

Sensores de bajo costo en la caracterización de partículas finas (PM_{2.5}) de una ciudad altoandina

Low-cost sensors for fine particulate matter (PM_{2.5}) characterization in a high Andean city

Jesús Ulloa Ninahuamán¹, Daniel Alvarez-Tolentino^{2*}, Anieval Peña Rojas³ y Luis Suarez-Salas⁴

Resumen

Huancayo, una ciudad ubicada en los Andes centrales peruanos, presenta problemas de contaminación atmosférica relacionada con material particulado (PM, por sus siglas en inglés), especialmente por partículas finas (PM_{2.5}). Dados los altos costos de infraestructura y equipos de monitoreo y la necesidad de información más detallada para la implementación de programas de gestión de la calidad del aire, el objetivo del estudio es evaluar la variación temporal y las zonas fuente del PM_{2.5} mediante el empleo de sensores de bajo costo instalados en tres sitios de la ciudad de Huancayo. Se usaron sensores PurpleAir PA-II modelo PMS5003 desde agosto de 2018 a junio de 2019. El conjunto de datos se sometió a pruebas estadísticas para evaluar los cambios temporales. Se calculó retro trayectorias a través del modelo HYSPLIT para la identificación de zonas fuente. Los resultados muestran coincidencias razonables con otros monitoreos realizados con equipos referentes. Se valora la importancia del uso de sensores de bajo costo en la ampliación de una red de vigilancia de calidad de aire en zonas altoandinas y la determinación de fuentes de emisión.

Palabras clave: Variación temporal, fuente de origen, Huancayo, sensores de bajo costo y PM_{2.5}

Abstract

Huancayo, a city located at Peruvian Central Andes, presents air pollution problems related to particulate matter (PM), especially fine fraction (PM_{2.5}). Given the high costs of air quality monitoring network infrastructure and the need for more detailed information, the objective of the study is to evaluate the temporal variation and source zones of PM_{2.5} through the use of low-cost sensors installed at three sites in the city of Huancayo. PurpleAir PA-II model PMS5003 sensors were employed from August 2018 to June 2019. The dataset was subjected to statistical tests to evaluate temporal changes. Backtrajectories were calculated through the HYSPLIT model for source zone identification. The results show reasonable agreement with other reference monitoring. The importance of the use of low-cost sensors in the establishment of an air quality monitoring network in high Andean areas is highlighted and the determination of emission sources.

Keywords: Temporal variation, source of origin, Huancayo, low-cost sensors and PM_{2.5}

Recibido: 13/07/2022

Aprobado: 29/07/2022

Publicado: 25/08/2022

Sección: Artículo original

*Autor correspondiente: d.dalvarez@upla.edu.pe

Introducción

Los entornos urbanos con mayor densidad de población tienen mayor exposición a contaminantes atmosféricos (Martins & Carrilho da Graça, 2018). Existe mucha evidencia del impacto negativo del material particulado o PM (por sus siglas en inglés: particulate matter) en la salud humana, especialmente en lugares de mayor concentración de actividades humanas (Malings *et al.*, 2018; Liu *et al.*, 2019).

Como medidas de control y vigilancia ambiental del PM, es común el monitoreo de partículas menores a 10 µm (PM₁₀) y partículas finas de 2.5 µm (PM_{2.5}) (Martins & Carrilho da Graça, 2018). Existe extensa

literatura sobre los efectos en la salud humana de las partículas finas (Masri *et al.*, 2022), pues pueden penetrar

¹ Facultad de Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional del Centro del Perú, Av. Mariscal Castilla 3909, El Tambo, Huancayo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0086-5974>

² Escuela Académico Profesional de Ingeniería de Medio Ambiente y Desarrollo, Universidad Peruana Los Andes, Huancayo, Perú. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4460-467X>

³ Facultad de Ingeniería de Sistemas, Universidad Nacional del Centro del Perú, Av. Mariscal Castilla 3909, El Tambo, Huancayo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9853-7532>

⁴ Observatorio de Huancayo, Instituto Geofísico del Perú, Calle Badajoz 169, Urb. Mayorazgo, Ate, Lima. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1857-8399>

Como citar: Ulloa Ninahuamán, J., Alvarez-Tolentino, D. M., Peña Rojas, A., & Suarez-Salas, L. (2022). Sensores de bajo costo en la caracterización de partículas finas (PM_{2.5}) de una ciudad altoandina. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 24(3), 199–207. <https://doi.org/10.18271/ria.2022.468>



en los alveolos pulmonares e incluso llegar al torrente sanguíneo (Hamanaka & Mutlu, 2018).

Tradicionalmente en la medición del PM_{2.5} se emplean equipos colectores y monitores automáticos distribuidos en estaciones de control; pero los costos de instalación y mantenimiento dificultan la obtención de información detallada sobre su distribución y transporte hacia zonas periféricas y rurales, así como la identificación de puntos críticos de contaminación en áreas no cubiertas por la red (Liu *et al.*, 2019).

La creciente demanda pública de monitoreos de la calidad del aire en tiempo real y los recientes avances en el campo de microsensores de bajo costo y tecnologías de información y comunicación (TIC) han hecho factible el despliegue de redes densas de monitoreo en zonas urbanas, lo que permite comprender mejor el comportamiento de los contaminantes (Morawska *et al.*, 2018).

Actualmente, existe variedad de microsensores de bajo costo para mediciones de PM diferenciadas por su sensibilidad, uso, costo, tamaño y ahorro de energía (Liu *et al.*, 2019). Entre ellos se tiene a la familia Plantower, sensores que han demostrado gran rendimiento y calidad de fabricación, y que proporcionan buenas medidas relativas de PM_{2.5} (Sayahi *et al.*, 2019; Alfano *et al.*, 2021).

Huancayo es una ciudad altoandina, ubicada en la cordillera central de los Andes peruanos. Estudios

realizados sobre el PM con equipos tradicionales (Suarez-Salas *et al.* 2017; Huamán De La Cruz *et al.*, 2018; Huamán De La Cruz *et al.*, 2019; Álvarez Tolentino & Suárez-Salas, 2020) concluyeron que el PM_{2.5} es uno de los principales contaminantes atmosféricos de la zona, cuyas características de variabilidad y fuentes de origen aún son poco conocidas.

Con la finalidad de entender con más detalle las características de las partículas finas, el estudio tiene por objetivo evaluar la variación temporal y las zonas fuente del PM_{2.5} mediante el empleo de sensores de bajo costo en tres sitios estratégicos de la ciudad de Huancayo.

Materiales y Métodos

Área de Estudio

El área de estudio fue la zona metropolitana de Huancayo (ZMH). La ZMH está ubicada dentro de la región Junín, en el centro del Perú, rodeada por las cordilleras oriental y occidental de los Andes peruanos, sobre los 3300 msnm. Comprende tres distritos: El Tambo, Huancayo y Chilca, con una poblacional aproximada de 500000 habitantes, cuya actividad principal es el comercio y transporte (Municipalidad Provincial de Huancayo, 2017).

Los sitios de monitoreo fueron localizados en lugares urbanos con mayor densidad y desarrollo de actividades económicas (Figura 1). El detalle de los sitios de monitoreo de PM_{2.5} se describe en la Tabla 1.

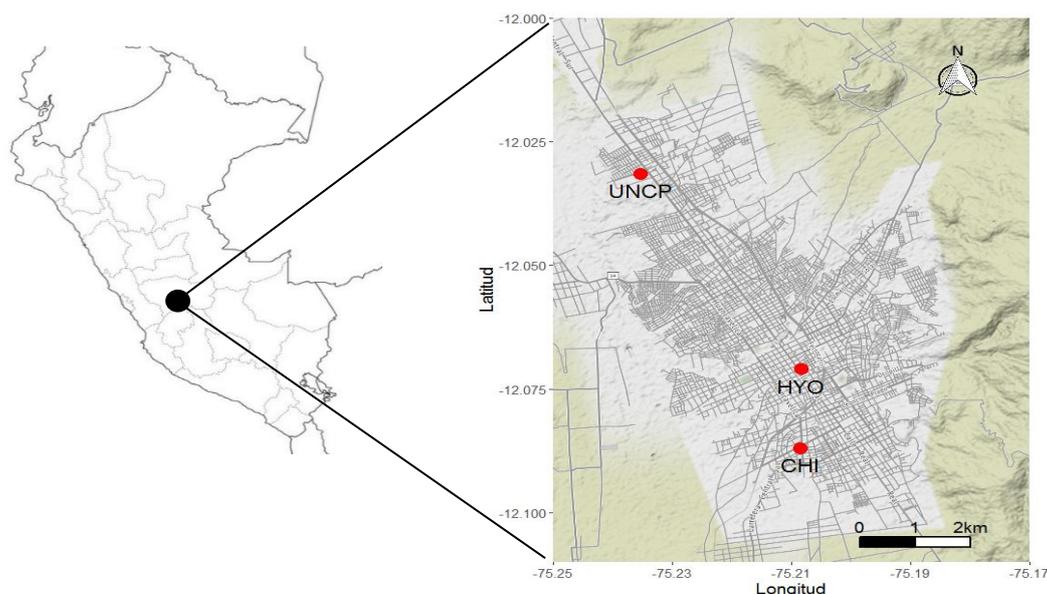


Figura 1. Ubicación de las estaciones de monitoreo de PM_{2.5} en la zona Metropolitana de Huancayo (CHI: Chilca, HYO: Huancayo y UNCP: El Tambo).

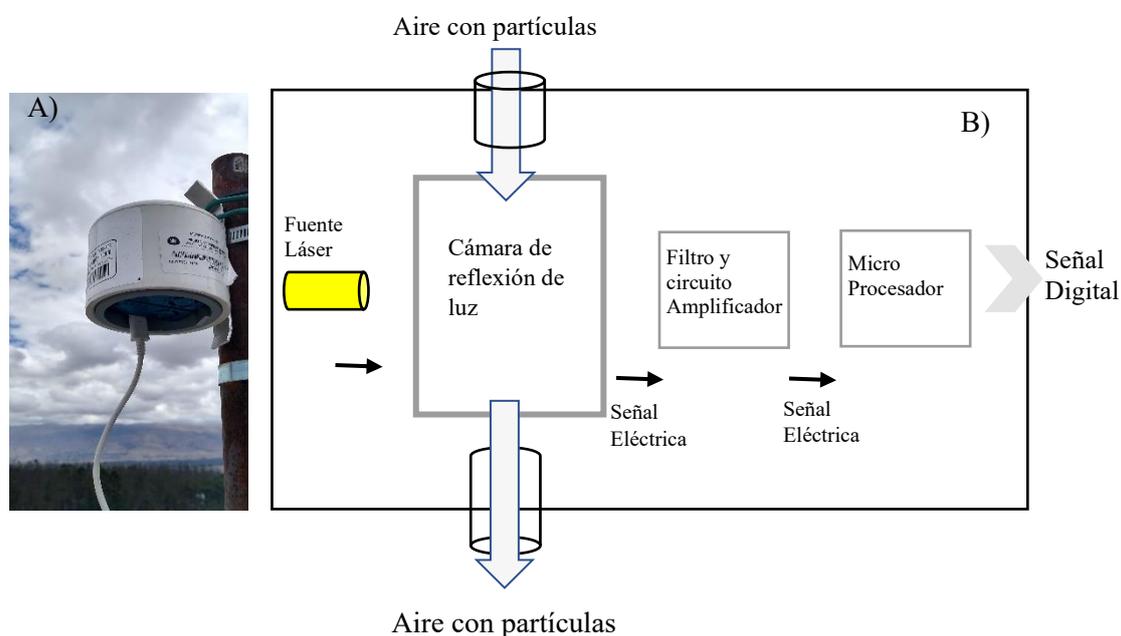
Tabla 1. Localización y descripción de los sitios de monitoreo continuo de PM_{2.5} en la Zona Metropolitana de Huancayo.

Lugar de monitoreo	Latitud Longitud Altitud	Sitio de instalación	Características de la zona
El Tambo (UNCP)	12° 4' 15.43"S 75° 12' 30.14"O 3270 msnm	Ubicado en la azotea del edificio administrativo de la Universidad Nacional del Centro del Perú (UNCP) a 5.2 km al norte del centro de la zona metropolitana de Huancayo.	Zona residencial y comercial con tráfico medio de vehículos ligeros y pesados
Huancayo (HYO)	12° 4' 15.43"S 75° 12' 30.14"O 3256 msnm	Ubicado en la Azotea del edificio de la Municipalidad Provincial de Huancayo en el centro de la zona metropolitana	Zona residencial y comercial con tráfico intenso de vehículos ligeros
Chilca (CHI)	12° 5' 12.86"S 75° 12' 30.94"O 3235 msnm	Ubicado en la azotea del edificio de la Municipalidad Distrital de Chilca a 2.1 km al sur del centro de la zona metropolitana de Huancayo.	Zona residencial, comercial con pequeños grupos de industrias con tráfico medio de vehículos ligeros y pesados

Monitoreo

Se realizaron campañas simultáneas de monitoreo en tiempo real del PM_{2.5} en los tres sitios establecidos, utilizando sensores de bajo costo de la familia Plantower

modelo PMS5003 de la plataforma colaborativa de PurpleAir (SCAQMD, 2016) desde junio de 2018 hasta junio de 2019, con una frecuencia de registro de datos por minuto.



Sensor empleado

Los sensores duales PMS5003 PurpleAir PA II emiten rayos láser sobre los diferentes tamaños de partículas que ingresan hacia el sensor (Figura 2). La

luz reflejada resultante es medida por diodos receptores. Estas señales son filtradas y amplificadas por filtros y circuitos electrónicos antes de ser convertidas por algoritmos complejos en concentraciones de PM_{2.5} (Zheng *et al.*, 2018).

Análisis de los datos

Variabilidad temporal. Los datos seleccionados fueron promediados en escalas temporales (horarias, diarias y mensuales). El análisis de datos se dividió en época seca: mayo-setiembre y época húmeda: octubre-abril (Silva *et al.*, 2008). Los promedios diarios fueron comparados con el Estándar de Calidad Ambiental de 24 horas (ECA = 50 µg/m³) establecido en D.S. N° 003-2017-MINAM.

Las comparaciones por sitio y escala temporal fueron realizadas mediante el análisis de varianza de una vía (ANOVA) y complementadas en caso de diferencias significativas con el Test de significación honesta, de Tukey (HSD Tukey). Para determinar la diferencia significativa entre los períodos estacionales se empleó el Test de Student (Test-T).

Zonas fuente. Para analizar las zonas fuente de emisión del PM_{2.5}, se empleó el modelo híbrido lagrangiano de trayectoria integrada de partícula única (HYSPLIT, por sus siglas en inglés), generando retrotrayectorias de 120 horas (5 días hacia atrás), a intervalos de 6 horas a 10 m de altura sobre los sitios de monitoreo, con datos meteorológicos de reanálisis del Sistema Global de Asimilación de Datos (GDAS) a resolución horizontal de 0.5° (Stein *et al.*, 2015). Con las retrotrayectorias obtenidas se calcularon las Trayectorias de concentración ponderada (TCP) cuya fórmula es la siguiente (Ecuación 1):

$$In(\bar{c}_{ij}) = \frac{1}{\sum_{k=1}^N \tau_{ijk}} \sum_{k=1}^N In(c_k) \tau_{ijk} \quad (1)$$

Donde *i* y *j* son los índices de la grilla, *k* el índice de la trayectoria, *N* el número total de trayectorias utilizadas en el análisis, *C_k* la concentración de contaminante medida a la llegada de la trayectoria *k*, y *τ_{ijk}* el tiempo de residencia de la trayectoria *k* en la celda de la cuadrícula (*i*, *j*). Un valor elevado de *C_{ij}* significa que las parcelas de aire que pasan por la celda (*i*, *j*) provocan, por término medio, concentraciones elevadas en el lugar receptor.

El TCP fue aplicado para días que superaron el estándar de calidad ambiental peruano.

Los análisis fueron ejecutados mediante el software libre CRAM R, versión 3.5.1 (2018-07-02) (R Core Team, 2015), utilizando los paquetes ggplot2

(Wickham & Chang, 2016) y splitr (Iannone, 2016). Como complemento se usó el geoservidor (<https://geoserfor.gob.pe/monitoreosatelitalforestal>) de reportes de alertas de incendios forestales del Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR).

Resultados

Variabilidad temporal

Las mediciones a la frecuencia de un minuto, para los tres sitios de monitoreo de PM_{2.5} durante toda la campaña muestran gran variabilidad. Las fechas festivas como Navidad y Año Nuevo, registran los valores máximos. En la noche del 31 de diciembre, previa al Año Nuevo (en gris); en CHI se registró el valor máximo de 826 µg/m³, en HYO el valor de 788 µg/m³ y en la UNCP el valor de 627 µg/m³.

Las variaciones horarias registraron dos picos de importancia: el primero desde las 06 hasta las 08 horas, período durante el cual el tráfico se intensifica, dado que la población se moviliza hacia sus centros de estudio y/o trabajo; el segundo pico horario del día se observa desde las 19 a las 21 horas, donde se intensifica el tráfico por actividades de retorno y aumentan las emisiones por parte de las pollerías, centros de comida rápida y otros.

Respecto a la variación semanal de PM_{2.5}, para el caso de CHI los promedios máximos se registraron los días sábado (25.2±9µg/m³) y los mínimos los días miércoles (17.4±7µg/m³); en HYO los máximos valores se determinaron los días domingo (25.7±12µg/m³) y los mínimos los días miércoles (19.5±10µg/m³); y en la UNCP los valores máximos se registraron los días martes (16.8±11µg/m³) y los mínimos los días miércoles (13.3±9µg/m³).

Comparando los promedios por día de PM_{2.5} con el ECA(50µg/m³), en CHI se registraron cuatro superaciones al ECA; en cambio, para HYO y UNCP se determinaron 12 y 09 superaciones al ECA, respectivamente (Figura 3). Con los sensores se pudo observar superaciones simultáneas al valor del ECA en las tres estaciones: 02/12/2018, 31/12/2018 y 01/01/2019. Igualmente, se encontraron superaciones simultáneas entre la estación de HYO y la UNCP en septiembre (días 10, 12, 13 y 15).

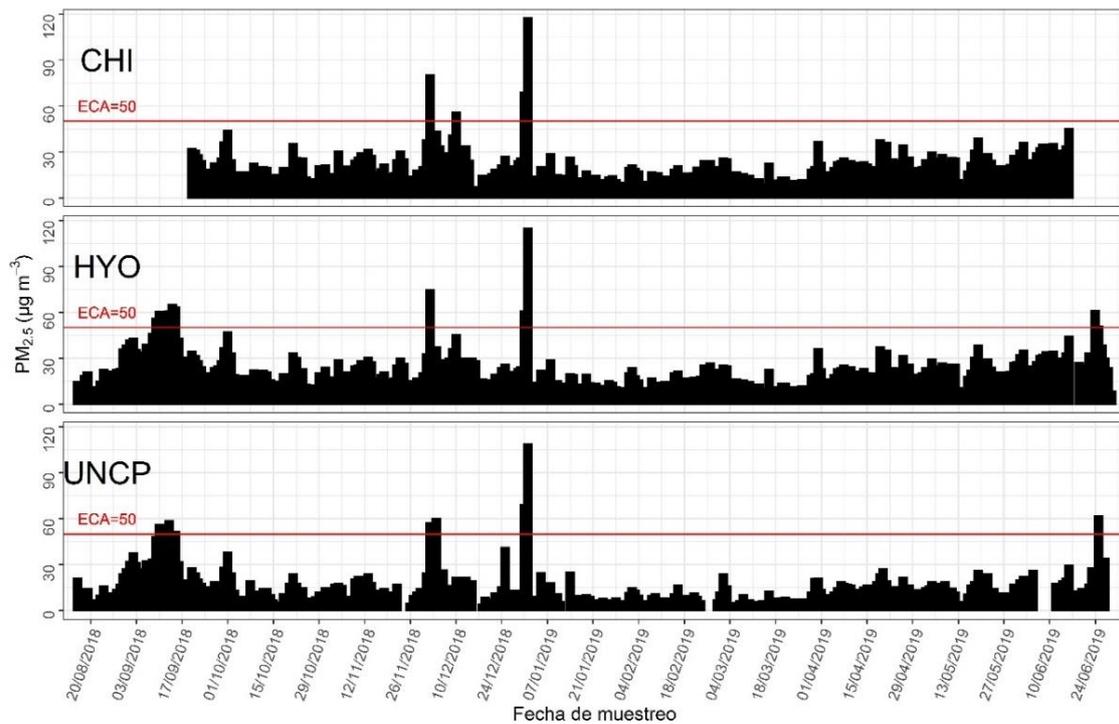


Figura 3. Variación diaria del PM_{2.5} medido por sensores PurpleAir PII en la Zona Metropolitana de Huancayo (CH: Chilca, HYO: Huancayo y UNCP: El Tambo).

En HYO y la UNCP el promedio mensual máximo fue en septiembre, con $37.2 \pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $25 \pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, y los mínimos en marzo con $13.4 \pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $8.20 \pm 4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Comparando la variabilidad mensual se registraron diferencias significativas entre las concentraciones mensuales ($p < 0.001$), para los tres sitios.

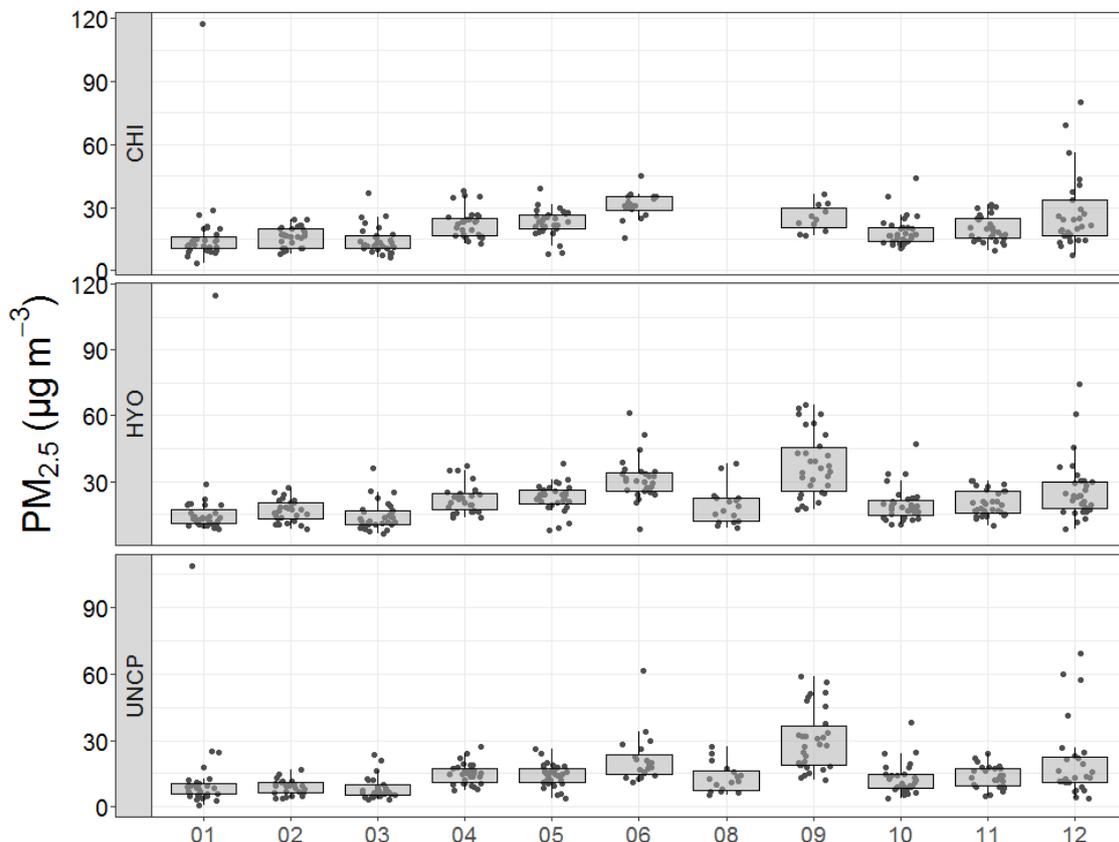


Figura 4. Variación mensual del PM_{2.5} medido por sensores PurpleAir PII en la Zona Metropolitana de Huancayo (CH: Chilca, HYO: Huancayo y UNCP: El Tambo).

En general se registró el máximo promedio de PM_{2.5} en HYO 21.7±10 µg/m³ seguido de CHI 19.6±8 µg/m³ y la UNCP con 14.5±9.39 µg/m³. No se registró diferencia significativa (p>0.05) entre el PM_{2.5} de HYO y CHI, pero sí con la UNCP (p<0.05).

En CHI, HYO y la UNCP el promedio en época seca fue 25.2±8µg/m³, 28.5±13µg/m³ y 19.1±8µg/m³, y en época húmeda fue 18±7µg/m³, 18.4±7µg/m³ y 11.3±8µg/m³.

Zonas fuente

En el análisis de TCP aplicado a los días que se superaron los estándares de calidad ambiental (Figura

5) según de los registros de los sensores de bajo costo, se observa que las zonas con mayor frecuencia de trayectorias de masas de aire con mayor concentración de PM_{2.5} proceden del noreste de las estaciones evaluadas.

Adicionalmente se muestran los mapas de calor de la plataforma de alerta de incendios de SERFOR registrados en los días que superaron el ECA de PM_{2.5} de manera simultánea en las tres estaciones. De ellos se desprende mayor presencia de incendios en septiembre, lo cual contrasta con los resultados de la variación mensual.

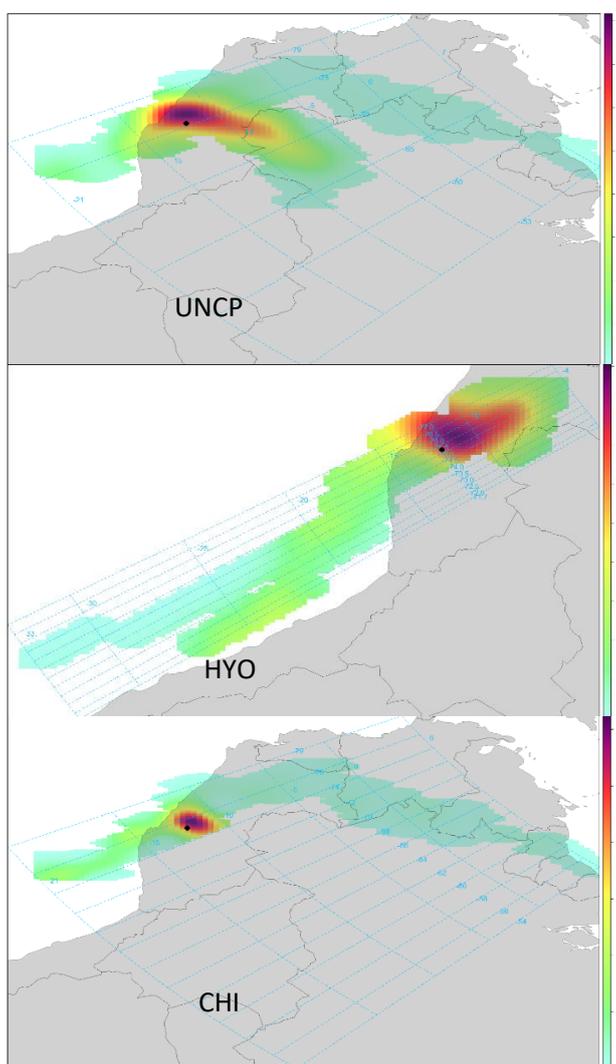


Figura 5. Concentraciones de trayectorias ponderadas y suavizadas de PM_{2.5} utilizando el enfoque TCP en la Zona Metropolitana de Huancayo (CH: Chilca, HYO: Huancayo y UNCP: El Tambo

Discusión

Los valores extremos máximos registrados con los sensores corresponden con la quema de fuegos pirotécnicos y otros objetos, costumbre común en los

pobladores peruanos a fin de año, similares aumentos se registraron en ciudades como Lima (SENAMHI, 2018).

Los mayores valores de PM_{2.5} se registraron en HYO y CHI, zonas con mayor actividad comercial

y tráfico vehicular, en comparación con la UNCP. Lo interesante de este registro es la coincidencia con las mediciones realizadas con equipos colectores de referencia (Huamán De La Cruz *et al.*, 2019).

Las observaciones horarias de $PM_{2.5}$ coinciden con las variaciones horarias de carbono negro (Suárez-Salas *et al.*, 2017). Según los estudios de Suárez-Salas *et al.*, 2017; Huamán De La Cruz *et al.*, 2018 y Huamán De La Cruz *et al.*, 2019, en Huancayo se determinaron dos fuentes principales de $PM_{2.5}$: el polvo de suelo y el transporte. Dada la coincidencia de picos horarios con los valores de carbono negro y por ser el transporte uno de los principales problemas ambientales de Huancayo (Municipalidad Provincial de Huancayo, 2012, 2006); ello nos permite afirmar que esta fuente es la principal responsable de los aumentos del material particulado fino.

Los resultados mensuales coinciden con lo registrado por Vivanco Cristobal, 2014; Suárez-Salas *et al.*, 2017 y Estevan *et al.*, 2019. No se registró diferencia significativa ($p > 0.05$) para CHI entre enero, febrero, marzo, octubre y noviembre; para HYO entre enero, febrero, marzo, octubre, noviembre y diciembre, y para la UNCP entre enero, febrero, marzo, octubre y diciembre; ello coincide con las concentraciones bajas registradas

en época húmeda de $MP_{2.5}$ (Huamán De La Cruz *et al.*, 2019; Suárez-Salas *et al.*, 2017) y aerosoles (Estevan *et al.*, 2019; Vivanco Cristobal, 2014).

Las comparaciones de $PM_{2.5}$ por época seca y húmeda muestran diferencias significativas ($p < 0.001$) para los tres sitios. Estos resultados coinciden con estudios previos locales (Estevan *et al.*, 2019; Moya Alvarez *et al.*, 2017; Suárez-Salas *et al.*, 2017), donde se señala que en la época seca es cuando se registran las mayores concentraciones de $PM_{2.5}$, época en la cual la quema de vegetación se incrementa y es una de las principales fuentes.

En ese sentido, los sensores de bajo costo registraron excesos al ECA de 24 horas en el mes de setiembre para HYO y la UNCP, meses de escasa precipitación (IGP, 2005). Analizando los focos de incendios producidos en los días de exceso se muestra un incremento de los mismos especialmente en septiembre (Figura 6), cuando los registros fueron más intensos. Lo que nos permite afirmar que los episodios de contaminación ocurridos en fechas secas aumentan por fuentes externas a la zona de estudio, y son los incendios forestales los principales responsables de excesos. Ello coincide con los resultados de Estevan *et al.* (2019) y Álvarez-Tolentino & Suárez-Salas (2020).

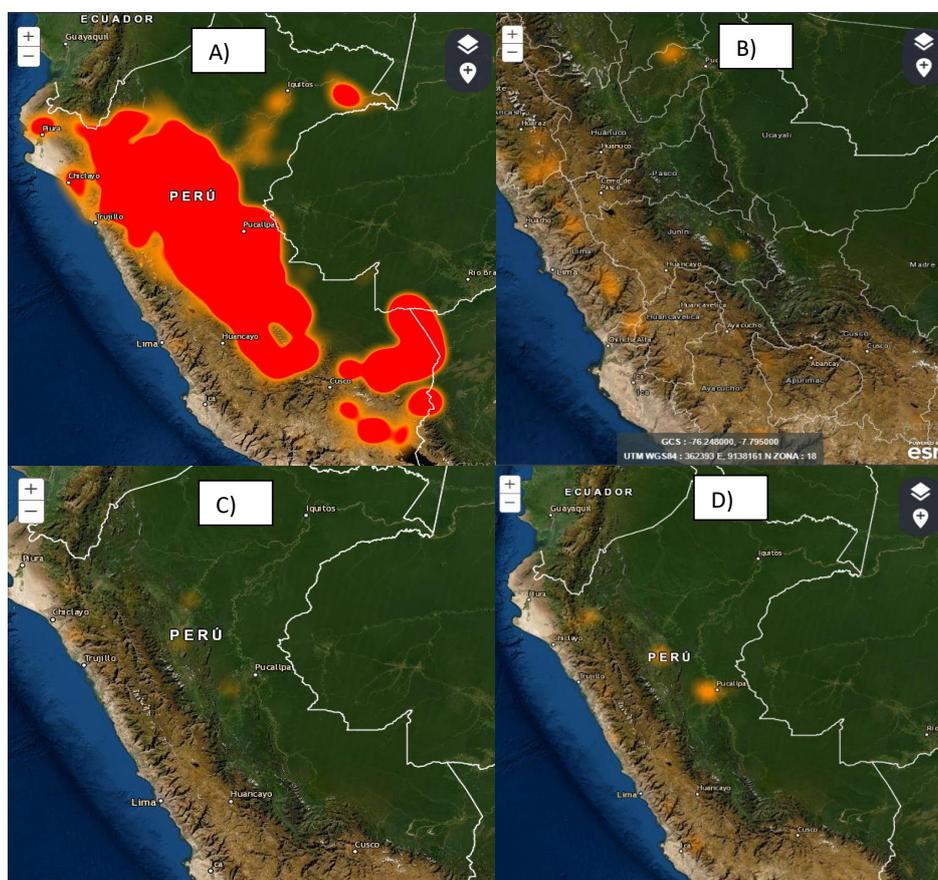


Figura 6. Zonas de alertas de incendios forestales en el territorio peruano según la plataforma de SERFOR, A) del 10 al 15 de septiembre de 2018, B) del 02 de diciembre de 2018, C) 31 de diciembre de 2018, y D) de 01 de enero del 2019.

Debido a la limitada comprensión sobre los sensores de bajo costo (Lewis y Edwards, 2016) y la confusa influencia de las condiciones meteorológicas (Humedad relativa y temperatura), propiedades de aerosol (tamaño y composición) y la elección de los equipos de referencia para la calibración de los resultados (Zheng *et al.*, 2018).

Conclusiones

Este estudio muestra por primera vez la variación horaria y semanal del PM_{2.5} medidos con sensores de bajo costo para tres sitios urbanos de la Zona Metropolitana de Huancayo. Se registran superaciones al ECA peruano, las que serían potenciadas por fuentes externas como los incendios forestales. Asimismo, los resultados muestran una influencia del transporte en la variación horaria y diaria del PM_{2.5} como aporte local.

Se observan coincidencia de las variaciones mensuales y estacionales del PM_{2.5} registradas en este estudio con investigaciones anteriores, lo que nos indica que los sensores de bajo costo vienen registrando información aceptable del MP_{2.5} y tienen gran potencial para ser usados como complemento de monitoreo integrales de la calidad de aire en zonas de los Andes peruanos.

Agradecimientos

Al fondo concursable para investigación del canon y sobre canon minero de la Universidad Nacional del Centro del Perú por el financiamiento del proyecto: “Vehículo Aéreo No-tripulado (VANT) como instrumento en la mejora de la gestión de la calidad del aire en la zona metropolitana de Huancayo”, Contrato No 018-2017-VRI-UNCP.

Referencias

- Alfano, B., Barretta, L., Del Giudice, A., De Vito, S., Di Francia, G., Esposito, E., Formisano, F., Massera, E., Miglietta, M.L., Polichetti, T., 2021. A review of low-cost particulate matter sensors from the developers' perspectives (Sensors. Sensors 21, 1–56. <https://doi.org/10.3390/s21093060>)
- Estevan, R., Martínez-Castro, D., Suarez-Salas, L., Moya, A., Silva, Y., 2019. Atmospheric Environment : X First two and a half years of aerosol measurements with an AERONET sunphotometer at the Huancayo Observatory, Peru. Atmos. Environ. X 3, 100037. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100037>
- Hamanaka, R.B., Mutlu, G.M., 2018. Particulate Matter Air Pollution: Effects on the Cardiovascular System. Front Endocrinol 9, 1–15. <https://doi.org/10.3389/fendo.2018.00680>
- Huamán De La Cruz, A., Bendezu Roca, Y., Suarez-Salas, L., Pomalaya, J., Alvarez Tolentino, D., Gioda, A., 2019. Chemical Characterization of PM_{2.5} at Rural and Urban Sites around the Metropolitan Area of. Atmosphere (Basel). 10, 1–17. <https://doi.org/10.3390/atmos10010021>
- Huamán De La Cruz, A.R., Huamán De La Cruz, J.K., Alvarez Tolentino, D., Gioda, A., 2018. Trace element biomonitoring in the Peruvian andes metropolitan region using Flavoparmelia caperata lichen. Chemosphere 210, 849–858. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.07.013>
- Iannone, R., 2016. SplitR: v0.4 (Version v0.4).
- IGP, 2005. Vulnerabilidad actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la cuenca del río Mantaro.
- Liu, H., Schneider, P., Haugen, R., Vogt, M., 2019. Performance Assessment of a Low-Cost PM 2.5 Sensor for a near Four-Month Period in Oslo, Norway. Atmosphere (Basel). 10, 1–19. <https://doi.org/10.3390/atmos10020041>
- Malings, C., Tanzer, R., Hauryliuk, A., Saha, P.K., Robinson, A.L., 2018. Fine Particle Mass Monitoring with Low-Cost Sensors : Corrections and Long-Term Performance Evaluation. ESSOAr 1–21. <https://doi.org/10.1002/essoar.10500022.2>
- Martins, N.R., Carrilho da Graça, G., 2018. Impact of PM_{2.5} in indoor urban environments: A review. Sustain. Cities Soc. 42, 259–275. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.011>
- Masri, S., Rea, J., Wu, J., 2022. Use of Low-Cost Sensors to Characterize Occupational Exposure to PM_{2.5} Concentrations Inside an Industrial Facility in Santa Ana, CA: Results from a Worker-and Community-Led Pilot Study. Atmosphere (Basel). 13. <https://doi.org/10.3390/atmos13050722>
- Morawska, L., Thai, P., Liu, X., Asumadu-Sakyi, A., Ayoko, G., Bartonova, A., Bedini, A., Chai, F., Christensen, B., Dunbabin, M., Gao, J., Hagler, G., Jayaratne, R., Kumar, P., Lau, A., Louie, P., Mazaheri, M., Ning, Z., Motta, N., Mullins, B., Rahman, M., Ristovski, Z., Shafiei, M., Tjondronegoro, D., Westerdahl, D., Williams, R., 2018. Applications of low-cost sensing technologies for air quality monitorin and exposure assessment: How far have they gone? Env. Int. 116,

- 286–299. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.04.018>.
[Submit](#)
- Moya Alvarez, A.S., Arredondo, R.E., Yuli Posadas, R.Á., 2017. Determinación de la presencia de partículas (PM10) en Perú producidas por quema de biomasa con ayuda de modelos numéricos. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 33, 99–108. <https://doi.org/10.20937/RICA.2017.33.01.09>
- Municipalidad Provincial de Huancayo, 2012. Plan vial provincial participativo de Huancayo 2012-2021. Huancayo, Perú.
- Municipalidad Provincial de Huancayo, 2017. Plan Provincial de Seguridad Ciudadana. Huancayo, Perú.
- Municipalidad Provincial de Huancayo, M., 2006. Plan de Desarrollo Urbano Huancayo 2006-2011.
- Pöschl, U., 2005. Atmospheric aerosols: Composition, transformation, climate and health effects. *Angew. Chemie - Int. Ed.* 44, 7520–7540. <https://doi.org/10.1002/anie.200501122>
- R Core Team, 2015. R: A Language and Environment for Statistical Computing, R Foundati. ed. Vienna, Austria.
- Sayahi, T., Butterfield, A., Kelly, K.E., 2019. Long-term field evaluation of the Plantower PMS low-cost particulate matter sensors. *Environ. Pollut.* 245, 932–940. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.11.065>
- SENAMHI, 2018. Celebraciones de Año Nuevo 2018 incrementaron contaminación del aire de Lima [WWW Document]. <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=lima&p=prensa&n=768>
- Silva, Y., Takahashi, K., Chávez, R., 2008. Dry and wet rainy seasons in the Mantaro river basin (Central Peruvian Andes). *Adv. Geosci.* 14, 261–264. <https://doi.org/10.5194/adgeo-14-261-2008>
- South Coast Air Quality Management District (SCAQMD), 2016. Digital universal particle concentration sensor: PMS5003 series data manual [WWW Document]. https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf.
- Stein, A.F.; Draxler, R.R.; Rolph, G.D.; Stunder, B.J.B.;Cohen M.D.; Ngan, F., 2015. NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system. *Am. Meteorol. Soc.* 96, 2059–2077. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Suarez- Salas, L., Torres, C., Helmig, D., Hueber, J., 2017. Medición y análisis del aerosol de carbono negro en el Observatorio de Huancayo, Perú. *Rev. Boliv. Física* 30, 7–15.
- Suarez-Salas, L., Alvarez Tolentino, D., Bendezú, Y., Pomalaya, J., 2017. Caracterización química del material particulado atmosférico del centro urbano de Huancayo, Perú. *Rev. Soc. Quím Perú* 83, 187–199.
- Vivanco Cristobal, S. V., 2014. Variabilidad temporal de aerosoles atmosféricos en Huancayo. *Apunt. Cienc. Soc.* 4, 57–68.
- Zheng, T., Bergin, M.H., Johnson, K.K., Tripathi, S.N., Shirodkar, S., Landis, M.S., Sutaria, R., Carlson, D.E., 2018. Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments. *Atmos. Meas. Tech.* 11, 4823–4846.