



ESTUDIO COMPARATIVO DE PARÁMETROS MAGNÉTICOS DE MATERIAL PARTICULADO ASOCIADOS A DIFERENTES CORREDORES DE TRANSPORTE PÚBLICO EN BÓGOTA Y CIUDAD DE MÉXICO

R. Cejudo^{1*}, A. Goguichaisvili¹, F. Bautista², G. Bayona³, J. Morales¹, F. Mendiola¹

¹Instituto de Geofísica UNAM, Morelia, México.

²Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental UNAM, Morelia, México

³Corporación Geológica Ares, Bogotá, Colombia.

*e-mail: ruben@geofisca.unam.mx

ABSTRACT

The problem of air quality is closely linked to vehicle and industrial emissions. Although mitigation measures have been taken, the problem persists because of the high concentration of private vehicles and public transport. Mitigation measures focused on replacing and updating the type of transport in large cities do not have a monitoring system to assess their impact to mitigate the emission of polluting particles. In this study, the results of a comparative survey of the magnetic and chemical properties of urban dust found in the high-speed bus transport and standard, conventional transport roads are presented in order to determine if there is an impact on the characteristics of the particulate material for the implementation of these mitigation measures. The case studies are: Mexico City and Bogotá. Samples of particulate material were taken from the roads of Mexico City and Bogotá, where the rapid transit bus system runs (Mexico City: 12 sites and 22 sites in Bogotá) and 45 of the conventional transportation system (Mexico City: 20 sites and 25 sites in Bogotá). The presence of relatively low coercivity magnetic minerals is observed in most of the roads of the fast and conventional transit bus systems. The magnetic parameters, concentration of Cr, Pb and Zn show very similar characteristics for Mexico City and Bogotá. However, the concentration of fine particles does show significant variations in the different transport systems. The differences are more noticeable in urban dust samples from the City of Bogotá.

Keywords: Mitigation measures, Monitoring, magnetic parameters, particle size.

RESUMEN

El problema de la calidad del aire está estrechamente ligado con las emisiones vehiculares e industriales, aunque se han tomado medidas de mitigación el problema persiste, debido a la alta concentración de vehículos particulares y transporte público. Las medidas de mitigación enfocadas en sustitución y actualización de tipo de transporte en las grandes ciudades no cuentan con un sistema de monitoreo que permita evaluar su impacto para mitigar la emisión de partículas contaminantes. En este trabajo, se presentan los resultados de un estudio comparativo de las propiedades magnéticas y químicas del polvo urbano encontrado en las vialidades del transporte de autobuses de tránsito rápido y del transporte estándar, con la finalidad de determinar, si existe un impacto en las características del material particulado por la implementación de estas medidas de mitigación. Los casos de estudio son: Ciudad de México y Bogotá. Se realizó un levantamiento de muestras de material particulado de las vialidades de la Ciudad de México y Bogotá, por donde circula el sistema de autobuses de tránsito rápido (Ciudad de México: 12 sitios y 22 sitios de Bogotá) y 45 de sistema de transporte convencional (Ciudad de México: 20 sitios y 25 sitios de Bogotá). Se observa la presencia de minerales magnéticos de baja coercitividad en la mayor parte de las vialidades de los sistemas de autobuses de tránsito rápido y convencional, los parámetros magnéticos junto con la concentración de Cr, Pb y Zn muestran características muy similares para la Ciudad de México y Bogotá. Sin embargo, la concentración de partículas finas sí presentan variaciones significativas en los diferentes sistemas de transporte. Las diferencias son más perceptibles en muestras de polvo urbano de la Ciudad de Bogotá.

Palabras Clave: Medidas de mitigación, Monitoreo, parámetros magnéticos, tamaño de partícula.



1. Introducción

La mala calidad del aire en las ciudades conlleva grandes riesgos para la salud humana, se estima que alrededor de 6 a 7 millones de muertes anuales en el mundo se relacionan con la contaminación del aire, lo cual se traduce en una pérdida de 54 billones de USD (ONU, 2019). En el sexto informe de Perspectivas del Medio Ambiente Mundial (GEO-6) dado a conocer por la Organización de Naciones Unidas (ONU) se estima que, para implantar medidas de mitigación a nivel mundial y mejorar la calidad del aire es necesaria una inversión de 22 billones de USD (ONU, 2019). El problema de la calidad del aire está estrechamente ligado con las emisiones vehiculares e industriales, y aunque se han tomado medidas de mitigación el problema persiste. La alta concentración del parque vehicular de automóviles particulares y transporte público minimiza las acciones de mitigación (CMM, 2015). Las emisiones vehiculares contienen material particulado con componentes orgánicos e inorgánicos, los cuales se depositan sobre la superficie del área urbana. La continua deposición de material particulado (PM) da como resultado la formación de una capa de polvo o polvo urbano (PU). Existen algunos estudios en PU depositado en vialidades que indican que: hay presencia de residuos de los gases de combustión, material particulado de las piezas vehiculares, contenido de metales pesados y materiales magnéticos (Morton *et al.*, 2009, Cejudo *et al.*, 2015). Estudios hechos con mediciones magnéticas en PU permiten determinar en algunos casos la concentración de ciertos metales pesados, por tal motivo la determinación de parámetros magnéticos de PU es considerado un método *proxy* para estimar la concentración de ciertos elementos (Cr, Cu, Cd, Ni, Pb, Zn, entre otros) en ambientes urbanos (Amato *et al.*, 2008; Qingsheng *et al.*, 2009; Cejudo *et al.*, 2015).

La Ciudad de México (CDMX) y Bogotá (BGT) han implementado el uso de un sistema de corredor de transporte público para mejorar la movilidad de su población y disminuir el uso de vehículos, en este sistema circulan autobuses de tránsito rápido (ATR) con motores de combustión a diesel de última generación, estas ciudades tienen una población (CDMX: 8 851 080 habitantes; BGT: 9 563 783 habitantes) y altitud similar (CDMX: 2250 m; BGT: 2651 m). El sistema de transporte público de ATR de CDMX (Metrobús) es una réplica del sistema de Bogotá (Transmilenio) y lo implementó el gobierno de CDMX como una medida para mitigar la mala calidad del aire y mejorar la movilidad de la población, este tipo de transporte implementado por primera vez en Europa y replicado en varias ciudades de América latina busca mitigar la emisión de partículas contaminantes. Las vialidades por donde circula este medio de transporte son adecuadas y se prohíbe el tránsito del transporte público estándar. En este trabajo, se presentan los resultados de un estudio comparativo de las propiedades magnéticas y químicas del polvo urbano encontrado en las vialidades del transporte de autobuses de tránsito rápido de cada ciudad y del transporte estándar, con la finalidad de determinar si existe un impacto en la implementación de estas medidas tomadas por los gobiernos para mitigar la emisión de partículas contaminantes para la Ciudad de México y Bogotá.

2. Metodología

Se realizó un levantamiento de 32 muestras de material particulado de las vialidades de la Ciudad de México y 45 de Bogotá, por donde circula el sistema de autobuses de tránsito rápido (Ciudad de México: 12 sitios y 22 sitios de Bogotá) y 45 muestras por donde circula el sistema de transporte convencional (Ciudad de México: 20 sitios y 25 sitios de Bogotá). La muestra de PU fue obtenida del material recolectado de un metro cuadrado y debajo de la acera, el cual se alzó con un recogedor plástico y brocha. Todas las muestras fueron colocadas dentro de una bolsa de polipropileno con cierre y georreferenciada con GPS en el sistema de coordenadas UTM. En el laboratorio, cada muestra se tamizó en malla N°10, el material obtenido se encapsuló en cubos de acrílico de 8 cm³ ideales para hacer mediciones magnéticas. La medición de susceptibilidad magnética volumétrica (κ) se obtuvo con un equipo Bartington MS3 a baja (0.46 kHz) y alta (46 kHz) frecuencia. Se calculó el valor de susceptibilidad magnética específica ($\chi_{if} = \kappa / \rho$, ρ es la densidad $\rho = \text{masa} / \text{volumen}$ en kg m⁻³) para cada muestra. Se aplicó un campo magnético de 1000 mT con un magnetizador de pulsos IM-10 marca ASC Scientific y se midió el valor de la magnetización remanente isoterma (MRI_{1,0T}) con un magnetómetro de giro JR6 marca AGICO, el valor obtenido fue normalizado



con la densidad del material para obtener el valor de magnetización remanente isotermal de saturación ($MRIS = MRI_{1.0T} / \rho$). La determinación de la concentración de elementos se hizo con un espectrómetro de fluorescencia de rayos X de energía dispersa.

Los datos fueron clasificados por el sistema de transporte de autobuses (ATR) y el sistema de transporte convencional (CONV), se hizo una prueba de Kruskal-Wallis con el software Statgraphics, con la finalidad de hacer la comparación de cada parámetro magnético, tamaño de grano y concentración de metales pesados y determinar si existe diferencia entre los sistemas de transportes.

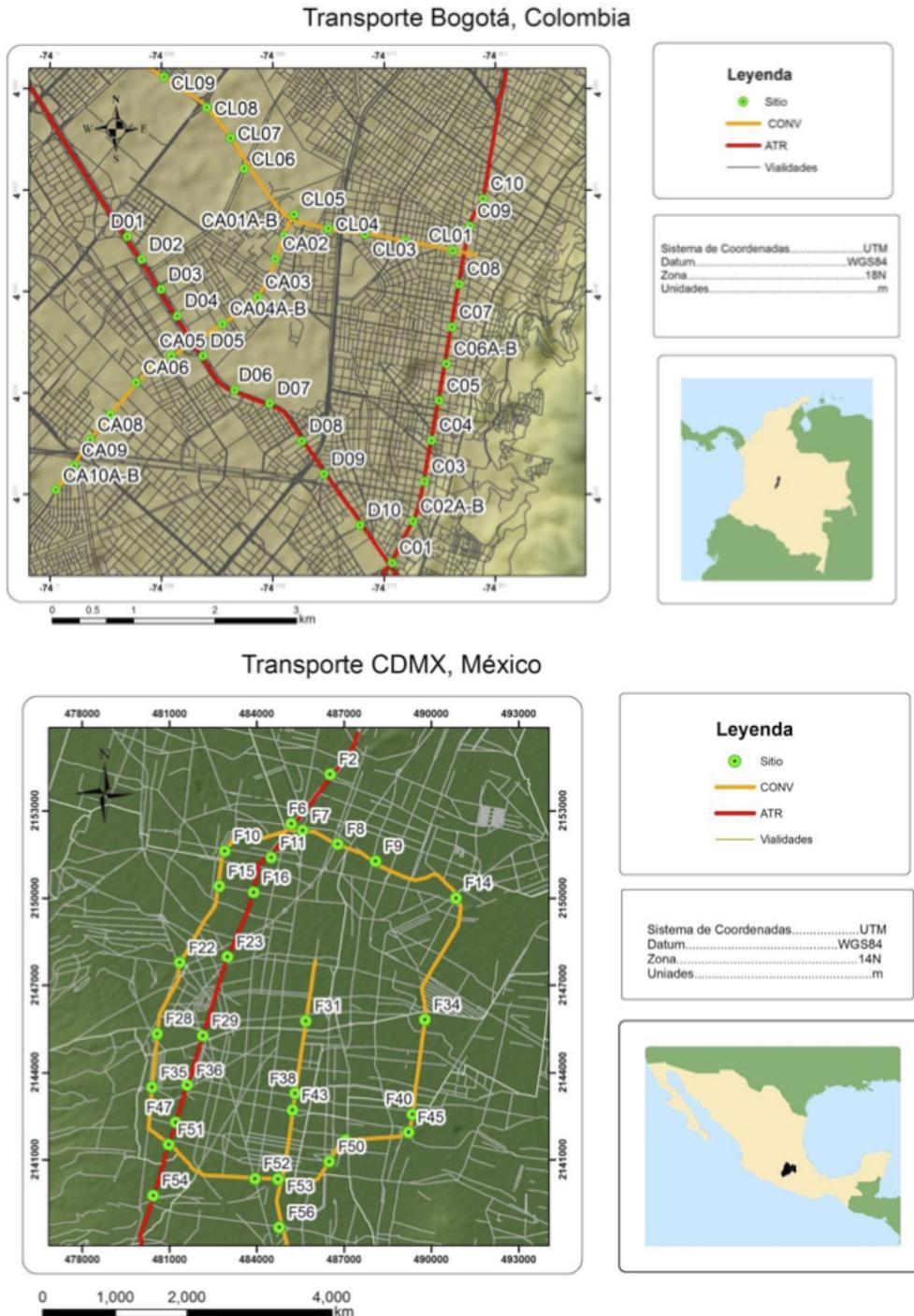


Figura 1. Sitios de muestreo en la Ciudad de Bogotá y Ciudad de México, línea de transporte convencional con motor de gasolina (CONV) y autobuses de tránsito rápido (ATR) con motor diesel.



3. Resultados

3.1 Ciudad de México, México

Resultados magnéticos

Los resultados promedio para el sistema ATR de CDMX fueron: χ_{df} de $3.9 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, MRI a 1000 mT de $49.1 \text{mAm}^2 \text{kg}^{-1}$, $\chi_{df}^{\%}$ de 2.2 % y cociente S_{-300} mayor a 0.7. Por otra parte, el valor promedio para el sistema convencional (CONV_CDMX) fue: χ_{df} de $4.2 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, MRI a 1000mT de $53.4 \text{mAm}^2 \text{kg}^{-1}$, $\chi_{df}^{\%}$ de 2.5% y cociente S_{-300} mayor a 0.7. Las muestras del sistema ATR_CDMX y CONV_CDMX presentaron valores de χ_{df} , MRI_{1000mT}, $\chi_{df}^{\%}$ similares, mientras que el cociente S_{-300} con valores cercanos a 1.0 indicando una proporción mayor de minerales magnéticos de baja coercitividad (MMBC) con respecto de los minerales magnéticos de alta coercitividad (MMAC).

Resultados de tamaño de partícula

Los resultados del tamaño de partícula de 10cm^3 fueron: Para el sistema ATR_CDMX el contenido de PM_{10} (tamaño de partícula entre 2.5 a $10 \mu\text{m}$) fue de 2.4%, de $\text{PM}_{2.5}$ (tamaño entre 1 a $2 \mu\text{m}$) de 19.7% y $\text{PM}_{1.0}$ (Tamaño menor a $1 \mu\text{m}$) fue de 10.8%. Para CONV_CDMX el contenido de contenido de PM_{10} fue de 2.2%, de $\text{PM}_{2.5}$ (tamaño entre 1 a $2 \mu\text{m}$) de 17.0% y $\text{PM}_{1.0}$ (Tamaño menor a $1 \mu\text{m}$) fue de 9.0%. La fracción más abundante de tamaño de partícula en el PU del sistema ATR_CDMX y CONV_CDMX es la fracción gruesa $>10 \mu\text{m}$, seguida de la fracción de $\text{PM}_{2.5}$.

Resultados químicos

Se encontró concentración promedio de Pb (205mg kg^{-1}), Cr (58mg kg^{-1}) y Zn (582mg kg^{-1}) en el PU del sistema ATR_CDMX y concentración promedio de Pb (239mg kg^{-1}), Cr (62mg kg^{-1}) y Zn (611mg kg^{-1}) en el PU del sistema CONV_CDMX.

3.2 Ciudad de Bogotá, Colombia

Resultados magnéticos

Los resultados promedio para el sistema ATR de Bogotá (ATR_BGTA) fueron: χ_{df} de $6.7 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, MRI a 1000 mT de $52.9 \text{mAm}^2 \text{kg}^{-1}$, $\chi_{df}^{\%}$ de 0.7 % y cociente S_{-300} mayor a 0.7. Por otra parte, el valor promedio para el sistema convencional (CONV_BGTA) fue: χ_{df} de $4.5 \mu\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$, MRI a 1000mT de $36.8 \text{mAm}^2 \text{kg}^{-1}$, $\chi_{df}^{\%}$ de 0.8% y cociente S_{-300} mayor a 0.7. Las muestras del sistema ATR_BGTA y CONV_BGTA presentaron valores de $\chi_{df}^{\%}$ similares, mientras que, los valores de χ_{df} y MRI_{1000mT} fueron superiores para ATR_BGTA. El cociente S_{-300} fue mayor a 0.7 indicando una proporción mayor de MMBC con respecto de MMAC.

Resultados de tamaño de partícula

Los resultados del tamaño de partícula de 10cm^3 fueron: Para el sistema ATR_BGTA el contenido de PM_{10} fue de 0.3%, de $\text{PM}_{2.5}$ (tamaño entre 1 a $2 \mu\text{m}$) de 3.5% y $\text{PM}_{1.0}$ (Tamaño menor a $1 \mu\text{m}$) fue de 3.5%. Para CONV_BGTA el contenido de contenido de PM_{10} fue de 0.7% de $\text{PM}_{2.5}$ (tamaño entre 1 a $2 \mu\text{m}$) de 6.2% y $\text{PM}_{1.0}$ (Tamaño menor a $1 \mu\text{m}$) fue de 7.8%. La fracción más abundante de tamaño de partícula en el PU del sistema ATR_BGTA y CONV_BGTA es la fracción gruesa $>10 \mu\text{m}$, seguida de la fracción de $\text{PM}_{2.5}$.

Resultados químicos

Se encontró concentración promedio de Pb (109mg kg^{-1}), Cr (47mg kg^{-1}) y Zn (650mg kg^{-1}) en el PU del sistema ATR_BGTA y concentración promedio de Pb (240mg kg^{-1}), Cr (68mg kg^{-1}) y Zn (411mg kg^{-1}) en el PU del sistema CONV_BGTA.

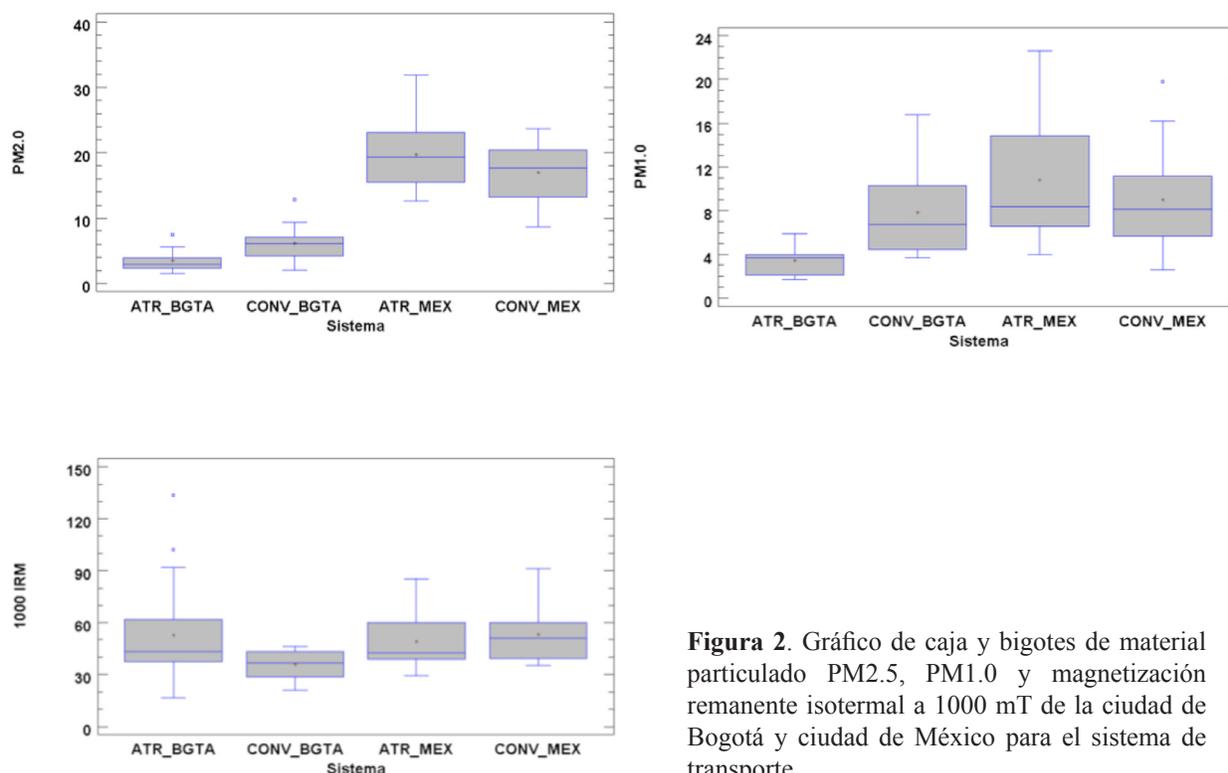


Figura 2. Gráfico de caja y bigotes de material particulado PM2.5, PM1.0 y magnetización remanente isotermal a 1000 mT de la ciudad de Bogotá y ciudad de México para el sistema de transporte.

4. Conclusión

Hay presencia de material ferrimagnético de relativamente baja coercitividad en la mayor parte de las vialidades de los sistemas de autobuses de tránsito rápido y convencional, los valores magnéticos muestran características muy similares para la Ciudad de México y Bogotá. El porcentaje de tamaño de partícula muestra diferencias importantes, en la Ciudad de México se encuentra una mayor concentración de partículas finas (PM_{10} , $PM_{2.5}$ y $PM_{1.0}$) en el polvo urbano que en la Ciudad de Bogotá. La concentración de Cr, Pb y Zn son relativamente similares entre los sistemas de transporte convencional y de autobuses rápidos. Los datos obtenidos en este estudio no muestran una diferencia significativa entre parámetros magnéticos y concentración de elementos en los diferentes sistemas de transporte. Sin embargo, la concentración de partículas finas menores a $2 \mu m$ presenta diferencias significativas en los sistemas de transporte, las cuales son más perceptibles en muestras de polvo urbano de la Ciudad de México.

Agradecimientos

A la Secretaria de Ciencias, Tecnología e Innovación de la Ciudad de México. Proyecto de investigación: Sistema de monitoreo de la contaminación por metales pesados en polvos urbanos de la CDMX (SECITI/051/2016). Al Tec. Omar López Arévalo por su ayuda en la separación y determinación del tamaño de partícula.

Referencias

Amato F, Pandolfi M, Viana M, Querol X, Alastuey A, Moreno T., 2009. Spatial and chemical patterns of PM10 in road dust deposited in urban environment. *Atmospheric Environment* 43, 1650–1659



- Cejudo R. Bautista F., Quintana P., Delgado-Carranza M., Aguilar D., Goguichaisvili A., Morales J., 2015. Correlación entre elementos potencialmente tóxicos y propiedades magnéticas en suelos de la Ciudad de México para la identificación de sitios contaminados: definición de umbrales magnéticos. *Revista mexicana de ciencias geológicas* 32, 50-61.
- CCM-Centro Mario Molina para Estudios Estratégicos sobre Energía y Medio Ambiente (CMM), 2015. Plan Integral de Calidad del Aire, Beneficios sociales por mejorar la calidad del aire en México: impactos a la salud y su valoración económica, SEMARNAT, México, 60 pp.
- Morton O., Hernandez E., Martinez E., Soler A., Lozano R., Gonzalez G., Beramendi L., Urrutia J., 2009. Mexico City topsoils: Heavy metals vs. magnetic susceptibility. *Geoderma* 151, 121-125.
- ONU-Organización de las Naciones Unidas, 2019. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (2019), Perspectivas del Medio Ambiente Mundial, GEO 6: Planeta sano, personas sanas, Nairobi, ONU, Edición 2019. Nairobi. 32 pp.
- Qingsheng L., Qingli Z., Tao Y., Ning Q., Lungsang C., 2009. Magnetic Properties of Street Dust from Chibi City, Hubei Province, China: Its Implications for Urban Environment, *Journal of Earth Science* 20, n. 5, 848-857.