

## **Evaluación de la Contaminación del Aire por Material Particulado $PM_{2.5}$ en la ciudad del Cusco Respecto de los Índices de Calidad del Aire entre 2017 y 2018**

## **Assessment of Atmospheric Pollution by Particulate Matter $PM_{2.5}$ in the city of Cusco respect to the Air Quality Indices between the years 2017 and 2018**

Recibido: 06 de Mayo de 2023 | Aceptado: 16 de Julio de 2023

Bruce Stephen Warthon Olarte<sup>1</sup>, Ivan Cesar Miranda Hankgo<sup>2</sup>, Iván Ruben Quispe Ccolque<sup>3</sup>, Rafael Eduardo Ponce Amanca<sup>4</sup>, Victor Fernando Ramos Salcedo<sup>5</sup>, Ariatna Isabel Zamalloa Ponce de Leon<sup>6</sup>, Ruben Alfredo Tupayachi Latorre<sup>7</sup> & Julio Lucas Warthon Ascarza<sup>8</sup>.

<sup>1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8</sup> *Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú.*

*ORCID: 0000-0002-0985-1579*

*Correo electrónico: 160531@unsaac.edu.pe*

### **Resumen**

En este artículo científico, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de la contaminación del aire por material particulado  $PM_{2.5}$  en diferentes áreas de monitoreo de la ciudad del Cusco durante los años 2017 y 2018. El objetivo central de la investigación fue analizar concentración de  $PM_{2.5}$  en varios puntos de la ciudad, utilizando un enfoque de muestreo predeterminado. Se recolectaron múltiples mediciones en cada punto, realizadas en intervalos de 24 horas, y obteniendo los valores de concentración mediante gravimetría y posteriormente se calculó el promedio de estas mediciones. Este proceso de recolección y análisis de datos siguió las pautas normativas establecidas por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA). Los resultados obtenidos revelaron un panorama preocupante de la contaminación del aire en la ciudad del Cusco. Más del 84% de los sitios monitoreados presentaron una calificación mala en los Índices de Calidad Ambiental (INCA) establecidos por el Ministerio del Ambiente del Gobierno Peruano. Estos hallazgos indican que la población de Cusco está expuesta a niveles perjudiciales de  $PM_{2.5}$ . Un punto destacado de la investigación es el distrito de San Jerónimo en Cusco, donde se registró una concentración promedio de 125  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  de  $PM_{2.5}$ . Esto coloca esta área en el umbral de cuidado, representado por el color rojo en los INCA. Estos niveles elevados de  $PM_{2.5}$  en San Jerónimo se correlacionan con el riesgo de desarrollar enfermedades pulmonares crónicas y cardiovasculares, concluyendo que según los INCA el aire de la ciudad del Cusco es mala.

*Palabras clave: Contaminación del aire, material particulado  $PM_{2.5}$ , Índice de la Calidad Ambiental.*

## Abstract

In this scientific article, a comprehensive assessment of  $PM_{2.5}$  particulate matter air pollution was carried out in different monitoring areas of the city of Cusco during 2017 and 2018. The central objective of the research was to analyze  $PM_{2.5}$  concentration at various points in the city, using a predetermined sampling approach. Multiple measurements were collected at each point, performed at 24-hour intervals, and obtaining the concentration values by gravimetry and subsequently calculating the average of these measurements. This data collection and analysis process followed the regulatory guidelines established by the U.S. Environmental Protection Agency (EPA). The results obtained revealed a worrisome picture of air pollution in the city of Cusco. More than 84% of the monitored sites presented a poor score in the Environmental Quality Indexes (INCA) established by the Peruvian Government's Ministry of Environment. These findings indicate that the population of Cusco is exposed to harmful levels of  $PM_{2.5}$ . A highlight of the investigation is the district of San Jeronimo in Cusco, where an average concentration of  $125 \mu\text{g}/\text{m}^3$  of  $PM_{2.5}$  was recorded. This places this area at the threshold of care, represented by the red color on the INCAs. These elevated  $PM_{2.5}$  levels in San Jeronimo correlate with the risk of developing chronic pulmonary and cardiovascular diseases, concluding that according to the INCAs the air in the city of Cusco is bad.

*Keywords: Air pollution, particulate matter  $PM_{2.5}$ , Environmental Quality Indexes.*

## Introducción

La contaminación del aire es una principal preocupación ambiental y una problemática que afecta la salud pública en todo el mundo. En particular, las partículas suspendidas en el aire, conocidas como material particulado (PM), consideradas uno de los contaminantes más prevalentes en la atmósfera. Entre estas partículas, las que poseen un diámetro menor a 2.5 micras, denominada material particulado 2.5 ( $PM_{2.5}$ ), han cobrado una atención especial debido a su tamaño diminuto que les permite penetrar profundamente en los pulmones, dando lugar a diversas enfermedades respiratorias y cardiovasculares (Organización Mundial de la Salud, 2021).

La concentración de  $PM_{2.5}$  en la atmósfera ha sido objeto de estudio en diferentes partes del mundo en los últimos años, con el fin de comprender la magnitud de este problema y sus implicancias para la salud pública y el medio ambiente. En este contexto, la ciudad del Cusco, un enclave histórico y cultural, no es una excepción. En efecto, la ciudad ha experimentado un deterioro notable en la calidad del aire, según información obtenida del Informe del Estado del Ambiente 2012-2013 realizado por el DIGESA y el MINSA, manifiesta que las concentraciones de  $PM_{2.5}$  exceden los Estándares de Calidad del Aire en al menos un día de los tres evaluados (MINAM, 2015), poniendo en riesgo la salud de sus habitantes. Esta situación es especialmente alarmante en un lugar que no solo alberga una población local, sino que también atrae un flujo constante de turistas.

La exposición prolongada a niveles elevados de  $PM_{2.5}$  ha sido asociada con un aumento en enfermedades respiratorias crónicas, enfermedades cardiovasculares y otros problemas de salud, según diversos estudios epidemiológicos (Pope et al., 2015). Es esencial comprender que la contaminación del aire por  $PM_{2.5}$  no es un fenómeno aislado; tiene raíces en actividades humanas como las emisiones de vehículos, la quema de combustibles fósiles y la actividad industrial (Dockery & Pope, 1994).

La gravedad de la situación se refleja en las estadísticas de mortalidad global. En 2016, se estima que la exposición a niveles elevados de  $PM_{2.5}$  fue responsable de más de cuatro millones de muertes prematuras, representando alrededor del 8% de todas las muertes en todo el mundo (Cohen et al., 2017). A lo largo de las décadas, numerosos estudios han evaluado los niveles de  $PM_{2.5}$  en diferentes regiones geográficas, en un esfuerzo por comprender sus efectos en la salud humana (Brunekreef & Holgate, 2002; Pope & Dockery, 2006).

Los altos niveles de concentración de  $PM_{2.5}$  en áreas urbanas han sido vinculados a fuentes antropogénicas como la quema de combustibles fósiles, la actividad industrial, la generación de polvo por construcción y la combustión de biomasa para calefacción y cocina (Zhang et al., 2017). Es importante destacar que las condiciones meteorológicas también influyen en la concentración de  $PM_{2.5}$  en el aire, donde las diferentes condiciones climáticas pueden dar lugar a la acumulación de contaminantes en áreas específicas, elevando los niveles de  $PM_{2.5}$  (Wang et al., 2013).

Las características geográficas y climáticas del Cusco, como su ubicación entre los 3,244 y 3,700 metros sobre el nivel del mar, en la Cordillera de los Andes y su clima seco y soleado, pueden influir en la concentración de  $PM_{2.5}$ . La topografía y la vegetación también desempeñan un papel en la dispersión de estas partículas en el aire (Zhang et al., 2010). Otro factor de alta emisión es la fabricación artesanal de ladrillos, según señala PRAL (2006); justamente el material particulado  $PM_{2.5}$  ha sido objeto de medición por parte de OEFA (2019), revelando que los niveles en tres puntos monitoreados han superado los Estándares de Calidad Ambiental establecidos por el MINAM (2017), que se encuentran vinculados al proceso productivo de productores de ladrillos.

La evaluación precisa de la concentración de  $PM_{2.5}$  no solo es fundamental para la gestión de la calidad del aire, sino también para identificar áreas críticas que requieren medidas de control y mitigación (Mallongi et al., 2023). En este sentido, se ha llevado a cabo una investigación de la concentración de  $PM_{2.5}$  en diversos puntos en la ciudad del Cusco, utilizando datos recolectados a través de una red de monitoreo automatizada conocida como sistema de monitoreo "SHELTER" del Centro de Investigación de Energía y Atmósfera - UNSAAC en la ciudad del Cusco que involucra el monitoreo de  $PM_{2.5}$ , equipado con analizadores automáticos de gases de efecto invernadero y muestreadores de PM de alto volumen HIVOL 3000, certificado por la agencia de protección ambiental US-EPA (1998), durante el período de 2017 a 2018 (Warthon, 2017).

La evaluación de la contaminación atmosférica en la ciudad del Cusco se basa en los Índices de Calidad Ambiental para Aire (INCA), que proporcionan una evaluación integral de la calidad del aire en función de varios contaminantes, como  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $NO_2$ ,  $O_3$  y  $SO_2$ . El INCA se divide en cuatro intervalos numéricos adimensionales

relacionados con Estándares de Calidad Ambiental de Aire (MINAN, 2016). La evaluación de la concentración de  $PM_{2.5}$  en la ciudad tiene una relevancia directa para la salud pública, el entorno ambiental y el patrimonio natural y cultural. Estos datos son esenciales para la planificación urbana y la toma de decisiones informadas (US EPA, 2016).

En términos metodológicos, se aplicó una evaluación espacial para determinar el promedio de las concentraciones de material particulado, y se utilizó la herramienta Power BI para la visualización gráfica de los datos de concentración de  $PM_{2.5}$ . Además, se emplearon mapas satelitales que proporcionan información crucial para la toma de decisiones en la planificación del transporte, la gestión de la calidad del aire y la protección de la salud pública. La evaluación de la contaminación atmosférica tiene un impacto directo en la salud pública, como resalta Cohen et al. (2017). Para llevar a cabo esta evaluación espacial, se emplearon técnicas de georreferenciación y análisis espacial mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten identificar las áreas de mayor riesgo de contaminación y analizar patrones espaciales y tendencias en la distribución de la contaminación en diversas regiones geográficas (Jerrett et al., 2013; Yang et al., 2022).

El objetivo central de este estudio es llevar a cabo una evaluación detallada de la contaminación del aire por  $PM_{2.5}$  en la ciudad del Cusco durante los años 2017 y 2018 en diferentes puntos de la ciudad del Cusco, donde se realizaron más de tres mediciones repetidas por el lapso de 24 horas de medición cada una y que posteriormente se calcularon promedios, siguiendo las pautas normativas de EPA (1998).

## **Material y Métodos**

### ***Equipamiento y Material para Muestreo***

Se empleó la cabina Shelter para el monitoreo ambiental, como se ilustra en la Figura 1, la cual fue diseñada y construida en el Cusco. Esta cabina contiene analizadores de gases de efecto invernadero (GEI) y un muestreador de material particulado con certificación EPA. Dentro de este entorno de monitoreo, se encuentra el muestreador de material particulado de alto volumen, visualizado en la Figura 2. Este instrumento posibilitó el muestreo del material particulado  $PM_{2.5}$  en diferentes puntos de monitoreo de la Ciudad del Cusco.

Para la captura del material particulado  $PM_{2.5}$  en suspensión en el ambiente, se recurrió al uso de filtros de cuarzo (Bhardwaj & Raman, 2022), los cuales son recomendados a nivel mundial por su alta porosidad. En sintonía con estas recomendaciones, este estudio se adhirió rigurosamente a tales directrices al utilizar filtros de membrana de cuarzo. Estos filtros permiten la recolección continua del  $PM_{2.5}$  durante un período de 24 horas consecutivas (Omega Perú S. A., 2019).

**Figura 1**

*Cabina Shelter para monitoreo ambiental (UNSAAC)*



*Fuente:* Elaboración propia, 2017.

**Figura 2**

*Muestreador de material particulado de alto volumen (HIVOL 3000)*



*Fuente:* Libro Energía limpia y cero emisión, 2017.

**Figura 3**

*Filtro de cuarzo sobre el equipo muestreador de material particulado HIVOL 3000 en la ciudad de Cusco*



*Fuente:* Elaboración propia, 2017.

***Método de Muestreo***

El método de muestreo fue planificado de antemano y se llevó a cabo utilizando el enfoque gravimétrico (Lewis et al., 2023; Kelly et al., 2017), un método analítico cuantitativo ampliamente reconocido. En este proceso, se realizaron mediciones tanto del filtro solo como del filtro junto con el material contaminante, lo que permitió la determinación precisa de las masas involucradas.

Inicialmente, se midió la masa del filtro por sí solo, representando el valor inicial. Luego, se midió la masa del filtro que contenía el material contaminante, dando lugar al valor final. Esta secuencia de mediciones proporcionó la información necesaria para calcular con precisión la concentración de material contaminante presente.

***Procedimiento para Recolección de Muestra***

El procedimiento para la recolección de muestras siguió el protocolo definido por el MINAM (2017):

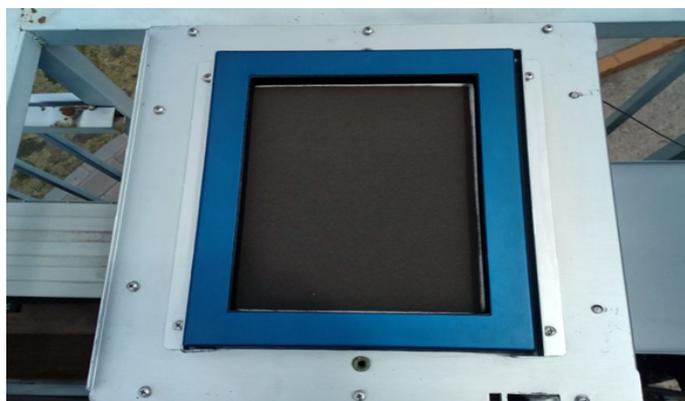
1. Los sitios de muestreo no se seleccionaron al azar (Liu et al., 2023); se eligieron basándose en criterios específicos, incluida la proximidad a vías de tránsito vehicular y fábricas de ladrillos. En ambos casos, la exposición peatonal coincidía con la emisión de contaminantes atmosféricos.
2. La cabina de monitoreo ambiental Shelter fue trasladado a diferentes lugares de medición, y el muestreador de material particulado HIVOL 3000 se colocó en la parte trasera del Shelter.
3. Un día antes de la medición, el filtro se colocó en una campana de desecación durante 24 horas. Al día siguiente, se extrajo el filtro para efectuar cuatro mediciones de su masa, obteniendo el promedio que se consideró como valor inicial de referencia ( $m_i$ ). Luego, el filtro se transportó en una caja hermética al sitio de medición con el HIVOL 3000.
4. El filtro se colocó dentro del HIVOL 3000, y el equipo se activó durante un período ininterrumpido de 24 horas (Figura 3).
5. Al concluir el período de muestreo, se retiró el filtro del HIVOL 3000 para llevarlo al laboratorio (Figura 4). Luego, el filtro se colocó en un desecador de

vidrio durante 24 horas. Tras este lapso, se realizaron cuatro mediciones de la masa final, obteniendo así el promedio final (mf) y se codificaron tales filtros (Figura 5).

6. La masa del material particulado se determinó mediante el método gravimétrico (Brisht et al., 2015).
7. La concentración del material particulado capturado en el filtro se calculó utilizando las fórmulas establecidas en el protocolo del MINAM (2017) y la EPA (1998).

**Figura 4**

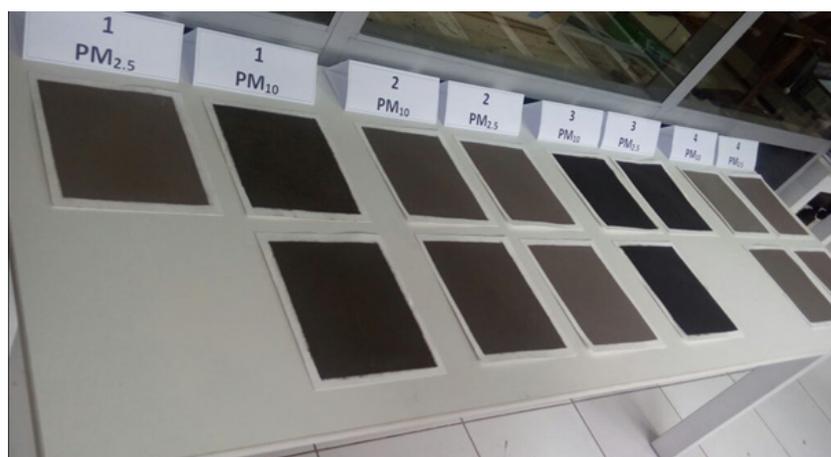
*Filtro de cuarzo luego de su exposición al ambiente durante 24 horas consecutivas*



*Fuente:* Elaboración propia, 2017.

**Figura 5**

*Codificación de filtros de cuarzo correspondientes al año 2017*



*Fuente:* Elaboración propia, 2017.

### ***Determinación de los Índices de Calidad de Aire para cada Concentración de Material Particulado***

El índice de calidad de aire (INCA) dado para cada punto de monitoreo que se presenta en la tabla 3, fue elaborado usando los parámetros establecidos en la Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM (MINAM, 2016). Estos parámetros se muestran en la ecuación (1).

$$I(PM_{2.5}) = [PM_{2.5}] * \frac{100}{25} \dots (1)$$

Según la Ecuación 1, es que pudimos determinar los INCA que se observan en la Tabla 3, para cada valor de la concentración de material particulado de la Tabla 1.

## **Resultados**

**Tabla 1**

*Datos de promedios de PM<sub>2.5</sub> recogidos entre los años 2017 y 2018 con el periodo de medición de 24 horas*

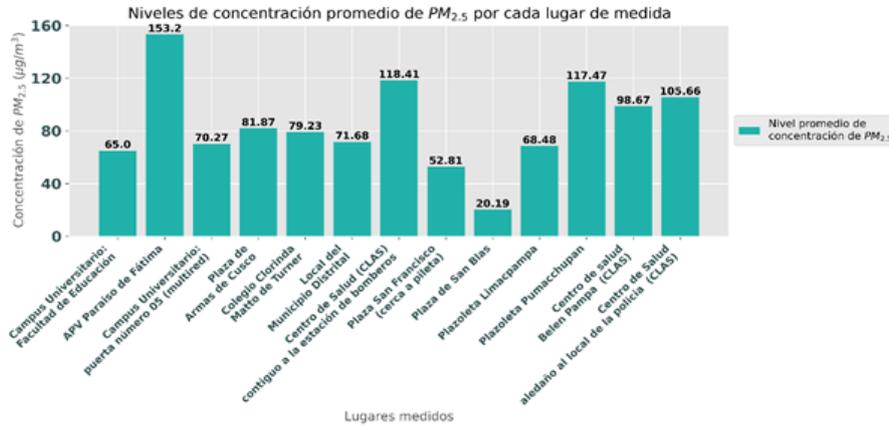
<b>Punto de monitoreo</b>	<b>Distrito</b>	<b>Lugar de monitoreo</b>	<b>Promedio de PM<sub>2.5</sub></b>	<b>Mes de monitoreo</b>	<b>Año de monitoreo</b>
1	Cusco	Campus Universitario: Facultad de Educación	65.00 ± 3.71	Mayo	2017
2	San Sebastián	A.P.V. Paraíso de Fátima	153.20 ± 5.37	Junio / Agosto	2017
3	Cusco	Campus Universitario, puerta número 05 (multired)	70.27 ± 9.91	Setiembre	2017
4	Cusco	Plaza de Armas	81.87 ± 9.16	Octubre	2017
5	Cusco	Colegio Clorinda Matto de Turner	79.23 ± 9.36	Diciembre	2017
6	Wanchaq	Local del Municipio Distrital	71.68 ± 10.1	Diciembre	2017
7	Wanchaq	Centro de Salud (CLAS) contiguo a la estación de bomberos	118.41 ± 10.37	Enero	2018
8	Cusco	Plaza San Francisco (cerca a pileta)	52.81 ± 15.61	Enero / Febrero	2018
9	Cusco	San Blas	20.19 ± 10.31	Marzo	2018
10	Cusco	Plazoleta Limacpampa	68.48 ± 4.74	Marzo	2018
11	Cusco	Plazoleta Pumacchupan	117.47 ± 19.72	Abril	2018
12	Santiago	Centro de salud, Belen Pampa (CLAS)	98.67 ± 5.26	Mayo	2018
13	San Jerónimo	Centro de Salud aledaño al local de la policia (CLAS)	105.66 ± 48.35	Junio / Agosto	2018

*Fuente:* Elaboración propia, 2023.

Según la tabla 1, la evaluación de promedios y valores máximos de concentración de PM<sub>2.5</sub> en gráficos de barras se muestra en la Figura 6.

**Figura 6**

*Valores de concentración promedios de  $PM_{2.5}$  en cada punto de medición en la ciudad del Cusco*



Fuente: Elaboración propia en Python, 2023.

**Tabla 2**

*Índice de Calidad Ambiental referente a material particulado  $PM_{2.5}$*

Material particulado ( $PM_{2.5}$ ) promedio 24 horas			
Color	Calificación	Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones ( $\frac{\mu g}{m^3}$ )
Verde	Buena	0 - 50	0 - 12.5
Amarillo	Moderada	51 - 100	12.6 - 25
Naranja	Mala	101 - 500	25.1 - 125
Rojo	Umbral de Cuidado	>500	>125

Fuente: RM-N°-181-2016-MINAM.

**Tabla 3**

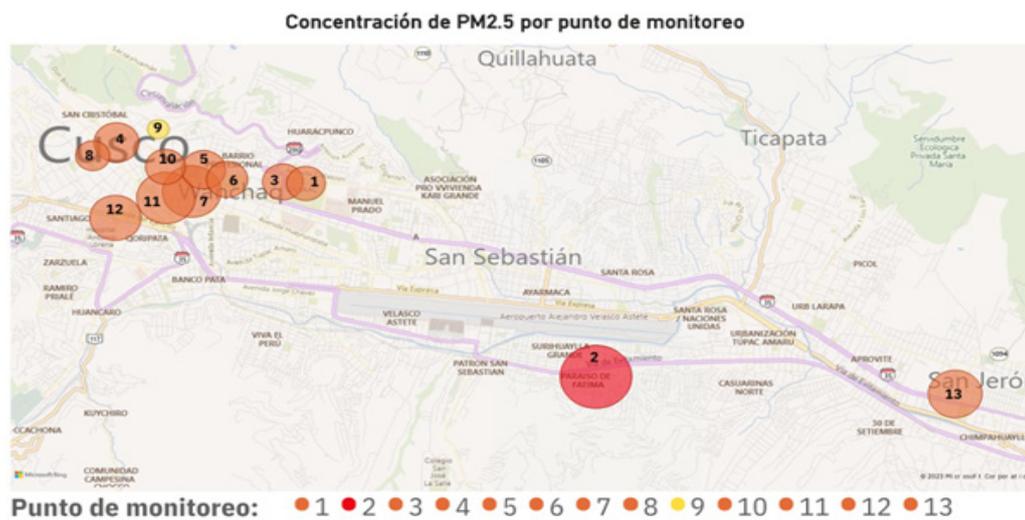
*Cálculo de Índice de Calidad de Aire para los puntos de monitoreo de material particulado PM<sub>2,5</sub> de la tabla 1 según la ecuación 1*

Punto de monitoreo	Concentración PM <sub>2,5</sub> ( $\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}$ )	INCA	Color	Calificación
1	65.00 ± 3.71	260	Naranja	Mala
2	153.20 ± 5.37	612.8	Rojo	Umbral de cuidado
3	70.27 ± 9.91	281.06	Naranja	Mala
4	81.87 ± 9.16	327.46	Naranja	Mala
5	79.23 ± 9.36	316.91	Naranja	Mala
6	71.68 ± 10.1	286.71	Naranja	Mala
7	118.41 ± 10.37	473.63	Naranja	Mala
8	52.81 ± 15.61	211.23	Naranja	Mala
9	20.19 ± 10.31	80.77	Amarillo	Moderada
10	68.48 ± 4.74	273.93	Naranja	Mala
11	117.47 ± 19.72	469.89	Naranja	Mala
12	98.67 ± 5.26	394.67	Naranja	Mala
13	105.66 ± 48.35	422.62	Naranja	Mala

*Fuente:* Elaboración propia, 2023.

**Figura 7**

*Mapa de distribución de la concentración promedio de material particulado PM<sub>2,5</sub> por cada punto de monitoreo según datos de la tabla 1*



*Fuente:* Elaboración propia en Power Bi, 2023.

## **Discusión**

El análisis de los datos de concentración promedio de  $PM_{2.5}$  en la ciudad del Cusco durante el período de estudio (2017-2018) revela patrones de estudio interesantes en la distribución geográfica de este contaminante atmosférico. Utilizando el programa Power Bi, se generó una representación visual (Figura 7) de la cantidad promedio de concentración de  $PM_{2.5}$  por zonas, mediante círculos cuyo tamaño representa la magnitud de la concentración en cada punto de monitoreo, lo cual permite una evaluación visual de la contaminación del aire en la ciudad.

Se observa que el punto 2, ubicado en el A.P.V. Virgen de Fátima, presenta los niveles más elevados de concentración de  $PM_{2.5}$  en comparación con los demás puntos de monitoreo. Estos altos niveles de concentración sugieren que la contaminación por  $PM_{2.5}$  en esta zona podría estar relacionada con las ladrilleras cercanas, ya que la afluencia de vehículos en esta área es muy baja. Por otro lado, el punto 9, ubicado en San Blas, muestra los niveles más bajos de concentración de  $PM_{2.5}$  en comparación con los demás puntos de monitoreo. Esto podría deberse a la geografía de la zona, la cual limita la fluidez del tráfico vehicular en esta área.

La Av. de la Cultura es la más transitada en la ciudad del Cusco, seguido de las calles y avenidas que se encuentran alrededor de la plaza de armas que tiene un alto flujo vehicular, a diferencia del punto 9. Esto sugiere que el transporte vehicular es una de las principales fuentes de contaminación por  $PM_{2.5}$  en la ciudad del Cusco.

Estos resultados concuerdan con investigaciones previas en diferentes partes del mundo que han resaltado la influencia significativa del tráfico vehicular y la actividad industrial en los niveles de contaminación por  $PM_{2.5}$  (Zhang, 2017). Estos estudios han identificado patrones consistentes en los cuales las áreas urbanas con alta densidad vehicular y presencia de industrias suelen exhibir concentraciones elevadas de  $PM_{2.5}$ . Sin embargo, es importante mencionar que la concentración de  $PM_{2.5}$  también puede verse afectada por otros factores, como las condiciones meteorológicas, la topografía del terreno y la estacionalidad, entre otros (Wijnands et al., 2022).

Es relevante destacar que los niveles de concentración de  $PM_{2.5}$  en la ciudad del Cusco durante el período de estudio se encuentran por encima de los límites establecidos por las normas de calidad del aire, lo cual indica una preocupante situación de contaminación atmosférica en la ciudad. La exposición a niveles elevados de  $PM_{2.5}$  se ha asociado con una serie de efectos adversos para la salud humana, incluyendo enfermedades respiratorias, cardiovasculares y otras condiciones crónicas. Por lo tanto, es necesario tomar medidas adecuadas para reducir la contaminación del aire por  $PM_{2.5}$  en la ciudad del Cusco, con el fin de proteger la salud de la población.

## **Conclusiones**

El análisis muestral de los datos de concentración promedio de  $PM_{2.5}$  en diferentes puntos de monitoreo de la ciudad del Cusco durante los años 2017 y 2018 demuestran que la contaminación atmosférica en cada sitio de medición está relacionada principalmente con el tráfico vehicular y las emisiones de las ladrilleras ubicadas en la ciudad del Cusco.

La concentración de  $PM_{2.5}$  más alta en el año 2017 se midió en la A.P.V. Virgen de Fátima, este punto de monitoreo se encuentra cerca al sector de ladrilleras. El punto de monitoreo ubicado en San Blas muestra los niveles más bajos de concentración de  $PM_{2.5}$ , posiblemente debido al bajo tránsito vehicular.

Más del 84% de los puntos de monitoreo demuestran valores de concentración de  $PM_{2.5}$  elevados, según el INCA su calificación es mala y en el caso de la A.P.V. Virgen de Fátima su calificación es de umbral de cuidado, en el caso de San Blas su calificación es moderada; por consiguiente, el predominio de la calificación INCA es mala en la ciudad del Cusco.

### **Declaración de Conflicto de Intereses**

Los autores declaran no presentar ningún tipo de conflicto de intereses.

## Referencias

- Bhardwaj, A., & Raman, R. S. (2022). Evaluation of organic aerosol filter sampling artefacts and implications to gravimetric PM<sub>2.5</sub> mass at a COALESCE network site-Bhopal, India. *Journal of Environmental Management*, 319, 115749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115749>
- Bisht, D., Dumka, U., Kaskaoutis, D., Pipal, A., Srivastava, A., Soni, V., Attri, S., Sateesh y Tiwari, S. (2015). Carbonaceous aerosols and pollutants over Delhi urban environment: temporal evolution, source apportionment and radiative forcing. *Science of the Total Environment*, 521, 431-445. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.03.083>
- Brunekreef, B., & Holgate, S. T. (2002). Air pollution and health. *The Lancet*, 60(9341), 1233-1242. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(02\)11274-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(02)11274-8)
- Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., ... Forouzanfar, M. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, 389(10082), 1907–1918. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(17\)30505-6](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(17)30505-6)
- Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. Ministerio del Ambiente. Aprueban Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para Aire y establecen Disposiciones Complementarias. 7 de junio de 2017. <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-003-2017-minam>
- Dockery, D. W., & Pope, C. A., 3rd. (1994). Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annual Review of Public Health*, 15(1), 107–132. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.pu.15.050194.000543>
- Environmental Protection Agency. (1998). Document of Fine Particulate Matter Control Techniques From Stationary Sources. [Documents\2-Sec12spf.PDF \(epa.gov\)](#)
- Jerrett, M., Burnett, R., Beckerman, B., Turner, M., Krewski, D., Thurston, G., ... Pope III, C. (2013). Spatial analysis of air pollution and mortality in California. *American journal of respiratory and critical care medicine*, 188(5), 593-599. DOI: <https://doi.org/10.1164/rccm.201303-0609OC>
- Kelly, K., Whitaker, J., Petty, A., Widmer, C., Dybwad, A., A., Sleeth, D., ... & Butterfield, A. (2017). Ambient and laboratory evaluation of a low-cost particulate matter sensor. *Environmental pollution*, 221, 491-500. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.12.039>
- Lewis, S. L., Russell, L. M., McKinsey, J. A., & Harris, W. J. (2023). Small contributions of dust to PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> concentrations measured downwind of Oceano Dunes. *Atmospheric Environment*, 294, 119515. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119515>

- Liu, Z., Xiao, Q., & Li, R. (2023). Full Coverage Hourly PM<sub>2.5</sub> Concentrations' Estimation Using Himawari-8 and MERRA-2 AODs in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), 1490. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph20021490>
- Mallongi, A., Stang, S., Astuti, R. D. P., Rauf, A. U., & Natsir, M. F. (2023). Risk assessment of fine particulate matter exposure attributed to the presence of the cement industry. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 9(1), 43-58. DOI: <https://doi.org/10.22034/gjesm.2023.01.04>
- Ministerio del Ambiente. (2015). *ESDA Estudio de desempeño ambiental 2003-2013*. <https://www.minam.gob.pe/esda/6-1-3-evolucion-de-la-calidad-del-aire-en-las-principales-areas-urbanas-y-cumplimiento-de-la-normativa-eca/>
- Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. (15 de marzo de 2019). *OEFA presenta resultados de la evaluación ambiental realizada en la zona de influencia de las ladrilleras de San Jerónimo en Cusco*. <https://www.oefa.gob.pe/oefa-presenta-resultados-de-evaluacion-ambiental-realizada-en-la-zona-de-influencia-de-las-ladrilleras-de-san-jeronimo-en-cusco/ocac07/>
- Omega Perú S.A. Filtros de Cuarzo diseñado específicamente para Monitoreo de aire Pallflex – Tissuquartz TM Filters. (14 de octubre del 2019). <https://omegaperu.com.pe/filtros-de-cuarzo-disenado-especificamente-para-monitoreo-de-aire-pallflex-tissuquartz-tm-filters/>
- Pope III, C. A., & Dockery, D. W. (2006). Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *Journal of the air & waste management association*, 56(6), 709-742. DOI: <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Pope III, C., Turner, M., Burnett, R., Jerrett, M., Gapstur, S., et. All. Diver, W., ... Brook, R. (2015). Relationships between fine particulate air pollution, cardiometabolic disorders, and cardiovascular mortality. *Circulation research*, 116(1), 108-115. DOI: <https://doi.org/10.1161/CIRCRESAHA.116.305060>
- Programa Regional de Aire Limpio (2006). Sistematización de Experiencias fase 2004-2006. <https://core.ac.uk/download/pdf/48031408.pdf>
- Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM. Ministerio del Ambiente. Establece el Índice de Calidad del Aire - INCA y crea el Sistema de Información de Calidad del Aire - INFO AIRE PERÚ. 14 de julio de 2016. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/RM-N%C2%B0-181-2016-MINAM.pdf>
- United States Environmental Protection Agency. (2016). *Air Quality Index (AQI) Basics*. <https://www.airnow.gov/aqi/aqi-basics/>
- Wang, J., Wang, Y., Liu, H., Yang, Y., Zhang, X., Li, Y., ...Deng, G.(2013). Diagnostic identification of the impact of meteorological conditions on PM<sub>2.5</sub> concentrations in Beijing. *Atmospheric environment*, 81, 158-165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.08.033>

- Warthon Ascarza J. L. (2017). *Energía Limpia y Cero Emisión*. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco. <http://vrin.unsaac.edu.pe/publicaciones/4/energia-limpia-y-cero-emision-.html>
- Wijnands, J. S., Nice, K. A., Seneviratne, S., Thompson, J., & Stevenson, M. (2022). The impact of the COVID-19 pandemic on air pollution: A global assessment using machine learning techniques. *Atmospheric Pollution Research*, 13(6), 101438. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101438>
- World Health Organization. (2021). Ambient air pollution: Health impacts. [https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab\\_1](https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1)
- Yang, X., Xiao, D., Bai, H., Tang, J., & Wang, W. (2022). Spatiotemporal distributions of PM<sub>2.5</sub> concentrations in the Beijing–Tianjin–Hebei region from 2013 to 2020. *Frontiers in environmental science*, 10. DOI: <https://doi.org/10.3389/fevs.2022.842237>
- Zhang, J., Mauzerall, D. L., Zhu, T., Liang, S., Ezzati, M., & Remais, J. V. (2010). Environmental health in China: progress towards clean air and safe water. *The Lancet*, 375(9720), 1110–1119. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(10\)60062-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(10)60062-1)
- Zhang, Q., Jiang, X., Tong, D., Davis, S. J., Zhao, H., Geng, G., ... Zhang, Y. (2017). Transboundary health impacts of transported global air pollution and international trade. *Nature*, 543(7647), 705-709. DOI: <https://doi.org/10.1038/nature21712>