

Niveles de concentración por PM_{2.5} mediante sensores de bajo costo. Caso de estudio: Pamplona, Colombia

Concentration levels by PM_{2.5} through low-cost sensors. Case study: Pamplona, Colombia

Carlos Alexis Bonilla-Granados ^{1a}, Alba Yajaira Sánchez-Delgado ^{1b}, Yrany M. Rubio-Gómez ^{2a}, Mauro Cortez-Huerta ^{2b}

¹ Grupo de investigación Etenoha, Programa de Ingeniería Civil, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Universidad de Pamplona, Colombia. Orcid: 0000-0002-4558-4615 ^a, 0000-0002-5925-8239 ^b. Correos electrónicos: carlos.bonilla@unipamplona.edu.co ^a, alba.sanchez@unipamplona.edu.co ^b

² Posgrado de Maestría y Doctorado en Ingeniería, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. Orcid: 0000-0001-6889-2859 ^a, 0000-0001-8968-6405 ^b. Correos electrónicos: maye_rg@comunidad.unam.mx ^a, mauro.cortez@comunidad.unam.mx ^b

Recibido: 22 noviembre, 2022. Aceptado: 5 mayo, 2023. Versión final: 25 junio, 2023.

Resumen

El uso de sensores de bajo costo para el estudio de la contaminación atmosférica en ciudades ha aumentado en los últimos años. Este trabajo se realizó con el objetivo de medir los niveles de concentración de PM_{2.5} en la ciudad de Pamplona y analizar las concentraciones a las cuales la población se ve expuesta, puesto que no se cuenta en la ciudad con una estación de monitoreo oficial. Se utilizaron cuatro sensores de bajo costo de la marca SENSIRION, modelo SPS30, los cuales se ubicaron siguiendo los lineamientos recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Asimismo, se realizaron pruebas estadísticas con los datos y se analizó el comportamiento de las concentraciones de PM_{2.5} en el periodo de julio a septiembre de 2022. Los resultados del monitoreo muestran que las concentraciones de PM_{2.5} están muy por debajo del límite máximo permisible de la legislación colombiana de 37 µg/m³ (promedio 24 horas), sin embargo, se observó que, en días festivos como la celebración de la independencia, las concentraciones aumentaron hasta cerca de alcanzar el límite de referencia impuesto por la Organización Mundial de la Salud (15 µg/m³). Además, se observó a través de mapas de distribución espacial que las máximas concentraciones se centran al norte de la ciudad, donde se tiene una mayor densidad del tráfico automotriz y se encuentran los principales centros educativos. De esta forma, este estudio permitió obtener un indicativo de las concentraciones de PM_{2.5} creando un registro para la gestión de la calidad del aire, así como, una base de información con datos disponibles en la web de acceso público.

Palabras clave: calidad del aire; IDW; método laser; OMS; PM_{2.5}; tipificación; salud pública; sensores de bajo costo; SIG; USEPA.

Abstract

The use of low-cost sensors has increased in recent years to study air pollution in cities. This work was carried out with the objective of measuring PM_{2.5} concentration levels in the city of Pamplona and analyzing the concentrations

to which the population is exposed, since there is no official monitoring station in the city. Four low-cost sensors of the SENSIRION brand, model SPS30, were used, which were located following the guidelines recommended by the United States Environmental Protection Agency. Statistical tests were also performed on the data and the behavior of $PM_{2.5}$ concentrations was analyzed for the period from July to September 2022. The monitoring results show that $PM_{2.5}$ concentrations are well below the maximum permissible limit of Colombian legislation of $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (24-hour average), however, it was observed that, on holidays such as the Independence Day celebration, concentrations increased to close to reach the reference limit imposed by the World Health Organization ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$). In addition, it was observed through spatial distribution maps that the maximum concentrations are centered in the north of the city, where there is a higher density of automobile traffic and where the main educational centers are located. In this way, this study made it possible to obtain an indicative of $PM_{2.5}$ concentrations, creating a registry for air quality management, as well as an information base with data available on the web for public access.

Keywords: air quality; GIS; IDW; laser method; low-cost sensors; $PM_{2.5}$; public health; typing; USEPA; WHO.

1. Introducción

Las partículas suspendidas son uno de los contaminantes atmosféricos más problemáticos para el ambiente y de repercusión a la salud humana [1], [2]. Los efectos de las partículas a la salud humana, asociados especialmente con partículas de diámetro aerodinámico menor a 2.5 micrómetros ($PM_{2.5}$), incluyen asma, cáncer de pulmón y enfermedades cardiovasculares [3], [4]. Por ende, las ciudades comúnmente monitorean $PM_{2.5}$ como parte de sus estrategias de gestión de la calidad del aire [5].

El monitoreo de la contaminación del aire es vital no solo para los ciudadanos, advirtiéndoles sobre los riesgos para la salud de los contaminantes del aire, sino también para los responsables de la formulación de políticas, ayudándolos en la toma de decisiones que protejan la integridad de las personas más vulnerables. Existen varias técnicas para medir la concentración de partículas en el aire como: el método gravimétrico, método de absorción de atenuación beta y método óptico basado en láser [6].

El método gravimétrico basado en filtros es el método más preciso, pero requiere un procesamiento paralelo del blanco y el filtro de muestra realizado en condiciones de laboratorio y, por lo tanto, es difícil de aplicar en el campo [7]. Los analizadores por absorción de radiación beta han pasado por estrictas evaluaciones de campo y han demostrado que pueden proporcionar medidas de concentración equivalente al método gravimétrico, con la ventaja de ser utilizable para un monitoreo continuo de partículas [8]. Finalmente, los sensores ópticos miden el tamaño de las partículas mediante la dispersión de la luz, por lo cual la concentración de partículas se puede determinar de acuerdo con la señal detectada [9], [10].

Las redes de monitoreo de la calidad del aire a menudo consisten en estaciones de medición fijas y equipadas con analizadores de atenuación beta que se mantienen bajo rigurosos regímenes operativos y de calibración para

proporcionar datos adecuados [1]. Los altos costos asociados con el establecimiento y mantenimiento de las estaciones significan que no todas las ciudades en los países en desarrollo pueden costear redes de monitoreo de suficiente cobertura espacial [11], [12]. Incluso en las grandes ciudades de los países desarrollados, las redes de monitoreo de la calidad del aire no siempre brindan información con la resolución espacial y temporal requerida para evaluar el impacto de las fuentes de contaminación [13]. Por lo tanto, en los últimos años se han utilizado sensores de bajo costo, como una alternativa para conocer el estado de la calidad del aire.

Los niveles de concentración de los contaminantes atmosféricos se desconocen en la ciudad de Pamplona, por lo tanto, en este trabajo se tuvo la iniciativa de realizar el monitoreo de la calidad del aire por $PM_{2.5}$ mediante cuatro sensores ópticos de bajo costo de la marca SENSIRION, en el periodo de julio a septiembre de 2022. Esto con el fin de crear un registro que permita la toma de decisiones o de estrategias para la implementación de una red de monitoreo con equipos certificados (gravimétricos o de atenuación beta), en conjunto con los sensores de bajo costo utilizados en este estudio exploratorio. Además del monitoreo, se realizó un análisis de la distribución temporal de los datos obtenidos por medio de series de tiempo y gráficos de tipificación, comparando las concentraciones obtenidas con los límites diarios normados de calidad del aire en Colombia (resolución 2254/2017). Para finalmente, crear mapas y observar su distribución espacial, utilizando la técnica de interpolación inversa por puntos “IDW”.

2. Metodología

2.1. Área de estudio

La ciudad de Pamplona está ubicada en la zona suroccidental del departamento del Norte de Santander con coordenadas 7.3781°N y -72.6509°E (Figura 1). La ciudad de Pamplona cuenta con una población de

180.667 habitantes, donde la mayoría participa en actividades de comercio y turismo local [14].

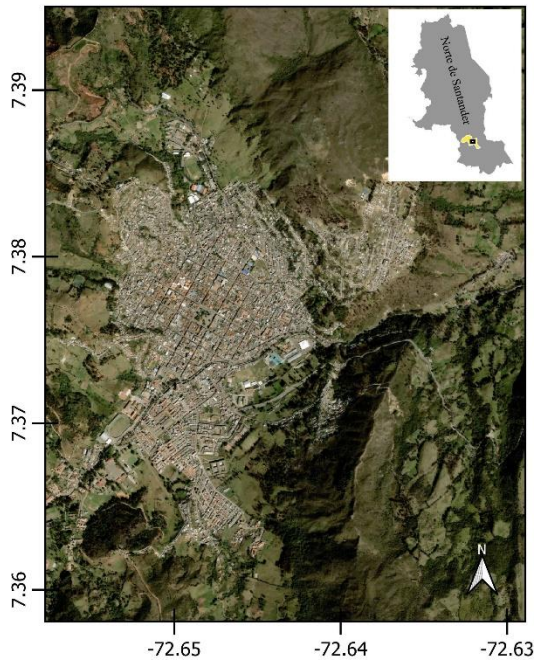


Figura 1. Ubicación de la ciudad de Pamplona.
Fuente: elaboración propia.

2.2. Selección y ubicación de sensores de bajo costo

Se seleccionaron cuatro sensores, medidores de partículas $PM_{2.5}$ de la marca SENSIRION-SPS30 (Figura 2). La selección se realizó dentro de una gama muy amplia de sensores en el mercado cuyo principio de funcionamiento es la dispersión láser, sin embargo, fueron los años de vida (10 años), la facilidad de calibración, su certificación y los diferentes tamaños de partículas que puede monitorear (10, 4, 2.5, 1 y 0.5 micrómetros) [15], consideraciones clave para su selección.

Los sensores fueron ubicados estratégicamente en la ciudad de Pamplona (Figura 3), siguiendo las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) para la instalación de redes de monitoreo de calidad del aire [16], así como, las correspondientes al protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire del Sistema de Vigilancia de la Calidad del Aire (SVCA) de Colombia [17].

Las consideraciones tomadas de la USEPA fueron:

- Las condiciones físicas de la zona.
- Accesibilidad al sitio de monitoreo.

- Facilidad para la instalación y funcionamiento.
- Disponibilidad de electricidad.
- Acceso a internet.
- Seguridad.

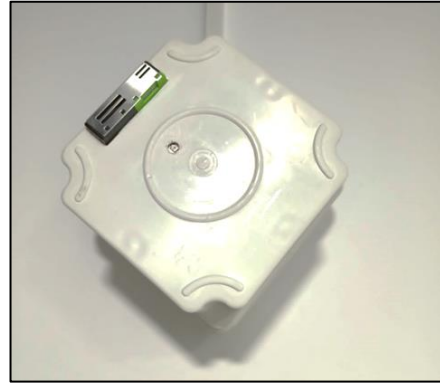


Figura 2. Sensor SENSIRION-SPS30 para partículas.
Fuente: elaboración propia.

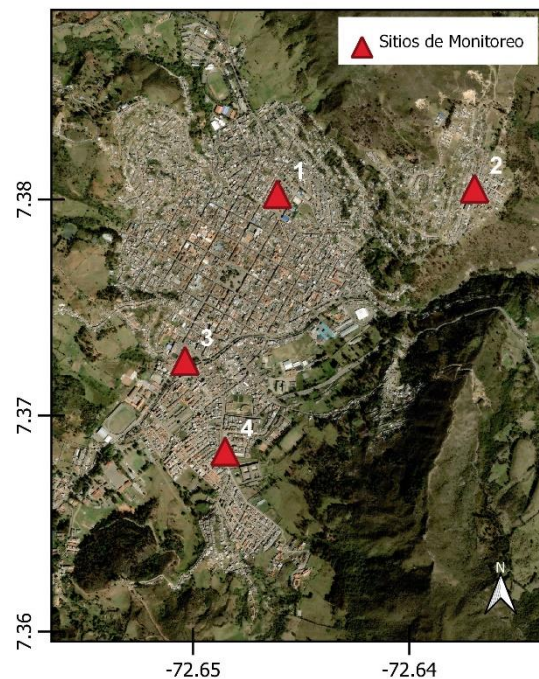


Figura 3. Ubicación de los sitios de monitoreo.
Fuente: elaboración propia.

Las consideraciones referentes al SVCA durante el funcionamiento de la red de sensores fueron:

- Observar las tendencias a mediano plazo.
- Determinar el cumplimiento de las normas.
- Adelantar investigaciones científicas.
- Determinar posibles riesgos para el ambiente.

- Estudiar potenciales fuentes de contaminación.
- Idear estrategias de prevención, minimización y control.

Además, conforme a las recomendaciones y criterios de la USEPA y del SVCA, los sitios de monitoreo se establecieron viento abajo de las potenciales fuentes de emisiones identificadas anteriormente por Monroy y colaboradores en 2021 [18] y sitios de interés para su exploración.

2.2.1. Acceso y validación de los datos

Los registros de las concentraciones de PM_{2.5} se obtuvieron de manera automática cada hora del 01 de julio al 31 de septiembre del 2022, los cuales fueron almacenados en la nube de CanAirlo “Citizen Reports” (https://canair.io/samples/first_track.html). Una vez resguardados los datos, estos fueron descargados, tratados (75 % de suficiencia) y validados (Ecuación 1), de acuerdo con los lineamientos del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT) de Colombia [19].

$$(C_{prom})_j = \frac{\sum_{i=1}^n C_i}{n}; \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

Donde, $(C_{prom})_j$ es la concentración promedio del periodo de tiempo j , $\sum_{i=1}^n C_i$ es la suma de los n datos de concentración de contaminantes i obtenido en el periodo de tiempo j , y n es la cantidad de datos obtenidos en el periodo de tiempo j .

Seguidamente, se analizaron mediante series de tiempo, gráficos de tipificación y gráficos de cajas y bigotes, para analizar su comportamiento y a su vez comparar las concentraciones diarias con los límites normados por Colombia, en conjunto, con los recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

2.2.2. Distribución espacial de las concentraciones

La información una vez validada, se utilizó para crear mapas de distribución por PM_{2.5} en la ciudad de Pamplona. Se utilizó la Ecuación 2 y 3 de interpolación, usando el asistente de técnica Inversa de la Distancia Ponderada (IDW, por sus siglas en inglés), a través de QGIS en su versión 3.24.1 [20]. Los mapas de distribución se realizaron para las concentraciones mínimas y máximas registradas de PM_{2.5}.

$$Z(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

$$\lambda_i = [d_{(x_i, x_0)}]^p / \sum_{i=1}^n [d_{(x_i, x_0)}]^p \quad (3)$$

Donde, $Z(x_0)$ es la concentración estimada de PM_{2.5} en la posición objetivo x_0 , $Z(x_i)$ son datos de PM_{2.5} a nivel de la estación de monitoreo de la muestra x_i . λ_i indica el valor de ponderación, d es la distancia euclidiana entre la ubicación del objetivo y los datos de muestra, mientras que p indica un parámetro de potencia.

3. Resultados

3.1. Análisis de los datos

Para el análisis de datos se tomaron en cuenta los registros de cada hora tomados por el sensor de bajo costo para PM_{2.5}. En la **Tabla 1**, se presenta estadística descriptiva de los datos registrados, lo cual permite una idea inicial sobre el comportamiento de las PM_{2.5} para el periodo analizado, así como identificar los días válidos para cada sitio de monitoreo.

Tabla 1. Estadística descriptiva de las concentraciones medidas durante el periodo de análisis por PM_{2.5}

Estadística	Sitio			
	1	2	3	4
Media	4.79	4.81	3.42	3.29
Error típico	0.32	0.39	0.25	0.24
Mediana	4.35	4.20	2.71	2.54
Desviación estándar	3.09	3.12	2.38	2.35
Mínimo	0.43	0.41	0.42	0.64
Máximo	14.62	14.45	12.12	11.83
No. de días validos	92	64	87	90

Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 1**, se observa que las concentraciones promedio diario estuvieron en el rango de 3-5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para todos los sitios, teniendo las máximas concentraciones horarias registradas de 14.62 y 14.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en el sitio 1 y sitio 2, respectivamente. Asimismo, se observaron las concentraciones horarias más bajas de 0.41 y 0.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el sitio 2 y 3 siguiendo el mismo orden. Por otro lado, el sitio 1 tuvo la mejor cobertura en cuanto a los días validados con un 100 %, seguido del sitio 4 con un 98 %, no obstante, el sitio 2 tuvo la una deficiencia de días validados con un 70 %, atribuyendo esta deficiencia a las fallas registradas en bitácora debido al suministro de energía.

En esta **Figura 4** se presenta un análisis de la variabilidad de los datos registrados en el periodo de tiempo evaluado.

Observando que el sitio de monitoreo 1 y 2 presentan las medias y los valores atípicos más elevados, entre los cuatro sitios de monitoreo. Estos dos sitios se encuentran al norte de la ciudad, donde se ubican varios colegios y universidades, lo cual puede ocasionar que se desarrollen mayores actividades de comercio. El sitio de monitoreo 2 se encuentra cerca de una vía principal, muy concurrida por visitantes y el transporte de productos agrícolas [18].

En cuanto a los sitios de monitoreo 3 y 4 que se encuentra hacia el sur de la ciudad de Pamplona presentan una menor influencia de actividades que involucran emisiones de PM_{2.5}.

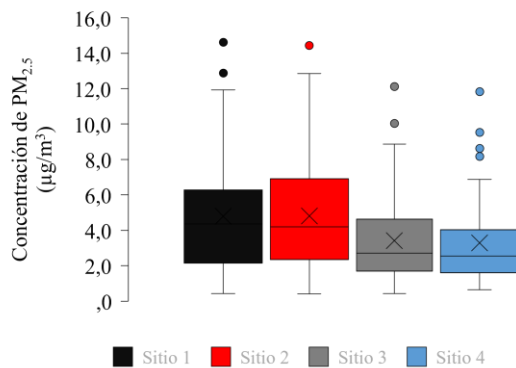


Figura 4. Variabilidad de las concentraciones horarias registradas en cada sitio de monitoreo.
Fuente: elaboración propia.

3.2. Análisis de calidad del aire por PM_{2.5}

El gráfico de serie de tiempo (Figura 5) para los cuatro sitios de monitoreo muestra el comportamiento de las PM_{2.5} en el tiempo, para comparar las concentraciones de PM_{2.5} registrada por los sensores con los límites máximos

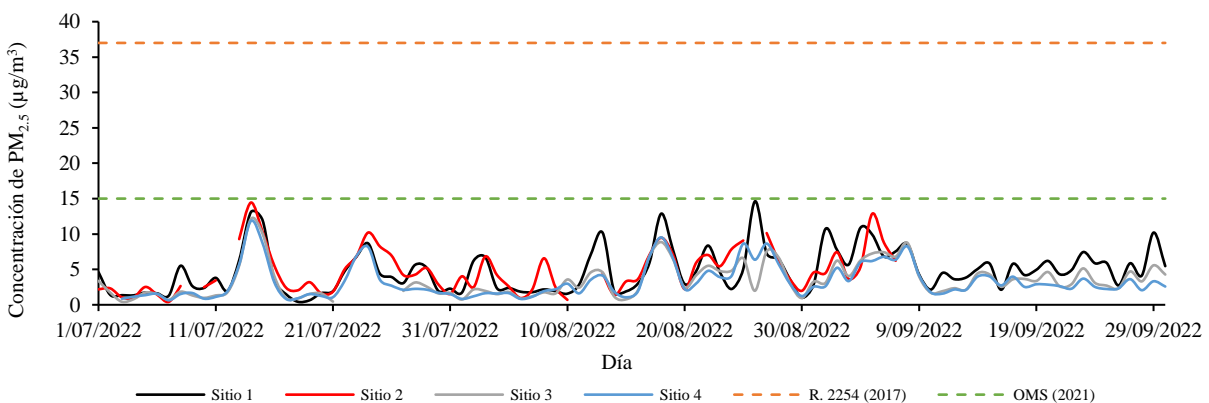


Figura 5. Distribución temporal de las concentraciones diarias por PM_{2.5}.
Fuente: elaboración propia.

permisibles de exposición en 24 horas de 37 y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, establecidos por la Resolución Colombiana 2254 en 2017 [21] y de la OMS del año 2021 [22], respectivamente.

En general, las concentraciones registradas por los sensores no superaron los límites recomendados por la autoridad ambiental del país y del organismo mundial de salud. Se observan las fluctuaciones de la concentración de PM_{2.5} a lo largo del tiempo, dentro de lo cual se destacan un pico de altas concentraciones respecto a las demás, para los cuatro sitios de monitoreo en los días del 14 y 15 de julio. También, se identificaron aumentos de concentraciones en los días a finales de agosto e inicios de septiembre. Esto podría corresponder a las fechas de celebración del día de la independencia de Colombia (20 de julio) en la cual durante la semana previa se realizan actividades que pueden aumentar el nivel de las partículas en el aire como los fuegos artificiales [23].

Por otra parte, la ciudad de Pamplona cuenta con un número considerable de la población estudiantil provenientes de otras ciudades [14], por lo cual, normalmente regresan a sus ciudades de origen en el periodo de vacaciones hasta iniciar el semestre académico de su universidad. Por lo tanto, los aumentos de concentración a finales de agosto e inicios de septiembre posiblemente se atribuyen a la llegada de los estudiantes a cursar sus estudios, que pueden generar una mayor cantidad de emisiones por la demanda en el transporte público principalmente [18].

El comportamiento de la concentración de las PM_{2.5} registradas en los cuatro sitios pareciera ser similar a lo largo del tiempo, no obstante, a través de los gráficos de tipificación (Figura 6) se logró observar que para el sitio 1 y 2 su distribución normal con respecto al promedio diario varía en su mayoría para los días analizados.

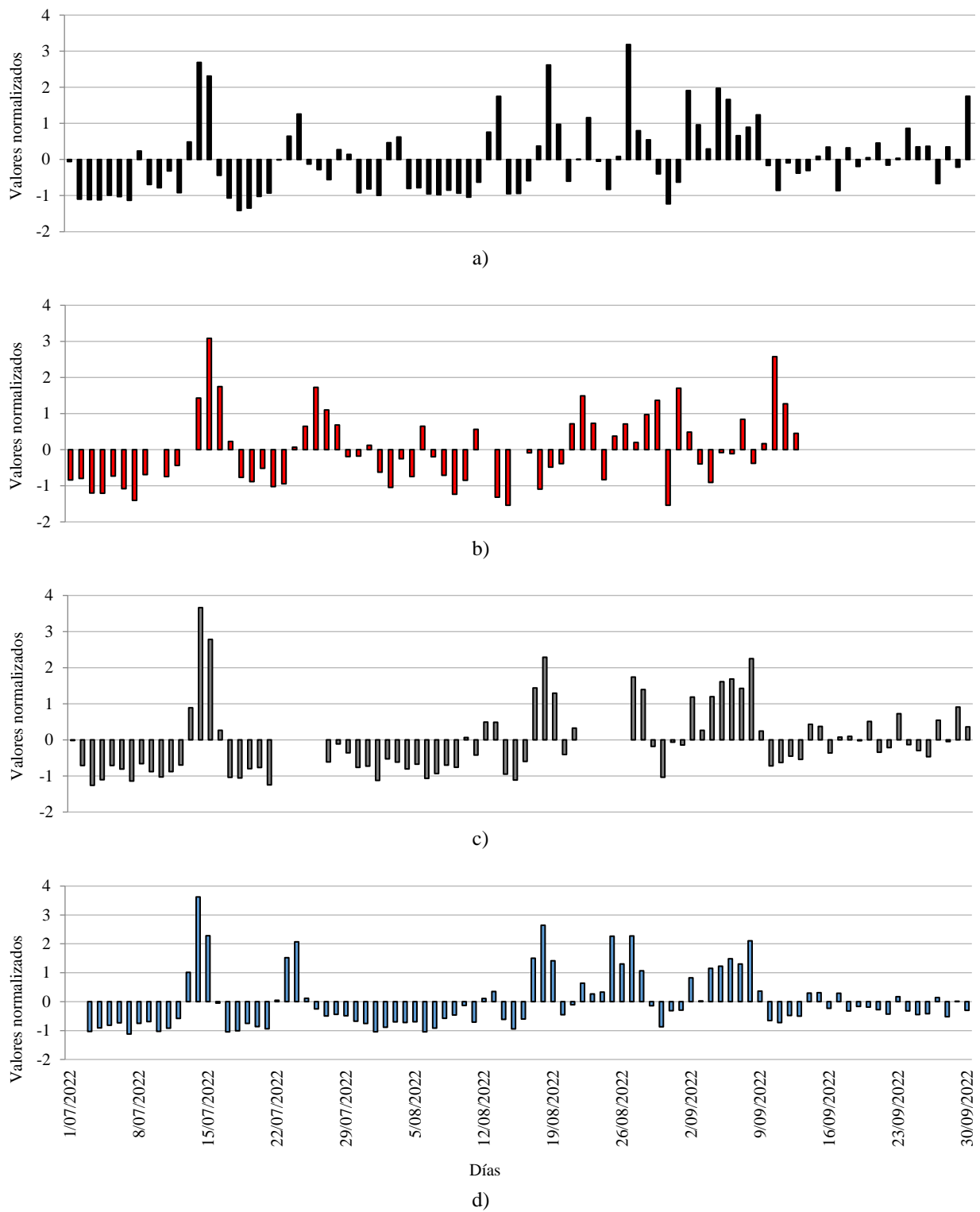


Figura 6. Tipificación para el promedio diario de concentración de PM_{2.5}; a) Sitio 1, b) Sitio 2, c) Sitio 3, d) Sitio 4. Fuente: elaboración propia.

Sin embargo, para los sitios 3 y 4 se puede observar una similitud muy marcada en su distribución, atribuyéndose este comportamiento inicialmente a su cercanía entre los sitios, en segundo lugar, a la posible influencia de las mismas fuentes de emisión que impactan a los sensores de bajo costo y por último a la meteorología del sitio.

3.3. Comportamiento espacial de las PM_{2.5}

Como parte del análisis espacial del comportamiento de las PM_{2.5}, se elaboraron mapas de concentraciones máximas y mínimas en la ciudad de Pamplona para el periodo evaluado (Figura 7). En la Figura 7a, se observa que las concentraciones máximas para el periodo de estudio se presentaron mayormente en la zona norte de la ciudad, especialmente en el sitio 2 que se ubica cerca de la Universidad de Pamplona y la vía primaria de automóviles. Mientras que, en la Figura 7b se observaron las concentraciones mínimas en el sitio 2, sin embargo, los sitios 3 y 4 presentaron datos similares por lo que la distribución de las PM_{2.5} en gran parte de la ciudad fue similar con una concentración mínima entre 0.59 y 0.76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La dirección y velocidad del viento son importantes para estudios en calidad del aire [24]. En la Figura 8, se muestran las rosas de viento para el periodo monitoreado, observando para julio vientos provenientes mayormente del componente este (E) y este-noreste (ENE) con una

frecuencia del 35 y 32 % en julio; 25 y 32 % en agosto; 18 y 22 % en septiembre, respectivamente.

Las rosas de viento indican que las principales fuentes de emisión de PM_{2.5} fueron aquellas provenientes del noreste de la ciudad de Pamplona, donde existe una mayor actividad de tráfico vehicular [18] y actividad estudiantil. Ante lo anterior, se respaldan los resultados obtenidos para los sitios de monitoreo, donde el sitio 1 y 2 ubicados al norte de la ciudad obtuvieron los niveles más altos de concentración.

Esto congruente con el estudio realizado por [25], en el cual se instalaron sensores de bajo costo para medir PM_{2.5} cerca una escuela en una ciudad no industrializada. En este trabajo los sensores permitieron confirmar los bajos niveles de concentración de partículas finas y la influencia del tráfico vehicular como fuente importante de las emisiones de PM_{2.5} en la localidad.

Así mismo, se ha reportado la contribución de los parámetros meteorológicos y el uso de sensores en el análisis de la variación espacial de los contaminantes atmosféricos. En el trabajo de [26], se elaboraron rosas de vientos para analizar las concentraciones de PM_{2.5} medidas a partir de sensores, con lo cual encontraron que los sitios de medición se ven afectados por concentraciones más altas cuando los vientos se originan en dirección de fuentes de emisión conocidas.

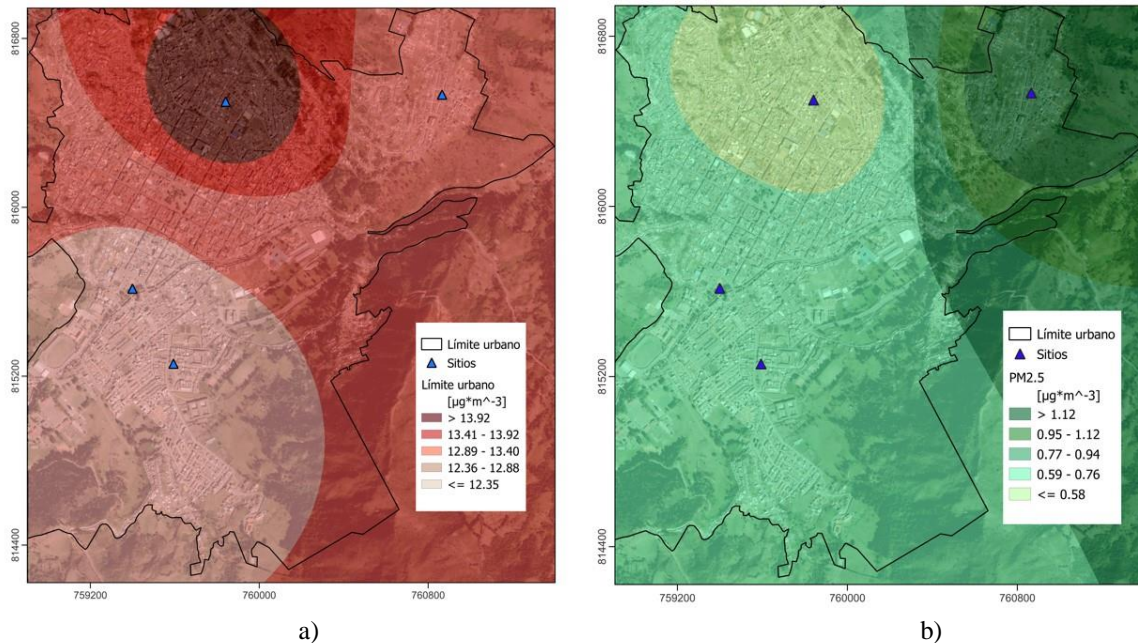


Figura 7. Mapa de concentraciones por PM_{2.5} en la ciudad de Pamplona; a) máximas, b) mínimas.

Fuente: elaboración propia.

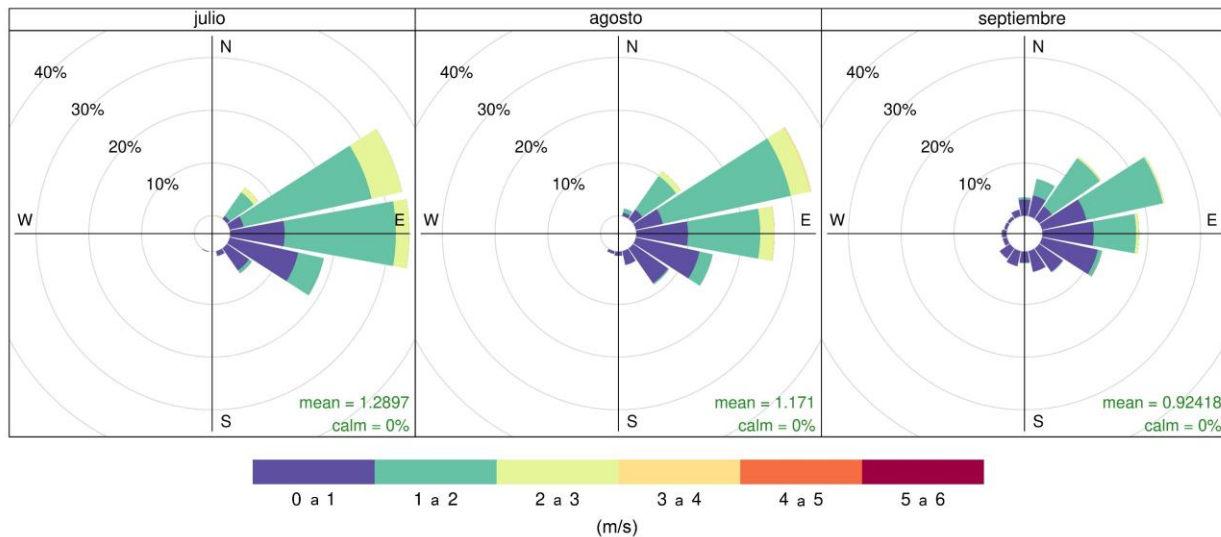


Figura 8. Rosa de vientos para la ciudad de pamplona de julio a septiembre de 2022.
Fuente: elaboración propia, mediante datos de reanálisis [27].

4. Conclusiones

El uso de los sensores de bajo costo para la calidad del aire permitió obtener un indicativo de las concentraciones de $PM_{2.5}$ a los que están expuestos los pobladores de la ciudad de Pamplona. La instalación de los sitios de monitoreo de $PM_{2.5}$ ha generado información de acceso abierto sobre las concentraciones, en una base de datos disponible en la web de acceso público, que está en constante crecimiento y permite el seguimiento de la contaminación del aire a lo largo del tiempo.

Se resalta que el modelo de interpolación por puntos *IDW* utilizado en los mapeos calcula las estimaciones a partir de observaciones de las estaciones de monitoreo, que para este caso son los sensores de bajo costo, y dieron como resultado una representación fluida e indicativa del posible estado de calidad del aire sobre la concentración de $PM_{2.5}$.

En general, se encontró que la ciudad de Pamplona no presenta niveles que superen la normatividad colombiana vigente, sin embargo, se apreció un aumento de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en la zona norte de la ciudad, lo cual se relaciona con la influencia de las actividades de comercio por la concentración de instituciones educativas en el área y del transporte en la vía principal.

Se recomienda seguir con el monitoreo de $PM_{2.5}$ por medio de sensores de bajo costo e incluir sensores para la medición PM_{10} y otros contaminantes atmosféricos regulados en Colombia. Además, realizar un inventario de emisiones completo, para la ciudad de Pamplona y

comunidades aledañas. También, Comparar las concentraciones medidas por los sensores, con obtenidas a través de modelos de calidad del aire, y monitorear parámetros meteorológicos para poder identificar las potenciales fuentes de emisión en la ciudad de Pamplona.

Financiación

No aplica.

Contribuciones de los autores

C. A. Bonilla-Granados: Conceptualización, Administración del proyecto; Recursos; Supervisión; Investigación; Redacción: revisión y edición. A. Y. Sánchez-Delgado: Administración del proyecto; supervisión; Investigación. Y. M. Rubio-Gómez: Curación de datos; Análisis formal; metodología; Investigación; Software; Escritura – borrador original. M. Cortez-Huerta: Análisis formal; Investigación; Software; Validación; Visualización; Escritura – borrador original.

Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional

No aplica.

Declaración de consentimiento informado

No aplica.

Referencias

- [1] S. Lopez-Restrepo, A. Yarce, N. Pinel, O. L. Quintero, A. Segers, A. W. Heemink, “Urban Air Quality Modeling Using Low-Cost Sensor Network and Data Assimilation in the Aburrá Valley, Colombia,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 12, no. 1, p. 91, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/atmos12010091>
- [2] H.-Y. Liu et al., “Respiratory Disease in Relation to Outdoor Air Pollution in Kanpur, India,” *Arch. Environ. Occup. Health*, vol. 68, no. 4, pp. 204–217, 2013, doi: <https://doi.org/10.1080/19338244.2012.701246>
- [3] H.-Y. Liu, D. Dunea, S. Iordache, A. Pohoata, “A Review of Airborne Particulate Matter Effects on Young Children’s Respiratory Symptoms and Diseases,” *Atmosphere (Basel)*, vol. 9, no. 4, p. 150, 2018, doi: <https://doi.org/10.3390/atmos9040150>
- [4] OMS, “Calidad del aire ambiente (exterior),” 2021. [https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/factsheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [5] R. Meléndez, S. N. Bolívar, R. Rojano, “Imputación de valores perdidos y detección de valores atípicos en datos funcionales: una aplicación con datos de PM₁₀,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 19, no. 2, pp. 1–10, 2020, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v19n2-2020001>
- [6] X. Su, L. Sutarlie, X. J. Loh, “Sensors and Analytical Technologies for Air Quality: Particulate Matters and Bioaerosols,” *Chem. – An Asian J.*, vol. 15, no. 24, pp. 4241–4255, 2020, doi: <https://doi.org/10.1002/asia.202001051>
- [7] T.-C. Le et al., “On the concentration differences between PM_{2.5} FEM monitors and FRM samplers,” *Atmos. Environ.*, vol. 222, p. 117138, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.117138>
- [8] A. Masic, D. Bibic, B. Pikula, A. Blazevic, J. Huremovic, S. Zero, “Evaluation of optical particulate matter sensors under realistic conditions of strong and mild urban pollution,” *Atmos. Meas. Tech.*, vol. 13, no. 12, pp. 6427–6443, 2020, doi: <https://doi.org/10.5194/amt-13-6427-2020>
- [9] L. Bai et al., “Long-term field Evaluation of Low-cost Particulate Matter Sensors in Nanjing,” *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 20, no. 2, pp. 242–253, 2020, doi: <https://doi.org/10.4209/aaqr.2018.11.0424>
- [10] M. Tagle et al., “Field performance of a low-cost sensor in the monitoring of particulate matter in Santiago, Chile,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 192, no. 3, p. 171, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-020-8118-4>
- [11] A. Kumar and B. R. Gurjar, “Low-Cost Sensors for Air Quality Monitoring in Developing Countries – A Critical View,” *Asian J. Water, Environ. Pollut.*, vol. 16, no. 2, pp. 65–70, 2019, doi: <https://doi.org/10.3233/AJW190021>
- [12] V. M. Alvarez Narvaez, E. Quiñones Bolaños, M. E. Huertas Bolaños, C. A. Suárez, J. Berdugo Arrieta, D. Ramirez Rivas, “Metodología para la selección de sitios de monitoreo atmosférico en zonas urbanas afectada por las emisiones de fuentes móviles,” *Rev. UIS Ing.*, vol. 15, no. 2, pp. 73–84, 2017, doi: <https://doi.org/10.18273/revuin.v15n2-2016006>
- [13] F. Ahangar, F. Freedman, A. Venkatram, “Using Low-Cost Air Quality Sensor Networks to Improve the Spatial and Temporal Resolution of Concentration Maps,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 16, no. 7, p. 1252, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph16071252>
- [14] GOV, “Identificación del municipio: Pamplona.” <https://www.pamplona-nortedesantander.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>
- [15] Newark An Avnet Company, “Sensor de Partículas Sensirion - SPS30,” 2018. <https://mexico.newark.com/sensirion/sps30/particulate-sensor-dust-0-5um/dp/71AC4577?ICID=I-RP-STM7REC-0>
- [16] USEPA, “A Guide to Siting and Installing Air Sensors,” 2022. <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/guide-siting-and-installing-air-sensors>
- [17] MAVDT, “Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire.” 2010. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf

- [18] P. A. Monroy, J. C. R. Vargas, E. G. Gonzalez, "Preparation of the emissions inventory and modeling of the dispersion of criteria pollutants from mobile sources in the municipality of Pamplona, Norte de Santander," in 2021 *Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad de Aire y Salud Pública (CASAP)*, 2021, pp. 1–4. doi: <https://doi.org/10.1109/CASAP54985.2021.9703393>
- [19] MAVDT, "Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire" Bogotá, 2008.
- [20] E. A. Roberts, R. L. Sheley, R. L. Lawrence, "Using sampling and inverse distance weighted modeling for mapping invasive plants," *West. North Am. Nat.*, vol. 64, pp. 312–323, 2004.
- [21] MADS, "Norma de calidad del aire ambiente - Resolución 2254 de 2017." 2017. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resolución+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f#:~:text=La presente resolución establece la,a los contaminantes en la>
- [22] WHO, "WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide." 2021. [Online]. Available: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [23] C. Manchanda et al., "Chemical speciation and source apportionment of ambient PM_{2.5} in New Delhi before, during, and after the Diwali fireworks," *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 13, no. 6, p. 101428, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101428>
- [24] R. R. Behera, D. R. Satapathy, A. Majhi, and C. R. Panda, "Spatiotemporal variation of atmospheric pollution and its plausible sources in an industrial populated city, Bay of Bengal, Paradip, India," *Urban Clim.*, vol. 37, p. 100860, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100860>
- [25] C. Falzone, J. Muller, A.-C. Romain, "Influence of the Lockdown on PM_{2.5} Concentrations around an Urban School in the South of Belgium," *Atmosphere (Basel)*, vol. 12, no. 10, p. 1333, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/atmos12101333>
- [26] S. Kimbrough et al., "The Kansas City Transportation and Local-Scale Air Quality Study (KC-TRAQS): Integration of Low-Cost Sensors and Reference Grade Monitoring in a Complex Metropolitan Area. Part 1: Overview of the Project," *Chemosensors*, vol. 7, no. 2, p. 26, 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/chemosensors7020026>
- [27] European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, "ERA5 Reanalysis (0.25 Degree Latitude-Longitude Grid)." Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder CO, 2019, doi: <https://doi.org/10.5065/BH6N-5N20>