valores promedio de 0,30 mg/L, una desviación estándar de 0,07 mg/L y, ligeras fluctuaciones. Esta consistencia sugiere una emisión más uniforme de Zn durante el proceso de secado. Yu et al. (2019) observaron patrones similares en sus estudios, indicando que el Zn tiende a formar complejos estables en lodos, lo que resulta en tasas de emisión más constantes, en comparación con otros metales.

Es aquí donde el impacto de la innovación metodológica y la capacidad del Hi-Vol invertido para capturar estas variaciones temporales y diferencias entre metales subraya la eficacia de esta adecuación de la metodología actual, en comparación con métodos de muestreo convencionales.

Esta técnica proporcionó con los resultados una mayor resolución temporal, lo que permitió detectar fluctuaciones a corto plazo en las concentraciones de metales, vital para entender los procesos de emisión durante el secado de lodos. Como afirman Galvão et al. (2018), “la alta resolución temporal en el muestreo de contaminantes atmosféricos es esencial para identificar picos de emisión y correlacionarlos con variables operativas específicas” (p. 558).

Asimismo, se demostró una sensibilidad mejorada, ya que la proximidad del muestreador a la fuente de emisión (10 cm sobre la superficie del lodo) facilita la fijación de partículas con contenidos de metales en concentraciones que podrían diluirse o no ser detectables con métodos de muestreo a mayor altura, lo que concuerda con lo observado por Yu et al. (2019), quienes señalan que el muestreo cercano a la fuente puede revelar concentraciones de contaminantes significativamente más altas que las detectadas por métodos de muestreo ambiental estándar.

Igualmente, aportó una caracterización específica de la fuente, ya que los resultados obtenidos reflejan con más precisión las emisiones directas del proceso de

secado de lodos, minimizando la influencia de otras fuentes ambientales. Esta especificidad es crucial para desarrollar estrategias de mitigación dirigidas, como sugieren Ojedokun y Bello (2016) en su revisión de técnicas de control de emisiones en tratamiento de residuos. Finalmente, la implementación de esta innovación adaptativa de la metodología suministrada por la EPA, generó un potencial para evaluación de riesgos mejorada, ya que las concentraciones detectadas, especialmente los niveles elevados de Cu, sugieren que las evaluaciones de riesgo basadas en métodos de muestreo convencionales podrían subestimar la exposición real en las inmediaciones de los lechos de secado. Esto tiene implicaciones significativas para la salud ocupacional y ambiental, al analizar los riesgos asociados a emisiones de metales pesados en instalaciones de tratamiento de residuos.

La variabilidad observada en las concentraciones de los tres metales a lo largo del tiempo subraya la importancia de un muestreo continuo y cercano a la fuente, cuya información es crucial para desarrollar estrategias de mitigación más efectivas y para una comprensión más profunda de los factores que influyen en las emisiones de metales pesados durante el proceso de secado de lodos.

## Conclusión

La innovación adaptativa en la metodología de muestreo mediante el uso del Hi-Vol invertido ha demostrado ser un avance significativo en la caracterización de emisiones de metales pesados en lechos de secado de lodos, en donde esta técnica ha permitido obtener una perspectiva sin precedentes sobre las dinámicas de emisión de cobre, hierro y zinc en proximidad inmediata a la fuente. La capacidad de capturar variaciones temporales precisas en las concentraciones de metales pesados reveló patrones de emisión que anteriormente pasaban desapercibidos con métodos de muestreo convencionales; así pues, esta resolución mejorada en los datos proporciona una base sólida para el desarrollo de estrategias de mitigación más efectivas y específicas, donde la sensibilidad aumentada del método, lograda mediante el posicionamiento cercano a la superficie del lodo, ha permitido detectar concentraciones que podría subestimarse o no detectarse con técnicas estándar. Para finalizar, se resalta que la aplicación de esta metodología innovadora abre nuevas vías para la investigación en el campo del tratamiento de residuos y la calidad del aire y, proporciona una herramienta valiosa para futuros estudios sobre la dinámica de emisiones en diversos contextos de tratamiento de lodos y otros procesos similares.

## Referencias

- Buscio, V., Álvarez, M. D. y Gutiérrez-Bouzán, M. C. (2009). Determinación de metales pesados en tejidos mediante espectroscopia de absorción atómica con atomización electrotérmica. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099/13126>
- Centro de Información de Investigación del Medio Ambiente, Oficina de Investigación y Desarrollo y Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). (1999). *Compendio de métodos para la determinación de compuestos inorgánicos en aire ambiente*. Agencia de Protección Ambiental.
- Galvão, E. S., Santos, J. M., Lima, A. T., Reis, N. C., Orlando, M., & Stuetz, R. M. (2018). Trends in analytical techniques applied to particulate matter characterization: A critical review of fundamentals and applications. *Chemosphere*, 199, 546-568. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.02.034>
- Guo, S., Xing, X., Che, D., Liu, H., & Sun, B. (2021). Effects of sludge pyrolysis temperature and atmosphere on characteristics of biochar and gaseous pro. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 38(1), 55-63. <https://doi.org/10.1007/s11814-020-0685-0>
- Ojedokun, A. T. & Bello, O. S. (2016). Kinetic modeling of liquid-phase adsorption of Congo red dye using guava leaf-based activated carbon. *Applied Water Sciences*, 7, 1965-1977. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0375-y>
- Peñaloza, D. J., Barúa, M. G., Escalada, J. P. y Pajares, A. M. (2023). Técnica espectroscópica de absorción atómica para determinaciones en química ambiental. *Informes Científicos Técnicos - UNPA*, 15(3), 157-176. <https://doi.org/10.22305/ict-unpa.v15.n3.987>
- Yu, L., Wang, G., Zhang, R., Zhang, L., Song, Y., Wu, B., Li, X., An, K., & Chu, J. (2019). Characterization and source apportionment of PM<sub>2.5</sub> in an urban environment in Beijing. *Aerosol and Air Quality Research*, 13(2), 574-583. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2012.07.0192>