

Monitoring of particulate matter on unpaved roads in the province of Chupaca/Peru during October - 2023

Julio Angeles Suazo, Doctor^{1*}; Roberto Angeles Vasquez, Maestro²; Carmencita Lavado Meza, Doctor¹; Nataly Angeles Suazo, Bachiller³; Leonel de la Cruz Cerrón, Maestro⁴; Pabel Meza Mitma, Bachiller¹

¹Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo. Tayacaja, Perú
jangelesambiental@gmail.com

²Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú, roanvas@hotmail.com,

³Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú, nati2643@hotmail.com

⁴Universidad Continental. Huancayo, Perú

Abstract– *The exponential increase in urban areas is proportional to the emission of particulate matter generated by the vehicle fleet and the design of tall buildings and the width of narrow roads that hinder the dispersion of pollutants, this problem increases when it comes to unpaved roads, higher vehicular traffic, dust rising and wear of tires and brakes that cause higher emissions of particulate matter (PM). Therefore, the intention of the present investigation was to estimate the concentration and temporal variation of fine and coarse fashion PM during October 2023 in the city of Chupaca, belonging to the department of Junín-Peru, using a PurpleAir sensor as a particle meter. The results indicate a maximum concentration of 30 ug/m³ of PM_{2.5} on October 24 and that 50% of the monitored days exceed 10 ug/m³; for the case of PM₁₀ it has a maximum concentration of 40 ug/m³. In addition, the fine mode and coarse mode have a positive correlation with humidity and a negative correlation with temperature. In conclusion, unpaved roads are a potential source of pollution, and although in this research they do not exceed national and international air quality standards, other studies indicate that the speed and type of vehicle can cause high PM emissions; therefore, it is necessary to implement prevention and control policies to avoid public health problems.*

Keywords-- *Unpaved road; Road dust; Particulate matter; Chupaca; PurpleAir.*

Digital Object Identifier:

ISSN:

ISBN:

Monitoreo de material particulado en vía no pavimentada en la provincia de Chupaca/Perú durante octubre - 2023

Julio Angeles Suazo, Doctor^{1*}; Roberto Angeles Vasquez, Maestro²; Carmencita Lavado Meza, Doctor¹; Nataly Angeles Suazo, Bachiller³; Leonel de la Cruz Cerrón, Maestro⁴; Pabel Meza Mitma, Bachiller¹

¹Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo. Tayacaja, Perú
jangelesambiental@gmail.com

²Universidad Nacional del Centro del Perú. Huancayo, Perú, roanvas@hotmail.com,

³Universidad Tecnológica del Perú. Lima, Perú, nati2643@hotmail.com

⁴Universidad Continental. Huancayo, Perú

Resumen— El aumento exponencial de las zonas urbanas es proporcional a la emisión de material particulado generado por el parque automotor y el diseño de las edificaciones altas y el ancho de las carreteras estrechas que dificultan la dispersión de los contaminantes, este problema aumenta cuando se trata de carreteras no pavimentadas, tránsito vehicular mayor, levantamiento de polvo y desgaste de neumáticos y frenos que provocan una mayor emisión de material particulado (MP). Por lo tanto, la intención de la presente investigación fue estimar la concentración y variación temporal de MP de moda fina y gruesa durante octubre del 2023 en la ciudad de Chupaca, perteneciente al departamento de Junín-Perú, utilizando un sensor PurpleAir como medidor de partículas. Los resultados indican una concentración máxima de 30 ug/m^3 de MP2.5 el 24 de octubre y que el 50% de días monitoreados superan los 10 ug/m^3 ; para el caso de MP10 tiene una concentración máxima de 40 ug/m^3 . Además, la moda fina y moda gruesa tienen una correlación positiva con la humedad y negativa con la temperatura. En conclusión, las vías no pavimentadas son una fuente potencial de contaminación, que a pesar de que en esta investigación no superan en su mayoría estándares nacionales e internacionales de calidad de aire, otros trabajos indican que la velocidad y tipo de vehículo puede provocar altas emisiones de MP; por lo tanto, es necesario implementar políticas de prevención y control para evitar problemas en la salud pública.

Palabras clave-- Camino sin pavimentar; Polvo de carretera; Material particulado; Chupaca; PurpleAir.

I. INTRODUCCIÓN

Las ciudades que históricamente han dado una alta prioridad al crecimiento han experimentado un rápido aumento de la población, el transporte y la actividad industrial, lo que ha llevado a la producción de diversos contaminantes del aire, perjudicial para la salud humana. La exposición a largo plazo a estos contaminantes como las partículas finas (MP2.5) y el carbono negro (BC), especialmente las emitidas por los gases de escape de los vehículos, se han relacionado con afecciones respiratorias, problemas de visión y una vida útil más corta [1].

Por lo tanto, existe un interés creciente en aprender cómo

la planificación urbana influye en las emisiones y la dispersión para afectar la calidad del aire [2]. La relación entre el tamaño de la ciudad, la densidad y la calidad del aire ha sido objeto de numerosos estudios, algunos de los cuales se centran en métricas específicas de la estructura urbana [3].

Los factores relacionados con el transporte, como la longitud de la carretera, la distancia a la misma, el volumen del tránsito vehicular y la densidad, pueden influir en las emisiones [4]. Los niveles de partículas (MP) tienden a ser más altos en las proximidades de carreteras con mucho tránsito, y el número de estacionamientos en una región puede aumentar la concentración de MP [5].

Además, el diseño de las áreas urbanas, incluida la altura de los edificios, el índice de cobertura y el ancho de las calles, puede afectar la calidad del aire al afectar la difusión de contaminantes [6]. Específicamente, los cañones urbanos formados por edificios de gran altura y calles estrechas dificultan la ventilación y la dispersión de contaminantes, lo que plantea riesgos para los peatones [7].

El sector del transporte por carretera es uno de los principales contribuyentes a la contaminación del aire exterior, incluidas concentraciones elevadas de ozono a nivel del suelo (O3) y partículas finas (MP2.5), principalmente a través de emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y PM2.5. Emisiones primarias, incluido el carbono negro (BC), así como el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre (SO2), los compuestos orgánicos volátiles (COV) y el carbono orgánico (OC). El transporte por carretera también emite gases de efecto invernadero (GEI), como dióxido de carbono (CO2), contaminantes climáticos de vida corta (CCVC), como carbono negro (BC), metano (CH4), por lo que afecta la salud humana, la productividad agrícola a través de la calidad del aire degradada y el clima a través de largos periodos de tiempo. y factores climáticos de corta duración [8], [9], [10].

Debido a las efectivas regulaciones sobre partículas de escape, la composición del MP10 relacionadas con el tránsito (masa de partículas con un diámetro aerodinámico $< 10 \text{ }\mu\text{m}$) hoy en día está dominada por las fuentes distintas de los neumáticos, los frenos y el desgaste de la carretera y la resuspensión del polvo de la carretera (por ejemplo, [11]). Con

una creciente electrificación y vehículos cada vez más pesados, la contribución relativa de las partículas no procedentes del escape seguirá aumentando (por ejemplo, [12]). En los países donde se utilizan neumáticos con clavos y lijado de tracción en condiciones invernales, las emisiones de partículas no procedentes del escape han sido durante mucho tiempo las principales contribuyentes a las altas concentraciones de MP10 debido al desgaste por abrasión del pavimento y la arena [13].

El polvo del desgaste por abrasión de la carretera se acumula en la superficie de la carretera y se mezcla con las partículas de desgaste de los neumáticos y los frenos, así como con el polvo de fuentes adyacentes a la carretera, pero también de fuentes de largo alcance como carreteras no delimitadas, suelos desnudos y sitios de construcción, para formar un polvo de Carretera. La carga de polvo se almacena en la macrotextura de la superficie de la carretera puede suspenderse en el aire, contribuyendo a las concentraciones de partículas, a través de la turbulencia y el viento inducidos por los vehículos.

El transporte y la acumulación de polvo en la carretera, y por lo tanto también de MP10, se ven afectados por la textura de la superficie de la carretera, las condiciones de la superficie de la carretera y las condiciones meteorológicas [14]. Las condiciones secas permiten la suspensión de partículas, mientras que, en condiciones húmedas o mojadas, el polvo tiende a acumularse en la macrotextura de la superficie de la carretera. Si hay suficiente agua disponible en la superficie de la carretera, el polvo puede transportarse hacia o desde la superficie a través de escorrentías o salpicaduras y rociadores.

Un proceso dominante de eliminación de polvo es la suspensión directa de partículas de las huellas de las ruedas por parte de los neumáticos, por qué la carga de polvo normalmente es menor en las huellas de las ruedas y mayor fuera de las huellas de las ruedas, provocando una gran variación en la carga de polvo a lo largo de una calle o carretera [15].

Las fuentes de polvo y sus procesos de transporte y acumulación, y por tanto también la propia carga de polvo, tienen una variación estacional. En Suecia, las condiciones de las carreteras con nieve y hielo son comunes en invierno y se requieren neumáticos de invierno durante la temporada invernal, lo que provoca una mayor carga de polvo debido a la alta producción de polvo y la baja suspensión. En primavera, la carga de polvo disminuye debido a la disminución de las fuentes y a una mayor resuspensión de las calles secas [16]. Por lo tanto, suele haber un pico de MP10 en primavera. Durante el verano hay una mayor proporción de emisiones directas ya que se acumula menos polvo en la carretera.

Por ejemplo, en un estudio de [16], se demostró que una clara diferencia en la carga de polvo mineral está relacionada con la macrotextura de la superficie. Además, demostraron que la carga de polvo aumentaba después de repavimentar con una macrotextura más rugosa. Sin embargo, la mayoría de los pavimentos tienen un exceso de betún en la capa superficial durante el primer año después de la pavimentación, lo que puede reducir tanto las emisiones directas de la abrasión como de la suspensión de los agregados.

Es por ello que la presente contribución propone estimar la concentración y variación temporal de material particulado de moda fina y moda gruesa en una vía no pavimentada durante octubre del 2023 utilizando el sensor PurpleAir en la ciudad de Chupaca, que pertenece departamento de Junín-Perú.

II. MATERIALES Y METODOS

Los materiales y métodos se presentan en tres subsecciones: en una se describe donde se hicieron las mediciones, en otra sección se describe el sensor que se utilizó y la última sección describe los métodos utilizados para la estimación del índice de calidad de aire.

A. Sitio y localización

La provincia de Chupaca está localizada al sur-este de la provincial de Huancayo, en el departamento de Junín, Perú. S encuentra a 12° 04' 00" S y 75° 16' 59" W, a una altitud de 3286 m.s.n.m.

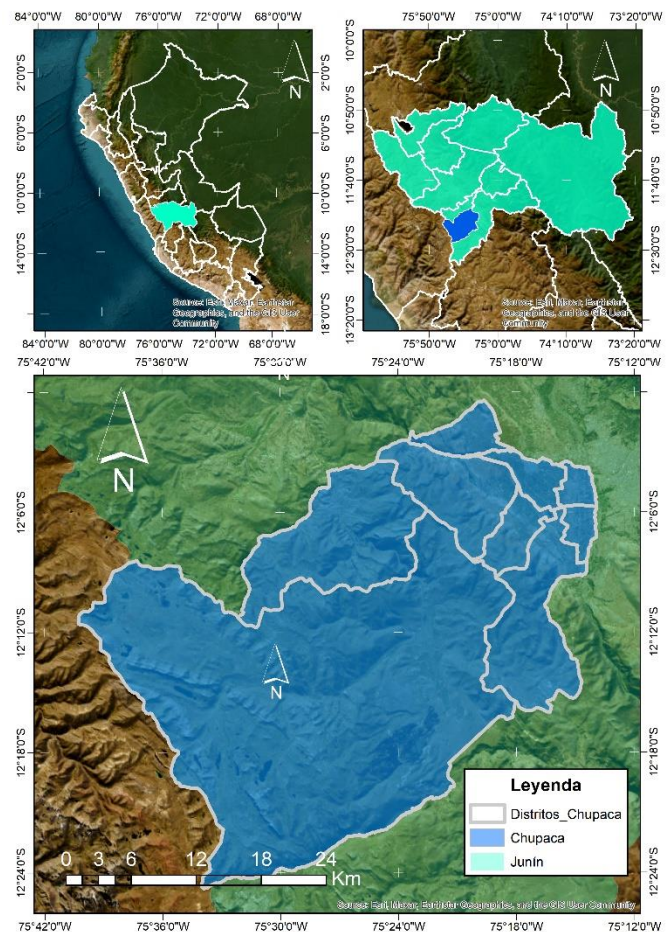


Fig. 1. Mapa de ubicación de la zona estudiada

B. Sensor de Material particulado de bajo costo Purple Air PA-II

El sensor PurpleAir (PA-II) es un contador óptico de partículas en el aire de concentraciones máxicas de PM1.0, PM2.5 y PM10 en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de bajo costo, incorporan un par de sensores de contador de partículas ópticas (OPC) láser PMS5003 (Plantower Ltd., Beijing, China), junto con un sensor de temperatura, humedad relativa y sensor de presión barométrica (BME 280, Bosch Sensortec GmbH, Reutlingen, Alemania), ambos conectados a un microcontrolador equipado con un módulo de comunicación de red inalámbrica. El dispositivo registra y transmite datos a través de Wi-Fi a una plataforma basada en la nube [17], [18]. Además, se exploró la efectividad del monitor Purple Air PA-II como componente de una red de monitoreo implementados a gran escala calibrados donde puede conducir a soluciones integradas para un monitoreo y predicción espacio-temporal efectivos y de alta resolución centrados en mediciones terrestres [19]. Asimismo el monitoreo se realizó a una resolución temporal de 1 minuto.



Fig. 2. Instalación del contador óptico de partículas de bajo costo, sensor Purpleair

III. RESULTADOS Y DISCUSION

En la fig. 3 se muestra la variación temporal de MP2.5 durante octubre de 2023. Donde se observa que el valor máximo se presenta el 24 de octubre con un valor mayor a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Cabe señalar que durante el 50% de días monitoreados sobrepasa los valores de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$; no obstante, los picos de altas concentraciones se deben al parque automotor que levanta polvo o material particulado en una vía no pavimentada, ya que [20] resalta que los vehículos pulverizan el material de la superficie y las corrientes de aire provocan su levantamiento y exposición; asimismo, como lo menciona [21], este factor no solo provoca más polvo, sino también dependiendo del vehículo, pueden generar mayores concentraciones de moda gruesa y fina.

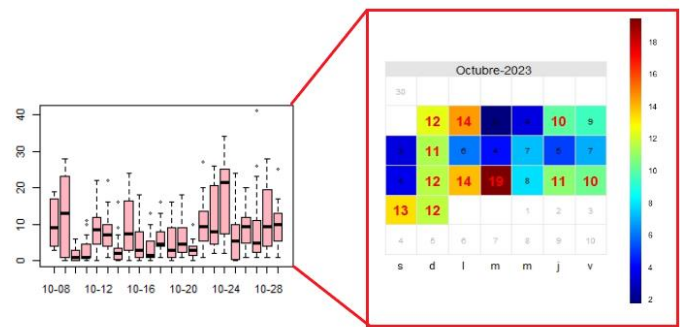


Fig. 3 Concentración de MP2.5 durante octubre en la provincia de Chupaca-2023.

Además, como lo indica [22], puede influir en gran medida en la contaminación atmosférica, sobre todo las carreteras no asfaltadas, ya que el polvo generado puede captar otros metales gaseosos presentes en el aire y causar daños en la atmosfera y salud humana, por ejemplo en el trabajo de [23] confirmó la presencia de Cr, Ni, Cu, Zn, Pb, Sn, Sb y Ba en desechos resuspendidos de vías no pavimentadas, comprendidas con un 36% de MP2.5 y 53% MP10. Por otro lado, [24] resalta que en épocas secas las vías no pavimentadas pueden provocar concentraciones de MP2.5 muy desfavorables e insalubres para grupos sensibles.

En la fig. 6 se muestra la variación temporal de MP10 se observa que el valor máximo se presenta el 24 de octubre con un valor de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, como lo menciona [25], MP10 puede comprender una parte importante de la composición de las partículas emitidas en vías no pavimentadas, siendo un posible peligro para entornos locales cercanos a la carretera. Al mismo tiempo, en necesario indicar que la velocidad del vehículo puede provocar concentraciones más elevadas, tal como lo demuestra [26], al encontrar una dependencia exponencial entre la emisión de PM10 y la velocidad vehicular. Asimismo, señalar que se presentan mayor distribución de tamaño de partículas de moda gruesa respecto a moda fina, que al igual que MP2.5, las concentraciones de MP10 en vías no pavimentadas puede generar condiciones insalubres para grupos sensibles, como menciona [24].

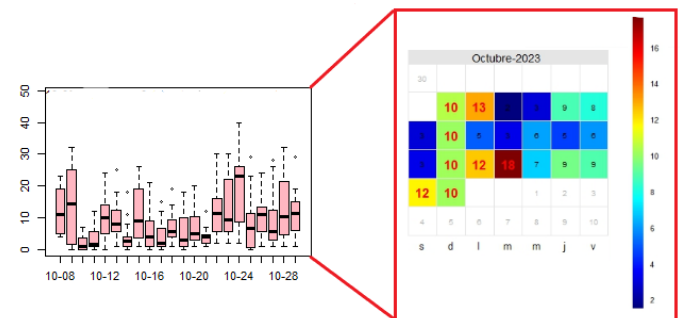


Fig. 4 Concentración de MP10 durante octubre en la provincia de Chupaca-2023

Para el caso de la Fig. 3. y Fig. 4 muestran días concentraciones considerables, siendo el pico más alto $19 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2.5 y $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP10, en la que solo la moda fina supera las directrices de la OMS ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2.5 y MP10, respectivamente), pero cabe resaltar que es en forma anual en un periodo de 24 h, pese a ello funciona como un indicador de calidad de aire. Sin embargo, para normas nacionales como es el caso del Perú, los periodos de evaluación de la presente investigación no superan los estándares de calidad ambiental para aire ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2.5 y MP10, respectivamente) como media aritmética anual. Esto puede ser provocado por el recuento de vehículos, ya que tiene una alta correlación con las concentraciones de MP, tal cual concluyó [27]. Además, tal como descubrió [28], la velocidad del vehículo tiene un efecto significativo en las concentraciones máximas y promedio de PM, así como la masa total recolectada.

Por otro lado, en la Fig. 5 se muestra la correlación de material particulado de moda fina y gruesa versus temperatura y humedad, teniendo una relación positiva con la humedad y aumentando su formación, así como lo indican [29], [30]. Por lo tanto, es temporadas húmedas las concentraciones de MP en vías no pavimentadas disminuirá, y en épocas secas aumentará. Por otro lado, es inversa con la temperatura, al igual que los trabajos de [31], [32], indicando que es un factor responsable en la dispersión y transformación de partículas, en conjunto con la velocidad del viento y estabilidad atmosférica.

Es así que las concentraciones de PM2.5 y PM10 a una escala diaria, puede ser afectada por emisiones fuertes o condiciones climáticas [33], y de esta manera tener una gran variabilidad espacio-temporal, tal lo indican [34], [35], [36]. Sin embargo, [37] descubrió que las concentraciones de contaminantes a sotavento describen una curva única cuando es graficado de términos numéricos, y son independientes a la velocidad del viento, la naturaleza del contaminante y la tasa de emisión.

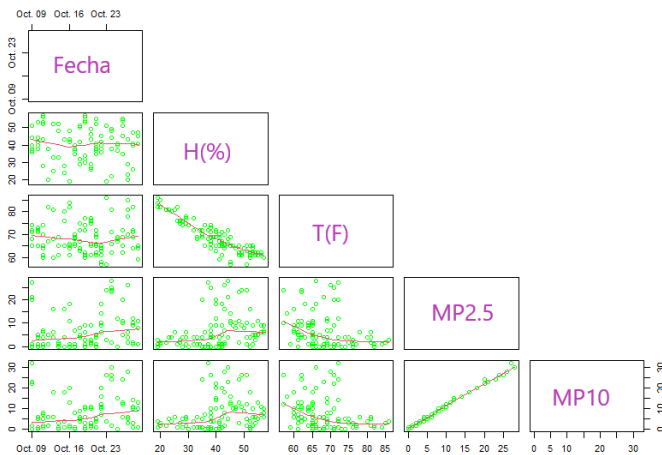


Fig. 5 Matriz de correlación de Pearson entre material particulado versus humedad y temperatura del aire

De esta manera, aunque las emisiones de MP2.5 y MP10 no superan los estándares nacionales e internacionales en la mayor parte del periodo evaluado, representan una fuente potencial de polvo que puede afectar la calidad de aire local, así como concluyó [38] en su trabajo.

IV. CONCLUSIONES

De acuerdo con el análisis y las pruebas presentadas en este documento, se concluyó que las concentraciones máximas de MP2.5 y MP10 fueron $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ durante el 24 de octubre del 2023, respectivamente. Además, más del 50% de los días monitoreados superaron los $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$; pese a ello, no superaron normas internacionales ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2.5 y MP10, respectivamente) o nacionales ($25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para MP2.5 y MP10, respectivamente), salvo el valor máximo de MP2.5.

Por otro lado, la emisión de material particulado tiene una correlación de Pearson positivo con la humedad y negativo con la temperatura, de esta manera en épocas húmedas las concentraciones de MP disminuirán debido a la sedimentación de partículas causadas por la precipitación, mejorando la calidad de aire local. Caso contrario ocurre en épocas secas, donde las concentraciones de MP aumenta y queda suspendida en el aire o es influenciada por la calidad del aire, afectando la calidad de aire local.

Por lo tanto, es necesario emitir políticas de prevención y control de contaminación atmosférica en vías no pavimentadas a nivel local y nacional y reducir los efectos de MP sobre la salud pública.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Centro del Perú

REFERENCIAS

- [1] V. Belleudi *et al.*, "Impact of fine and ultrafine particles on emergency hospital admissions for cardiac and respiratory diseases," *Epidemiology*, vol. 21, no. 3, 2010, doi: 10.1097/EDE.0b013e3181d5c021.
- [2] J. M. Cariolet, M. Colombert, M. Vuillet, and Y. Diab, "Assessing the resilience of urban areas to traffic-related air pollution: Application in Greater Paris," *Science of the Total Environment*, vol. 615, 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2017.09.334.
- [3] J. D. Marshall, T. E. McKone, E. Deakin, and W. W. Nazaroff, "Inhalation of motor vehicle emissions: Effects of urban population and land area," *Atmos Environ*, vol. 39, no. 2, 2005, doi: 10.1016/j.atmosenv.2004.09.059.
- [4] R. Baldauf *et al.*, "Traffic and meteorological impacts on near-road air quality: Summary of methods and trends from the Raleigh near-road study," *J Air Waste Manage Assoc*, vol. 58, no. 7, 2008, doi: 10.3155/1047-3289.58.7.865.
- [5] P. H. Fischer *et al.*, "Traffic-related differences in outdoor and indoor concentrations of particles and volatile organic compounds in Amsterdam," *Atmos Environ*, vol. 34, no. 22, 2000, doi: 10.1016/S1352-2310(00)00067-4.
- [6] G. Miskell, J. Salmond, I. Longley, and K. N. Dirks, "A Novel Approach in Quantifying the Effect of Urban Design Features on Local-Scale Air Pollution in Central Urban Areas," *Environ Sci Technol*, vol. 49, no. 15, 2015, doi: 10.1021/acs.est.5b00476.

- [7] C. Huang *et al.*, "Effect of urban morphology on air pollution distribution in high-density urban blocks based on mobile monitoring and machine learning," *Build Environ*, vol. 219, 2022, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109173.
- [8] R. Van Dingenen, F. J. Dentener, F. Raes, M. C. Krol, L. Emberson, and J. Cofala, "The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation," *Atmos Environ*, vol. 43, no. 3, 2009, doi: 10.1016/j.atmosenv.2008.10.033.
- [9] A. Stohl *et al.*, "Evaluating the climate and air quality impacts of short-lived pollutants," *Atmos Chem Phys*, vol. 15, no. 18, 2015, doi: 10.5194/acp-15-10529-2015.
- [10] H. W. Vallack, O. O. Olawoyin, W. K. Hicks, J. C. I. Kylenstierna, and L. D. Emberson, "The Global Atmospheric Pollution Forum (GAPF) emission inventory preparation tool and its application to Côte d'Ivoire," *Atmos Pollut Res*, vol. 11, no. 9, 2020, doi: 10.1016/j.apr.2020.05.023.
- [11] J. C. Fussell *et al.*, "A Review of Road Traffic-Derived Non-Exhaust Particles: Emissions, Physicochemical Characteristics, Health Risks, and Mitigation Measures," *Environ Sci Technol*, vol. 56, no. 11, 2022, doi: 10.1021/acs.est.2c01072.
- [12] D. C. S. Beddows and R. M. Harrison, "PM10 and PM2.5 emission factors for non-exhaust particles from road vehicles: Dependence upon vehicle mass and implications for battery electric vehicles," *Atmos Environ*, vol. 244, 2021, doi: 10.1016/j.atmosenv.2020.117886.
- [13] K. Kupiainen, R. Ritola, A. Stojiljkovic, L. Pirjola, A. Malinen, and J. Niemi, "Contribution of mineral dust sources to street side ambient and suspension PM10 samples," *Atmos Environ*, vol. 147, 2016, doi: 10.1016/j.atmosenv.2016.09.059.
- [14] B. R. Denby *et al.*, "A coupled road dust and surface moisture model to predict non-exhaust road traffic induced particle emissions (NORTRIP). Part 1: Road dust loading and suspension modelling," *Atmos Environ*, vol. 77, 2013, doi: 10.1016/j.atmosenv.2013.04.069.
- [15] J. Lundberg, M. Gustafsson, S. Janhäll, O. Eriksson, G. Blomqvist, and S. Erlingsson, "Temporal Variation of Road Dust Load and Its Size Distribution—a Comparative Study of a Porous and a Dense Pavement," *Water Air Soil Pollut*, vol. 231, no. 12, 2020, doi: 10.1007/s11270-020-04923-1.
- [16] M. Gustafsson *et al.*, "Road dust load dynamics and influencing factors for six winter seasons in Stockholm, Sweden," *Atmos Environ X*, vol. 2, 2019, doi: 10.1016/j.aeoa.2019.100014.
- [17] K. Ardon-Dryer, Y. Dryer, J. N. Williams, and N. Moghimi, "Measurements of PM2.5 with PurpleAir under atmospheric conditions," *Atmos Meas Tech*, 2020, doi: 10.5194/amt-13-5441-2020.
- [18] T. Sayahi *et al.*, "Development of a calibration chamber to evaluate the performance of low-cost particulate matter sensors," *Environmental Pollution*, 2019, doi: 10.1016/j.envpol.2019.113131.
- [19] J. Bi, A. Wildani, H. H. Chang, and Y. Liu, "Incorporating Low-Cost Sensor Measurements into High-Resolution PM2.5 Modeling at a Large Spatial Scale," *Environ Sci Technol*, vol. 54, no. 4, 2020, doi: 10.1021/acs.est.9b06046.
- [20] D. S. Williams, M. K. Shukla, and J. Ross, "Particulate matter emission by a vehicle running on unpaved road," *Atmos Environ*, vol. 42, no. 16, pp. 3899–3905, May 2008, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2008.02.003.
- [21] N. Y. Cédric, M. A. Cyrille, M. S. Charitos, and M. David, "Using a Gaussian model to estimate the level of particle matter concentration on paved and unpaved roads in urban environment: A case study," *Journal of Air Pollution and Health*, vol. 8, no. 2, pp. 183–204, Jun. 2023, doi: 10.18502/JAPH.V8I2.12917.
- [22] X. Li, N. Wang, X. Qu, and B. Jiang, "Spatial Distribution Characteristics of Fugitive Road Dust Emissions from a Transportation Hub City (Jinan) in China and Their Impact on the Atmosphere in 2020," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 11, Jun. 2024, doi: 10.3390/su16114771.
- [23] A. Kumar and S. P. Elumalai, "Influence of Road Paving on Particulate Matter Emission and Fingerprinting of Elements of Road Dust," *Arch Environ Contam Toxicol*, vol. 75, no. 3, pp. 424–435, Oct. 2018, doi: 10.1007/S00244-018-0546-6/TABLES/5.
- [24] I. K. Yankson *et al.*, "Assessment of particulate matter concentrations and air quality index during road construction-related activities in Ghana," *Discover Environment 2024 2:1*, vol. 2, no. 1, pp. 1–10, Dec. 2024, doi: 10.1007/S44274-024-00172-9.
- [25] G. Zhao, Y. Chen, P. K. Hopke, T. M. Holsen, and S. Dhaniyala, "Characteristics of traffic-induced fugitive dust from unpaved roads," *Aerosol Science and Technology*, vol. 51, no. 11, pp. 1324–1331, Nov. 2017, doi: 10.1080/02786826.2017.1347251.
- [26] I. G. Kavouras, D. W. DuBois, G. Nikolich, A. Y. Corral Avittia, and V. Etyemezian, "Particulate dust emission factors from unpaved roads in the U.S.–Mexico border semi-arid region," *J Arid Environ*, vol. 124, pp. 189–192, Jan. 2016, doi: 10.1016/J.JARIDENV.2015.07.015.
- [27] S. Datta, S. Rahman, M. S. Borhan, B. Saini-Eidukat, L. Cihacek, and K. Ringwall, "Quantification and characterization of particulate matter generated from unpaved roads in the oil development area of western North Dakota," *Trans ASABE*, vol. 62, no. 3, pp. 615–625, Jan. 2019, doi: 10.13031/trans.13169.
- [28] J. Kacer, R. Altmaier, D. M. Cwiertny, and P. T. O'Shaughnessy, "Unpaved road particulate matter emission rates and vehicle-induced transient plume characteristics," *Environmental Science: Atmospheres*, vol. 4, no. 9, pp. 1042–1050, Sep. 2024, doi: 10.1039/D4EA00055B.
- [29] M. Zhang *et al.*, "Characters of Particulate Matter and Their Relationship with Meteorological Factors during Winter Nanyang 2021–2022," *Atmosphere 2023, Vol. 14, Page 137*, vol. 14, no. 1, p. 137, Jan. 2023, doi: 10.3390/ATMOS14010137.
- [30] J. Tao *et al.*, "Control of PM2.5 in Guangzhou during the 16th Asian Games period: Implication for hazy weather prevention," *Science of The Total Environment*, vol. 508, pp. 57–66, Mar. 2015, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2014.11.074.
- [31] Z. Bodor, K. Bodor, Á. Keresztesi, and R. Szép, "Major air pollutants seasonal variation analysis and long-range transport of PM10 in an urban environment with specific climate condition in Transylvania (Romania)," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 27, no. 30, 2020, doi: 10.1007/s11356-020-09838-2.
- [32] Z. Ferenczi *et al.*, "Long-term characterization of urban pm10 in Hungary," *Aerosol Air Qual Res*, vol. 21, no. 10, 2021, doi: 10.4209/AAQR.210048.
- [33] Z. Wen *et al.*, "Combined short-term and long-term emission controls improve air quality sustainably in China," *Nat Commun*, vol. 15, no. 1, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41467-024-49539-9.
- [34] S. E. Chambliss *et al.*, "Comparison of Mobile and Fixed-Site Black Carbon Measurements for High-Resolution Urban Pollution Mapping," *Environ Sci Technol*, vol. 54, no. 13, pp. 7848–7857, Jul. 2020, doi: 10.1021/ACS.EST.0C01409/SUPPL_FILE/ES0C01409_SI_001.PDF.
- [35] H. Wu, S. Reis, C. Lin, I. J. Beverland, and M. R. Heal, "Identifying drivers for the intra-urban spatial variability of airborne particulate matter components and their interrelationships," *Atmos Environ*, vol. 112, pp. 306–316, Jul. 2015, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2015.04.059.
- [36] S. Kaur, M. J. Nieuwenhuijsen, and R. N. Colville, "Fine particulate matter and carbon monoxide exposure concentrations in urban street transport microenvironments," *Atmos Environ*, vol. 41, no. 23, pp. 4781–4810, Jul. 2007, doi: 10.1016/J.ATMOSENV.2007.02.002.
- [37] J. I. Huertas Cardozo and D. F. Prato Sánchez, "An experimental and numerical study of air pollution near unpaved roads," *Air Qual Atmos Health*, vol. 12, no. 4, pp. 471–489, Apr. 2019, doi: 10.1007/S11869-019-00678-9/FIGURES/9.
- [38] E. Diaz-Nigenda, J. Tatarko, H. Morales-Iglesias, Z. H. Méndez, W. V. Morales, and M. A. Alatorre-Ibargüengoitia, "Measurement and modeling air quality impacts of dust emissions from unpaved roads in Tuxtla Gutierrez, Chiapas," *Geosciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 8, p. 284, Aug. 2018, doi: 10.3390/geosciences8080284.