

Aplicabilidad de sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa para medir material particulado en calidad del aire

Applicability of low-cost electrochemical sensors as an alternative to measure particulate matter in air quality

Yeimer Darian León Salas¹ , José Alejandro Murad Pedraza¹  

¹Facultad de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia

RESUMEN

El presente estudio evaluó la aplicabilidad de los sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa para medir el material particulado $PM_{2.5}$ al determinar la calidad del aire. El estudio se desarrolló en dos fases: la primera con el objetivo de exponer la descripción y la operación del equipo certificado (Teledyne T640) y los sensores electroquímicos de bajo costo (Plantower PMS7003, Plantower PMSA003, Honeywell HPM115S0, Sensirion SPS30 y Panasonic SN-GCJA5), y la segunda se enfocó en especificar el sitio y las fechas de medición del equipo certificado y los sensores, así como también presentar los detalles de la organización de los datos obtenidos y validados para su posterior análisis con diferentes herramientas de estadística descriptiva. De los cinco sensores estudiados, el de mayor correlación con el equipo certificado fue el Sensirion SPS30, pues se obtuvieron valores para las series de tiempo diaria de 71.01 % y horaria 76.94 % en la medición de $PM_{2.5}$. Los demás sensores presentaron un coeficiente de correlación cercano, a excepción del HMPA115S0 en la temporalidad horaria, con un valor r de 0.7381, y el PMS7003, con r de 0.6950. De manera general, los valores de cada r tuvieron una correlación fuerte, sin embargo, los valores de r^2 no resultaron tan apropiados, lo que indica que el modelo de regresión lineal no se ajusta al conjunto de datos reportados por el equipo T640. Por tanto, se considera que los sensores de bajo costo, debido a su comportamiento de variabilidad con respecto al equipo certificado, pueden llegar a ser útiles para identificar tendencias generales de contaminación atmosférica y servir como medidores indicativos en redes ciudadanas de monitoreo.

PALABRAS CLAVE: contaminación atmosférica; salud pública; parámetro; estadística; meteorología.

ABSTRACT

The present study evaluated the applicability of low-cost electrochemical sensors as an alternative to measure $PM_{2.5}$ particulate matter when determining air quality. The study was developed in two phases: the first with the objective of exposing the description and operation of the certified equipment (Teledyne T640) and the low-cost electrochemical sensors (Plantower PMS7003, Plantower PMSA003, Honeywell HPM115S0, Sensirion SPS30 and Panasonic SN-GCJA5), and the second focused on specifying the site and measurement dates of the certified equipment and sensors, as well as presenting the details of the organization of the data obtained and validated for subsequent analysis with different descriptive statistics tools. Of the five sensors studied, the one with the highest correlation with the certified equipment was the Sensirion SPS30, since values were obtained for the daily time series of 71.01% and 76.94% hourly for the measurement of $PM_{2.5}$. The other sensors presented a close correlation coefficient, except for the HMPA115S0 in the time temporality, with an r value of 0.7381, and the PMS7003, with r of 0.6950. In general, the values of each r had a strong correlation, however, the values of r^2 were not as appropriate, indicating that the linear regression model does not fit the data set reported by the T640 device. Therefore, it is considered that low-cost sensors, due to their variability behavior with respect to certified equipment, can be useful to identify general trends in atmospheric pollution and serve as indicative meters in citizen monitoring networks.

KEYWORDS: atmospheric pollution; public health; parameters; statistics; meteorology.

Correspondencia:

DESTINATARIO: José Alejandro Murad Pedraza
INSTITUCIÓN: Universidad Distrital Francisco José de Caldas
DIRECCIÓN: Calle 13 #31 - 75, Bogotá D. C., Colombia
CORREO ELECTRÓNICO: jamuradp@udistrital.edu.co

Fecha de recepción: 4 de octubre de 2024. **Fecha de aceptación:** 25 de abril de 2024. **Fecha de publicación:** 30 de abril de 2024.



I. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es uno de los grandes problemas ambientales que afecta en gran medida la salud de las poblaciones de manera indirecta, a causa de los fenómenos meteorológicos, y directa, actuando por medio de fuentes de contaminantes, entre ellas los vehículos, los procesos industriales, el humo del tabaco, las estufas y cocinas de gas y la combustión en interiores, y estas, a su vez, liberan cantidades enormes y crecientes de partículas en suspensión y respirables (PM_{10} , $PM_{2.5}$, etc.), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2), compuestos orgánicos volátiles (COV) y monóxido de carbono (CO) [1].

Según estudios epidemiológicos de Romero *et al.* [2] y Rosales *et al.* [3], la exposición a contaminantes atmosféricos se asocia con incrementos en la incidencia del asma, severidad en el deterioro de la función pulmonar e incluso con mayor gravedad de las enfermedades respiratorias en adolescentes e infantes. Esto se agrava cada vez más debido al aumento de la urbanización, el congestionamiento vehicular y los altos costos de las medidas de control.

Las partículas de fracción fina respirable $PM_{2.5}$, que se encuentran dentro de las de PM_{10} , agrupa a aquellas que son generalmente ácidas y que contienen hollín y otros derivados de las emisiones vehiculares e industriales. Tal fracción es la más pequeña y agresiva debido a que es respirable en un 100 % y tiene mayor efecto en la salud, ya que puede ingresar al sistema respiratorio, se deposita en los alvéolos pulmonares y de esta forma llega al torrente sanguíneo, produciendo efectos perjudiciales en este, tales como bronquitis, enfisema, cáncer pulmonar y disminución del funcionamiento pulmonar, entre otros [4].

Para identificar las problemáticas ambientales y de salud en la población, es necesario contar con redes de monitoreo que permitan conocer el estado de la calidad del aire en determinados sitios. Sin embargo, la tarea de la medición no es sencilla porque a pesar de que las redes de monitoreo de las grandes ciudades son efectivas, estas no cubren en su totalidad las áreas para caracterizar de manera adecuada la exposición de los ciudadanos a los contaminantes, esto a causa de su baja resolución espacio-temporal y al alto número de datos ausentes [5], [6], [7].

Para el mejoramiento de las redes de monitoreo de calidad del aire se han venido implementando sensores electroquímicos de bajo costo [6], [8], [9] que emplean diferentes tipos de principios de medición, los cuales están relacionados con su objetivo, el número de contaminantes a medir y el tipo de sistema tecnológico de vigilancia implementado, como automático, semiautomático, manual o híbrido [10].

Los monitores portátiles de bajo costo destacan como complemento de las redes existentes en regiones desarrolladas en lo referente a la industrialización, con el fin de aumentar la densidad de sitios y datos [6]. Adicionalmente, en el estudio de Castell *et al.* [5] la aparición de plataformas de contaminación del aire de bajo costo genera observaciones de alta resolución espacial, casi en tiempo real, y brinda nuevas oportunidades para mejorar simultáneamente los sistemas de monitoreo existentes, así como para involucrar a los ciudadanos en el monitoreo ambiental activo.

En un estudio de Wang *et al.* [11] se evaluaron tres sensores de partículas de bajo costo basados en la dispersión de la luz (Shinyei PPD42NS, Samyoung DSM501A y Sharp GP2Y1010AU0F) por medio de métodos de calibración adaptados a las recomendaciones del taller de sensores de aire de la Environmental Protection Agency (EPA) [12]. Tales dispositivos presentaron alta linealidad frente a las concentraciones medidas por el equipo de referencia SidePak, con valores de r^2 superiores a 0.89 en el rango de concentración de partículas de 0 a 1000 $\mu g/m^3$. Adicionalmente, se encontró que las salidas de los sensores dependían en gran medida de la composición y el tamaño de las partículas y que la humedad afectó la respuesta del sensor.

Por otro lado, Johnson *et al.* [13] evaluaron una serie de sensores de partículas (Shinyei: modelos PPD42NS, PPD20V, PPD60PV) en una variedad de condiciones ambientales y ubicaciones, incluidos el fondo urbano y los sitios al borde de la carretera en Atlanta, Estados Unidos, e Hyderabad, India. Las mediciones de los sensores se compararon con las mostradas por equipos de referencia, encontrando, entre otros resultados, que los dispositivos PPD20V tuvieron la correlación más alta con el monitor de atenuación beta equivalente, con valores de r^2 por encima de 0.80 en la ciudad india. Asimismo, Castell *et al.* [5] examinaron los resultados de una red de bajo costo que mide el ozono a nivel del suelo, determinando que las redes densas de sensores de

bajo costo pueden agregar valor a las redes existentes, con un impacto mínimo en la calidad general del conjunto de datos.

En el presente estudio se evaluó la aplicabilidad de los sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa para medir el material particulado en la calidad del aire para el caso de $PM_{2.5}$, verificando su información precisa y confiable por medio de un análisis técnico y comparativo con un equipo certificado aprobado por la EPA: el Teledyne Advanced Pollution Instrumentation Model T640 PM Mass Monitor (EQPM-0516-236).

II. METODOLOGÍA

FASE 1. DESCRIPCIÓN Y OPERACIÓN DE LOS EQUIPOS DE MONITOREO

Esta fase abarca el estudio de las características técnicas y los principios de operación del equipo certificado empleado en la investigación y los cinco sensores electroquímicos de bajo costo utilizados para medir la concentración de $PM_{2.5}$, los cuales fueron facilitados por el Observatorio Ciudadano de Calidad del Aire (CanAir.io).

Cabe mencionar que, para la recolección de información, fue necesario el uso de los conceptos emitidos por organizaciones con autoridad en el campo de la medición de la contaminación atmosférica, p. ej., MADS, IDEAM y EPA [10], [20], [21], así como las fichas técnicas obtenidas por los desarrolladores del equipo de referencia y sensores empleados [14], [15], [16], [17], [18], [19].

FASE 2. MONITOREO $PM_{2.5}$: EQUIPO CERTIFICADO VS. SENSORES ELECTROQUÍMICOS

Se consideraron diferentes acciones con el fin de comparar los resultados del monitoreo de la concentración del $PM_{2.5}$, con base en el uso del equipo certificado y de los cinco sensores ya mencionados. En la sede Aduanilla de Paiba de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia, se instalaron los sensores electroquímicos de bajo costo y el equipo certificado (Figura 1). La medición se llevó a cabo de noviembre de 2020 a marzo de 2021.

La información obtenida fue validada, organizada (en series de tiempo horarias y diarias) y agrupada para su posterior análisis, con base al Manual de Operación de Sistema de Vigilancia para la Calidad del Aire [10].



Figura 1. Disposición del equipo certificado y sensores de bajo costo.

Adicionalmente, la depuración de los datos se realizó en consideración a lo señalado en las fichas técnicas de los sensores de bajo costo, teniendo en cuenta el rango de humedad de su óptimo funcionamiento (0-90 %). Las diferentes características de medición se presentan en la [Tabla 1](#).

Después de la depuración respectiva, se obtuvo un total de 2388 datos horarios y 95 diarios válidos, los cuales se distribuyeron durante cinco meses de la siguiente manera: noviembre 2020 (25.3 %), diciembre 2020 (32.6 %), enero 2021 (5.3 %), febrero 2021 (12.6 %) y marzo 2021 (24.2 %).

Para el correspondiente análisis de la información se consideraron los aspectos siguientes:

- Con ayuda de herramientas de estadística descriptiva se realizó la descripción de los datos útiles obtenidos por el equipo certificado y los sensores.
- Relación estadística entre las concentraciones (datos de los sensores y del equipo de equivalente). Esta se representó de manera gráfica (diagrama de dispersión) y numérica (coeficiente de determinación).
- El análisis del error. Este se expuso con base en la relación de a) la temperatura y la humedad relativa y b) el error (concentración reportada por el sensor menos la indicada por el equipo equivalente). Adicionalmente, se realizó un acercamiento a la incidencia de la temperatura y humedad sobre la relación estadística estudiada en el segundo aspecto. Para el análisis estadístico del caso se utilizó el software Microsoft Excel.

TABLA 1
CARACTERÍSTICAS DE LA MEDICIÓN

| CARACTERÍSTICAS | TELEDYNE T640 | PLANTOWER PMS7003 | PLANTOWER PMSA003 | HONEYWELL HMPA115S0 | SENSIRION SPS30 | PANASONIC SN-GCJA5 |
|------------------------|---|--|---|---|--|--|
| Descripción | Su funcionamiento se basa en la espectroscopia de banda ancha con dispersión de luz blanca. Opera a una tasa de flujo volumétrico de 5.0 litros/min | Recoge y calcula continuamente el número de partículas suspendidas en el aire en un volumen unitario | Recoge la luz de dispersión en un cierto grado y se obtiene la curva de dispersión de cambio de luz con el tiempo | Detecta y cuenta las partículas haciendo uso de la dispersión de la luz | El principio de medición se basa en la dispersión láser y hace uso de la innovadora tecnología de resistencia a la contaminación | Se encuentra integrado por un microprocesador, un microventilador, un diodo láser (LD) y un fotodiodo (PD) |
| Principios de medición | Espectroscopia de banda ancha combinada con dispersión de luz blanca | Dispersión láser | Dispersión láser | Dispersión láser | Dispersión láser | Dispersión láser |
| Tiempo | 10 s - 48 h | < 1 s | < 1 s | < 6 s | 1 s | 1 s |
| Precisión | ±0.5 µg/m ³ (1 h) | ±10 µg/m ³ ±10 % | ±10 µg/m ³ ±10 % | ±15 µg/m ³ ±15 % | ±10 µg/m ³ ±10 % | ±10 % (35-1000 µg/m ³) |
| Rango | 0.1-10 000 µg/m ³ | 0-500 µg/m ³ | 0-500 µg/m ³ | 0-1000 µg/m ³ | 0-1000 µg/m ³ | 0-1000 µg/m ³ |
| Resolución | 0.1 µg/m ³ | 0.1 µg/m ³ | 0.1 µg/m ³ | 0.1 µg/m ³ | 0.1 µg/m ³ | 0.1 µg/m ³ |

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presenta una descripción de los datos empleados tanto para series de tiempo diarias como para las horarias. En el primer tiempo de exposición se llegó a 2387 datos válidos, lo que representa el 90.42 % de un total de 2640, mientras que, horariamente, para noviembre 2020 fue de 88.75 %, diciembre 2020 de 98.52 %, enero 2021 de 88.88 %, febrero 2020 de 83.61 % y marzo 2021 de 87.20 %, todos superiores al 75 %, tal como lo determina la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. Adicionalmente, se exponen las similitudes del comportamiento de la información proporcionada por los sensores con respecto al equipo equivalente.

ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MONITOREO DE PM_{2.5}

Descripción estadística de los datos

1. Concentraciones diarias PM_{2.5}

La [Figura 2](#) presenta la tendencia de las concentraciones diarias obtenidas del cálculo del promedio de los valores reportados durante cada uno de los días monitoreados entre las 01:00 y las 24:00 horas, en el transcurso del periodo de medición del presente estudio.

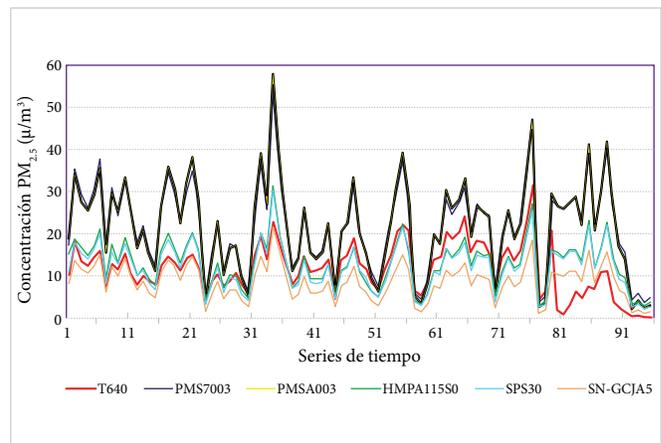


Figura 2. Tendencia de las concentraciones diarias PM_{2.5}.

Los promedios diarios obtenidos por el equipo certificado y los sensores electroquímicos presentaron comportamientos similares, en los que coincidieron los picos y las crestas en varios momentos.

Los sensores de marca Plantower (PMS7003 y PMSA003) tienden a sobrestimar los valores de referencia de manera relevante, exponiendo concentraciones por encima del 91 % al 95 % de los datos obtenidos, donde el mayor porcentaje se encuentra entre 5 a 10 µg/m³ con el 31 y 26 %, hasta un máximo superior a los 25 µg/m³ en 3 de los 95 días evaluados.

Los sensores Honeywell HMPA115S0 presentaron un equilibrio en el número de datos para ambas situaciones, sin embargo, en la sobrestimación llega a 15.19 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y en la subestimación hasta los 4.81 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En ambos casos, la mayor distribución está entre los 0 y 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con el 31 % y 52 %, respectivamente. En cuanto al Sensirion SPS30 y al Panasonic SN-GCJA5, estos tienden a subestimar las concentraciones reportadas en un 45 % y 82 % con respecto a la medición realizada con el T640. Los rangos de mayor número de datos está entre 0 y 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con el 53 % y 57 % de datos válidos. La fecha en la que en los sensores de bajo costo PMSA003, SPS30

y SN-GCJA5 se presentaron concentraciones con el menor de los promedios diarios (Tabla 2), coincide con la misma en la cual el equipo certificado reportó los datos con la menor media. Lo anterior no sucedió con los valores máximos de concentración diaria, donde ninguno de los valores mayores derivados de la medición llevada a cabo por los sensores electroquímicos, concordó con el día en que el equipo certificado reportó las concentraciones con la media máxima, siendo los sensores de marca Plantower (PMS7003 y PMSA003) los que presentaron una desviación significativa en comparación de los demás dispositivos.

TABLA 2
VARIABILIDAD DE LAS CONCENTRACIONES DIARIAS

| VARIABLES ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | TELEDYNE T640 | PLANTOWER PMS7003 | REF - PMS7003 | PLANTOWER PMSA003 | REF - PMSA003 | HONEYWELL HMPA115S0 | REF - HMPA115S0 | SENSIRION SPS30 | REF - SPS30 | PANASONIC SN-GCJA5 | REF - SN-GCJA5 |
|--|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------------|--------------------|----------------|
| Mínimo | 0.31 | 3.63 | -3.32* | 2.14 | -1.84 | 2.87 | -2.56 | 2.25 | -1.94 | 1.04 | -0.73 |
| Fecha | 30/03/2021 | 7/03/2021 | - | 30/03/2021 | - | 7/03/2021 | - | 30/03/2021 | - | 30/03/2021 | - |
| Máximo | 31.74 | 54.79 | -23.05 | 58.48 | -26.74 | 31.98 | -0.24 | 30.48 | 1.26 | 22.38 | 9.36 |
| Fecha | 6/03/2021 | 10/12/2020 | - | 10/12/2020 | - | 10/12/2020 | - | 10/12/2020 | - | 10/12/2020 | - |
| Promedio | 11.78 | 22.08 | -10.30 | 22.05 | -10.27 | 13.00 | -1.21 | 12.29 | -0.51 | 8.77 | 3.01 |

*Los valores negativos hacen referencia a la diferencia entre el equipo certificado y los sensores electroquímicos empleados en la investigación.

La Figura 3 expone los diagramas de caja (*boxplot*) para las concentraciones diarias del equipo certificado T640 y de cada uno de los sensores electroquímicos de bajo costo, así como los valores máximos y mínimos, el rango de las concentraciones diarias, los cuartiles inferior y superior, el rango intercuartil, la mediana de los datos, los valores atípicos detectados y la media.

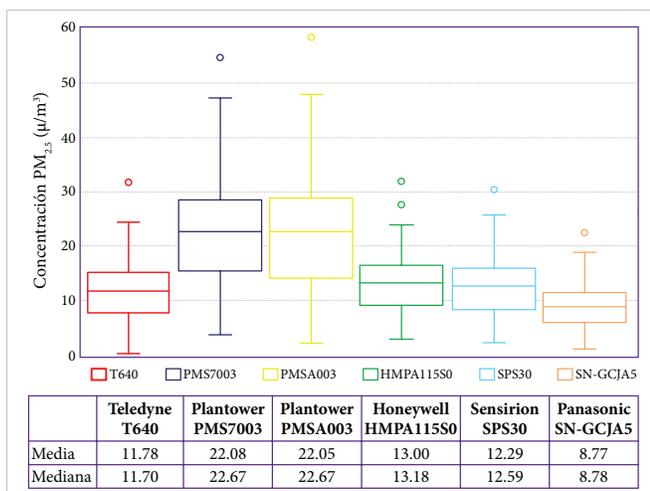


Figura 3. Diagramas de caja de concentraciones diarias.

Con base en el anterior diagrama, se puede observar que los sensores de marca Plantower presentaron

una variabilidad similar entre sí, pero muy distinta a la del equipo equivalente. De hecho, el Cuartil 1 (Q1) del PMS7003 y PMSA003 fue de 15.40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ frente al Cuartil 3 (Q3) del T640 de 15.14 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a diferencia de los sensores SPS30, HMPA115S0 y SN-GCJA5 que expresaron mejor similitud con respecto al equipo T640.

En cuanto a los valores de concentración del equipo certificado, se presentó Q1, la mediana y Q3 con datos de 7.8, 11.7 y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, mientras que el equipo SPS30 mostró valores de 8.3, 12.5 y 15.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que no resultaron significativamente alejados y, además, comparando la media del equipo certificado de 11.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ con los sensores, fueron más cercanos los valores de 12.29, 13.00 y 8.77 para SPS30, HMPA115S0 y SN-GCJA5. En este caso, tanto el equipo certificado como los sensores de bajo costo no revelaron valores atípicos por debajo del límite inferior de concentración, sino que solo lo hicieron por encima del valor máximo.

2. Concentraciones horarias $\text{PM}_{2.5}$

Con base en los numerosos reportes de concentración horaria procedentes de la medición del equipo certificado y de los sensores electroquímicos (2388 series de datos), se presentan a continuación gráficas donde se evi-

dencia el comportamiento de las concentraciones (eje x) el tiempo de medición y (eje y) reporta la concentración

de cada uno de los sensores frente al Teledyne T640.

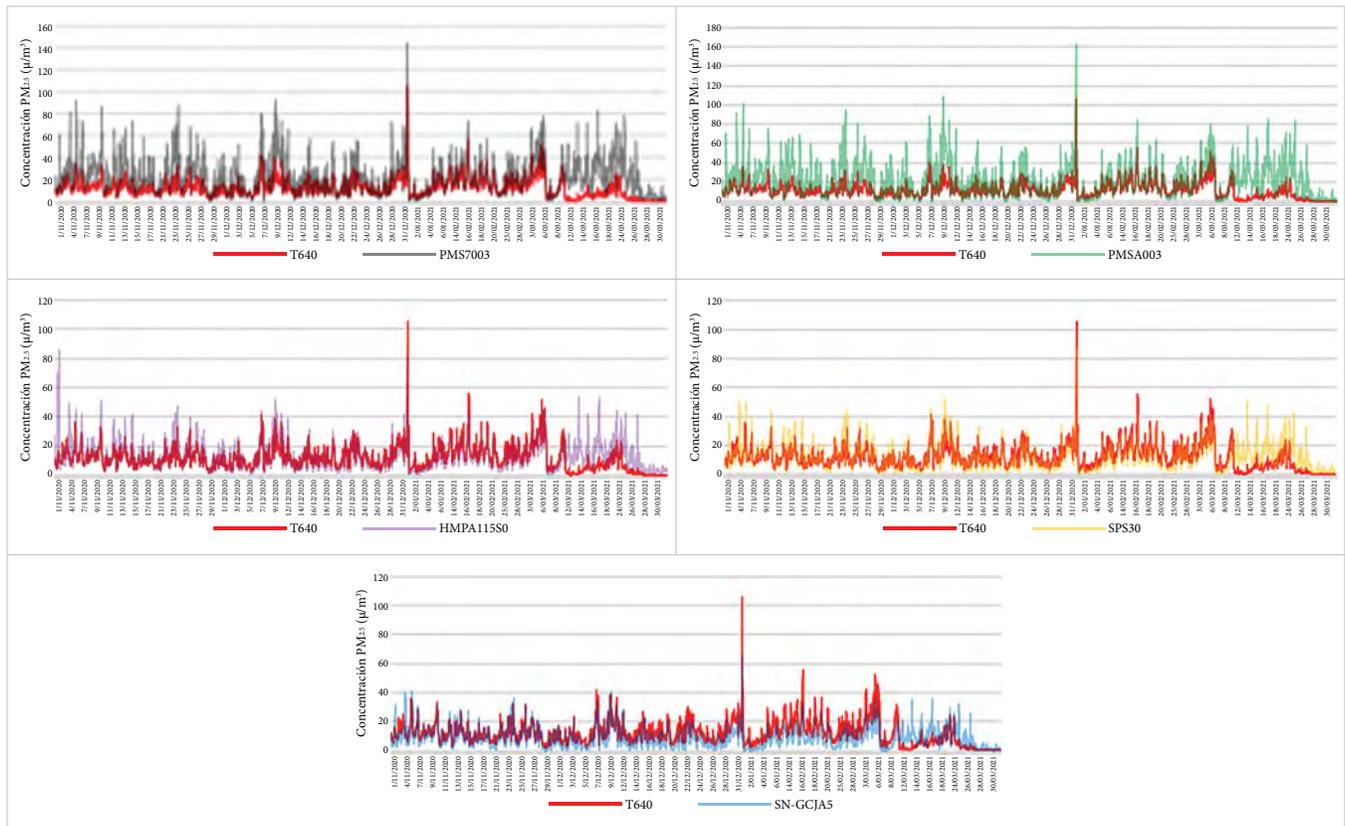


Figura 4. Tendencia de las concentraciones horarias $PM_{2.5}$

Según la [Figura 4](#), los sensores PMS7003 y PMSA003 sobrestimaron concentraciones horarias con respecto al equipo certificado superiores al 87.17 y 86.90 %. Cabe señalar que, como se observa en la [Figura 4](#), el PMSA003 es el que tiende a sobrestimar en mayor proporción.

Los sensores HMPA11550 y SPS30 subestimaron los datos horarios en comparación del T640, con desviaciones de 9.44 % y 4.15 %, respectivamente, mientras que el SN-GCJA5 lo hizo con 25.53 % ([Figura 4](#)). El sensor SPS30 presentó el menor porcentaje y, además, los reportes respectivos son los más cercanos al equipo certificado en su tendencia de concentraciones horarias.

En la [Tabla 3](#) se observa que, en este caso, las coincidencias de fecha se presentan en los valores máximos de concentración, donde los sensores PMS7003, PMSA003, SPS30 y SN-GCJA5 reportaron el mayor valor el mismo día que el equipo equivalente, coincidiendo este con el 1 de enero de 2021, que fue momento de altas emisiones a causa del uso de juegos pirotécnicos por la festividad de

fin de año y, también, al aplicar el percentil 95 la situación hizo que los dispositivos HMPA11550 y SPS30 fueran los que más se aproximaran, presentando la menor diferencia de $4.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $2.18 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

En cuanto a los valores mínimos, no se encontró coincidencia alguna. No obstante, cabe señalar que las diferencias en la concentración son menores en comparación con las concentraciones diarias en la [Tabla 2](#) y al analizarlo con el percentil 5, el sensor SN-GCJA5 experimentó una menor diferencia con respecto al valor de $1.05 \mu\text{g}/\text{m}^3$, obteniendo $0.84 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido del PMSA003 que reportó un valor de $1.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

La [Figura 5](#) muestra los diagramas de caja para las concentraciones horarias del equipo certificado y cada uno de los sensores electroquímicos, así como los valores máximos y mínimos de concentración, el rango, los cuartiles inferior y superior, el rango intercuartil, la mediana de los datos y los valores atípicos detectados.

TABLA 3
VARIABILIDAD DE LAS CONCENTRACIONES HORARIAS

| VARIABLES ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) | TELEDYNE T640 | PLANTOWER PMS7003 | REF - PMS7003 | PLANTOWER PMSA003 | REF - PMSA003 | HONEYWELL HMPA115S0 | REF - HMPA115S0 | SENSIRION SPS30 | REF - SPS30 | PANASONIC SN-GCJA5 | REF - PMSA003 |
|--|---------------|-------------------|---------------|-------------------|---------------|---------------------|-----------------|-----------------|-------------|--------------------|---------------|
| Mínimo | 0.09 | 0.21 | -0.12* | 0.00 | 0.09 | 0.77 | -0.68 | 0.69 | -0.6 | 0.00 | 0.009 |
| Fecha | 31/03/2021 | 1/01/2021 | - | 1/01/2021 | - | 7/03/2021 | - | 7/03/2021 | - | 7/03/2021 | - |
| Hora | 2:00:00 | 9:00:00 | - | 9:00:00 | - | 23:00:00 | - | 23:00:00 | - | 23:00:00 | - |
| Máximo | 105.49 | 145.00 | -39.51 | 162.00 | -56.51 | 85.40 | 20.09 | 88.40 | 17.09 | 64.40 | 41.09 |
| Fecha | 1/01/2021 | 1/01/2021 | - | 1/01/2021 | - | 2/11/2020 | - | 1/01/2021 | - | 1/01/2021 | - |
| Hora | 2:00 | 2:00 | - | 2:00 | - | 11:00 | - | 2:00 | - | 2:00 | - |
| Rango | 105.40 | 144.79 | -39.39 | 162.00 | -56.6 | 84.63 | 20.77 | 87.71 | 17.69 | 64.40 | 41 |

*Los valores negativos hacen referencia a la diferencia entre el equipo certificado y los sensores electroquímicos empleados en la investigación.

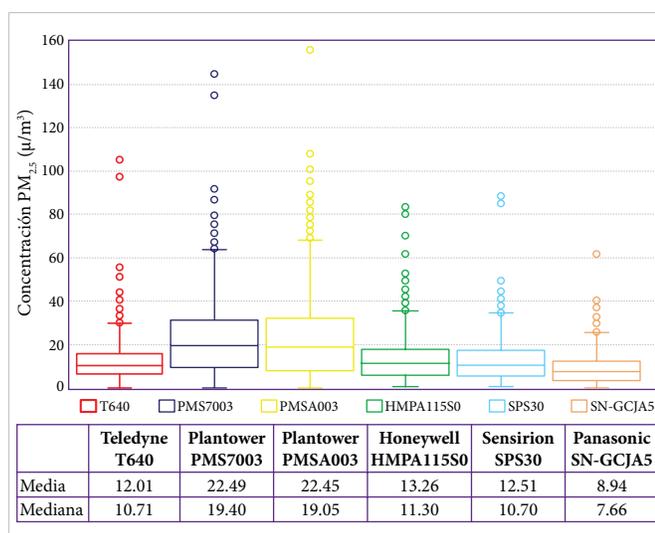


Figura 5. Diagramas de caja de las concentraciones horarias $\text{PM}_{2.5}$.

En los diagramas de caja para las concentraciones horarias (Figura 5), los sensores PMS7003 y PMSA003 presentaron una variabilidad similar entre sí, pero muy distinta a la del equipo certificado (situación parecida a la de concentraciones diarias). Nuevamente, el equipo con mayor similitud en cuanto a variabilidad respecto al certificado fue el SPS30, seguido del HMPA115S0 y el SN-GCJA5. Según la información del equipo equivalente, el 75 % de los datos se encontró por debajo de una concentración de $\text{PM}_{2.5}$ igual a $15.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, el 25 % por debajo de $6.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y resultó una mediana de $10.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Por su parte, el sensor SPS30 reveló que el 75 % de los datos fueron menores a una concentración de $17.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $\text{PM}_{2.5}$, el 25 % fue menor de $5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y se produjo una mediana de $10.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. De igual manera, como en el caso anterior, la media de los datos del T640 fue de $12.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$, similar a los sensores SN-GCJA5, SPS30 y HMPA115S0, reportando medias de $8.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $12.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $13.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

De acuerdo con los rangos mostrados en los diagramas de cajas anteriores, se deduce de nuevo la similitud entre los valores de concentración del equipo certificado y los sensores SPS30, HMPA115S0 y SN-GCJA5.

Relación estadística de los datos

En el presente apartado se expone la relación estadística entre las concentraciones obtenidas tanto para las series de tiempo diarias (2388) como horarias (95). La relación de manera gráfica (diagrama de dispersión) y numérica (coeficiente de correlación y determinación) expone la bondad de ajuste de un modelo a la variable que se pretende explicar. Para este caso, se advierte la conveniencia de aproximarse a los valores de concentración de referencia, aportadas por el equipo certificado T640 a partir de las concentraciones obtenidas por los sensores electroquímicos.

El coeficiente de r de Pearson, que oscila entre -1 y $+1$, un valor menor a 0 indica que existe una correlación negativa, es decir, que las dos variables están asociadas en sentido inverso. Cuanto más se acerca a 1 , mayor es la fuerza de esa relación invertida; si es exactamente -1 eso significa que tienen una correlación negativa perfecta y un valor mayor que 0 indica que existe una correlación positiva. En este caso, las variables estarían asociadas en sentido directo. Cuanto más cerca está de $+1$, más alta es su asociación; un valor exacto de $+1$ indicaría una relación lineal positiva perfecta y, finalmente, una correlación de 0 o próxima a 0 indica que no hay relación lineal entre las dos variables [22]. En cuanto al coeficiente de determinación, que es un concepto de estadística también llamado r cuadrado o r^2 , representa la proporción de varianza total de la variable que explica la regresión. En otras palabras, dicho término trata de explicar la bondad

del ajuste de un modelo a la variable que pretende analizar. Este coeficiente puede ofrecer valores entre 0 y 1. Si el resultado es 1 o cercano a 1, indica que el modelo y la variable que se quiere explicar se ajustan mucho y, por el contrario, si se acerca más a 0 el modelo se ajustará menos (además de ser menos fiable) [23].

1. Concentraciones diarias PM_{2.5}

La Figura 6 presenta los diagramas de dispersión con sus coeficientes de correlación y determinación, así como las rectas de regresión lineal resultantes entre los datos diarios de concentración PM_{2.5} (µg/m³) obtenidos de las mediciones de cada uno de los sensores electroquímicos y las calculadas a partir de la información proporcionada por el equipo equivalente.

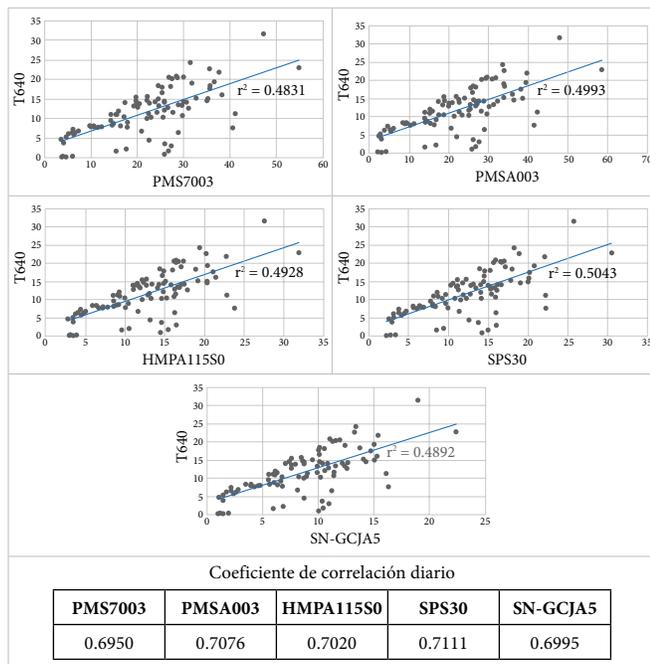


Figura 6. Diagramas de dispersión de las concentraciones diarias.

De acuerdo con la Figura 6, todas las series de datos de concentración diaria entre el equipo certificado y los sensores electroquímicos tienen una condición similar, presentando un coeficiente de correlación entre 0.695 (PMS7003) a 0.711 (SPS30), lo que indica un grado de asociación positiva entre moderada y significativa en las dos variables.

Al aproximar las concentraciones de los sensores electroquímicos a los valores de concentración del equipo certificado y empleando los modelos resultantes de la regresión lineal aplicada con el coeficiente de determinación,

se aprecia que los valores están entre 0.4892 (SN-GCJA5) y 0.5043 (SPS30), con la variación de la concentración en las técnicas de medición en alrededor del 50 %.

2. Concentraciones horarias PM_{2.5}

La Figura 7 presenta los diagramas de dispersión con sus respectivos coeficientes de correlación y rectas de regresión lineal, de acuerdo con los datos horarios de concentración de PM_{2.5} en µg/m³ para las mediciones de cada uno de los sensores electroquímicos y las establecidas a partir de la información del equipo equivalente.

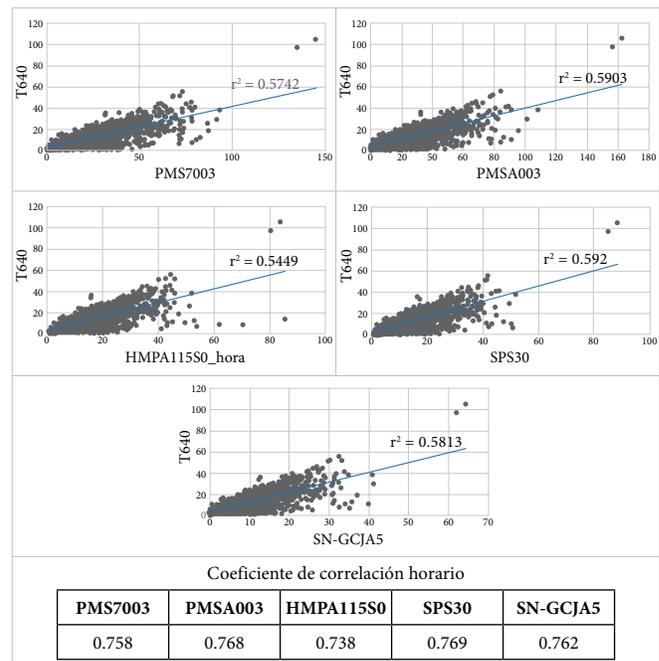


Figura 7. Diagramas de dispersión de las concentraciones horarias.

Las correlaciones aumentaron del 4 al 6 % para el tiempo de exposición diaria con respecto al horario, es decir, se llegó a valores entre 0.738 (HMPA115S0) y 0.769 (SPS30), confirmando una asociación significativa entre las dos técnicas de medición. Asimismo, el coeficiente de determinación se incrementó del 6 al 10 % aproximadamente, llegando al 54.13 % y hasta el 59.2 % de aproximación de las concentraciones de los sensores mencionados anteriormente con respecto al equipo equivalente.

Con base en lo anterior, las relaciones estadísticas horarias guardan mayor bondad de ajuste, por lo que la deducción de las concentraciones de referencia a partir de las reportadas por los sensores electroquímicos, es más idónea con respecto al caso de las series de datos diarias.

Análisis del error

1. Concentraciones diarias

Con el objetivo de establecer el uso eficiente de sensores electroquímicos de bajo costo como alternativa en la medición y monitoreo de la calidad del aire, algunos trabajos de investigación exponen la influencia de ciertas variables meteorológicas en la precisión de los sensores [11], [24], [25]. Por tanto, en el presente apartado se expone la relación del error en porcentaje (concentración reportada por el sensor menos la indicada por el equipo equivalente), determinando rangos en tiempo de exposición diario y horario con el propósito de establecer el comportamiento de cada una de las concentraciones, qué tan cerca o lejos se está de la línea central y determinar la uniformidad de la información, independientemente de las condiciones que se presenten y la variabilidad de la temperatura y humedad en el sitio donde se está midiendo la calidad del aire.

Respecto al sensor PMS7003, no se presentaron concentraciones al mismo nivel del equipo certificado y el 90.5 % de los datos tuvo una sobrestimación de la concentración con respecto a la línea central, estando agrupados en su mayoría entre -10 % a -50 % de diferencia con el 30.5 % del total de información, lo cual es un incremento entre 1.34 µg/m³ y 15.5 µg/m³. Al igual que el anterior, el análisis del sensor PMSA003 no arrojó concentraciones iguales al equipo certificado y su mayor distribución está para una sobrestimación entre -10 y -100 % con 71 datos de 95, equivalente al 74.7 % de las concentraciones válidas.

El comportamiento de los datos del sensor HMPA115S0 se presenta en la [Figura 8](#), donde únicamente dos concentraciones fueron iguales al equipo de certificado y el 49.5 % de la información quedó por debajo de la línea central entre el rango de 10 % a 20 % y por encima entre -10 % y -50 %, obteniendo una mayor incidencia con 21 y 24 concentraciones de las 95 obtenidas, respectivamente.

La situación anterior se dio también en el sensor SPS30, donde el 54.7 % de la información estuvo por debajo del nivel de referencia mientras que el 45.3 % presentó concentraciones por encima del T640. Al tener una diferencia en concentración de ±3 µg/m³, esta situación se dio en 57 días, siendo el 60 % del tiempo de monitoreo y representando una adecuada armonización entre las técnicas de medición.

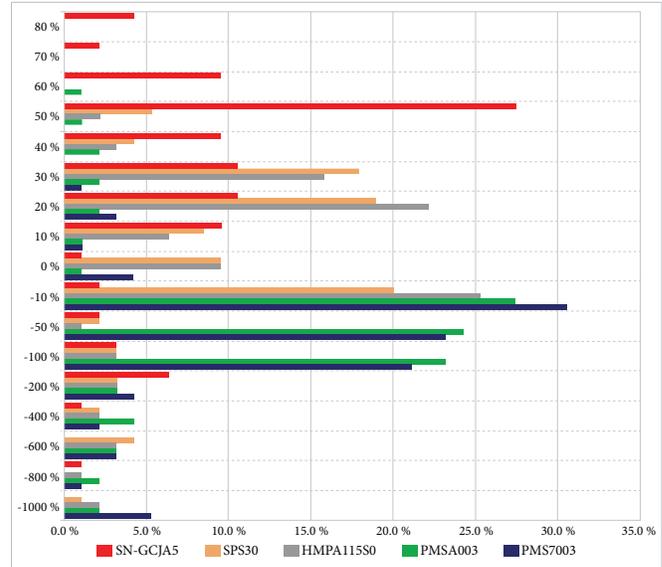


Figura 8. Variación de las concentraciones de los sensores con respecto a la línea central - diario.

El último sensor empleado, el SN-GCJA5, tuvo una representación de datos en 13 de los 14 rangos, una mayor presencia por debajo de la línea central en 83.2 % y 79 datos, y el rango de error más alto entre 10 y 30 % con el 21.2 % de la información procesada para esta exposición.

De los cinco sensores empleados en este estudio, HMPA115S0 y SPS30 son los de mejor comportamiento ([Tabla 4](#)), ya que fueron los que más días estuvieron en un rango de ±10 % de diferencia con la línea de tendencia central, con 15 y 17 días de los 95 evaluados.

TABLA 4
NÚMERO DE DÍAS DE MAYOR VARIACIÓN EN 24 HORAS

| DESDE (%): | HASTA (%): | PMS7003 | PMSA003 | HMPA115S0 | SPS30 | SN-GCJA5 |
|------------|------------|---------|---------|-----------|-------|----------|
| -3000 | -1000 | 5 | 2 | 2 | 1 | 0 |
| -1000 | -800 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| -800 | -600 | 3 | 3 | 3 | 4 | 0 |
| -600 | -400 | 2 | 4 | 2 | 2 | 1 |
| -400 | -200 | 4 | 3 | 3 | 3 | 6 |
| -200 | -100 | 20 | 22 | 3 | 3 | 3 |
| -100 | -50 | 22 | 23 | 1 | 2 | 2 |
| -50 | -10 | 29 | 26 | 24 | 19 | 2 |
| -10 | 0 | 4 | 1 | 9 | 9 | 1 |
| 0 | 10 | 1 | 1 | 6 | 8 | 9 |
| 10 | 20 | 3 | 2 | 21 | 18 | 10 |
| 20 | 30 | 1 | 2 | 15 | 17 | 10 |
| 30 | 40 | 0 | 2 | 3 | 4 | 9 |
| 40 | 50 | 0 | 1 | 2 | 5 | 26 |
| 50 | 60 | 0 | 1 | 0 | 0 | 9 |
| 60 | 70 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 70 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 |
| Total | | 95 | 95 | 95 | 95 | 95 |

2. Concentraciones horarias

El análisis de este error se da para un total de 2168 concentraciones que se grafican en la [Figura 9](#). Los sensores que principalmente estuvieron por debajo de la línea de correlación son HMPA115S0, SPS30 y SN-GCJA5, siendo los dos primeros muy similares y presentando la mayor influencia hasta el 80 %, sin embargo, el grupo que mostró mayor incidencia estuvo hasta en el 30 %, equivalente a $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $4.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, con el 56.8 % y 53.5 % de datos válidos.

Para el sensor SN-GCJA5 se detectó un error hasta del 290 % con 49 concentraciones y 1627 datos por debajo de la línea de tendencia, que equivalen al 75 % de la información y superando ampliamente a los que tuvieron una sobrevaloración de la línea central de tendencia.

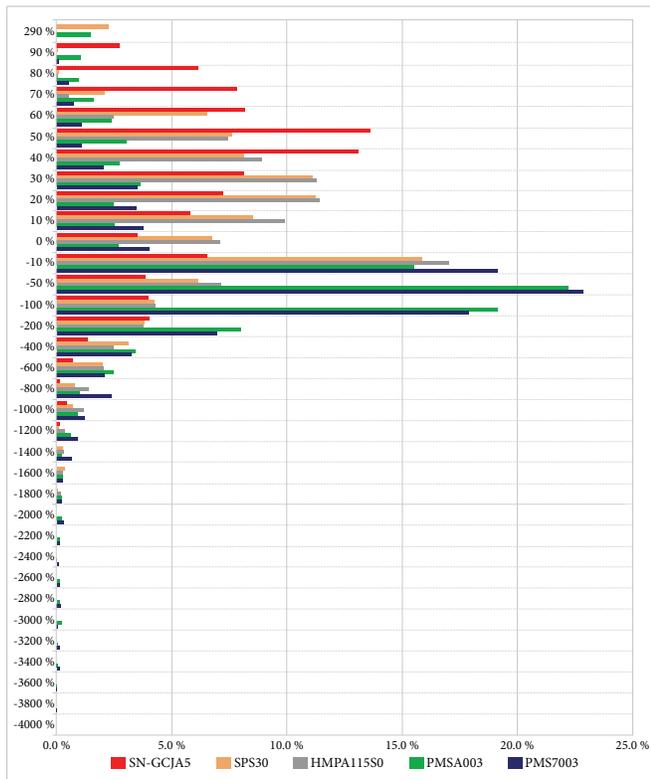


Figura 9. Variación de las concentraciones de los sensores con respecto a la línea central - horario

En cuanto al comportamiento de los sensores PMS7003 y PMSA003, se presentaron errores que llegaron a estar por encima de 3000 % de error con 14 y 12 horas del total medido, alcanzando a una diferencia entre concentraciones de $17.51 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $29.52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y una mayor proporción en el 200 % de error con el 63.9 % y 59.5 % de los datos analizados, llegando a $40.47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y 11.86

$\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para tener la información más clara sobre el número de horas de variación horaria, se pueden observar estos datos en la [Tabla 5](#).

Tabla 5
NÚMERO DE HORAS DE MAYOR VARIACIÓN HORARIO

| DESDE (%): | HASTA (%): | PMS7003 | PMSA003 | HMPA115S0 | SPS30 | SN-GCJA5 |
|------------|------------|---------|---------|-----------|-------|----------|
| -4200 | -4000 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -4000 | -3800 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| -3800 | -3600 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| -3600 | -3400 | 3 | 2 | 0 | 0 | 0 |
| -3400 | -3200 | 3 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| -3200 | -3000 | 2 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| -3000 | -2800 | 4 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| -2800 | -2600 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| -2600 | -2400 | 2 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| -2400 | -2200 | 3 | 3 | 0 | 0 | 0 |
| -2200 | -2000 | 7 | 5 | 0 | 0 | 0 |
| -2000 | -1800 | 5 | 5 | 4 | 1 | 0 |
| -1800 | -1600 | 6 | 6 | 7 | 8 | 0 |
| -1600 | -1400 | 15 | 5 | 8 | 7 | 0 |
| -1400 | -1200 | 20 | 14 | 9 | 3 | 4 |
| -1200 | -1000 | 27 | 20 | 26 | 16 | 10 |
| -1000 | -800 | 52 | 22 | 31 | 18 | 4 |
| -800 | -600 | 46 | 54 | 45 | 44 | 16 |
| -600 | -400 | 71 | 74 | 54 | 68 | 30 |
| -400 | -200 | 151 | 174 | 82 | 83 | 88 |
| -200 | -100 | 388 | 415 | 93 | 92 | 87 |
| -100 | -50 | 495 | 481 | 155 | 134 | 84 |
| -50 | -10 | 415 | 336 | 369 | 344 | 142 |
| -10 | 0 | 88 | 58 | 154 | 146 | 76 |
| 0 | 10 | 82 | 55 | 215 | 185 | 126 |
| 10 | 20 | 75 | 54 | 248 | 244 | 157 |
| 20 | 30 | 76 | 80 | 245 | 241 | 176 |
| 30 | 40 | 45 | 60 | 193 | 176 | 284 |
| 40 | 50 | 25 | 67 | 162 | 166 | 295 |
| 50 | 60 | 25 | 52 | 54 | 142 | 177 |
| 60 | 70 | 17 | 35 | 12 | 46 | 170 |
| 70 | 80 | 12 | 21 | 2 | 3 | 134 |
| 80 | 90 | 3 | 23 | 0 | 1 | 59 |
| 90 | 290 | 0 | 33 | 0 | 0 | 49 |
| Total | | 2168 | 2168 | 2168 | 2168 | 2168 |

De igual manera que en la condición diaria, en el tiempo de exposición horaria los dos sensores con un mejor comportamiento con respecto a las concentraciones reportadas por el equipo certificado T640 fueron el HMPA115S0 y el SPS30, los cuales, con 369 y 344 horas respectivamente, tuvieron un error de $\pm 10\%$ y luego se desplazó a -200% cuando la concentración estuvo por encima del valor de referencia y del 60 % tras quedar por debajo del eje central. En las dos situaciones se alcanzó el 65.9 % y 66.7 % del total de datos válidos.

Efecto de la humedad

1. Análisis diario

En el caso de la temporalidad diaria, se relacionó un total de 86 concentraciones debido a que en 9 de las 95 series diarias útiles propuestas en el estudio no se contó con la información suficiente sobre la presente variable meteorológica. La mayoría de los valores de humedad relativa promedio presentaron números superiores al 60 % y los

valores menores a ese porcentaje fueron de 7 días de medición. La [Tabla 6](#) muestra los valores de los coeficientes de dispersión para cada uno de los sensores electroquímicos empleados, en los casos en que se decidió depurar las concentraciones presentadas en días con humedades relativas promedios superiores a ciertos porcentajes propuestos para el análisis. Adicionalmente, se expone la cantidad de datos relacionados estadísticamente en cada una de las situaciones y el porcentaje que representan frente a los datos iniciales de 86.

TABLA 6
CORRELACIÓN DE CONCENTRACIONES DIARIAS A DIFERENTES HUMEDADES

| HUMEDAD RELATIVA MÁXIMA (%) | PLANTOWER PMS7003 | PLANTOWER PMSA003 | HONEYWELL HMPA115S0 | SENSIRION SPS30 | PANASONIC SN-GCJA5 | NÚM. DE DATOS | % |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|--------------------|---------------|-------|
| < 90 | 0.7067 | 0.7148 | 0.7056 | 0.7134 | 0.7073 | 86 | 100 |
| < 80 | 0.7685 | 0.7743 | 0.7694 | 0.7766 | 0.7667 | 81 | 94.18 |
| < 70 | 0.8771 | 0.8824 | 0.8722 | 0.8871 | 0.8741 | 49 | 56.98 |
| < 60 | 0.9502 | 0.9305 | 0.9551 | 0.9358 | 0.9331 | 7 | 8.14 |

Los coeficientes r para cada relación estadística (sensor electroquímico, equipo equivalente) aumentaron gradualmente cada vez que se depuraban las concentraciones reportadas en días con humedades relativas inferiores a porcentajes del 90 %, obteniéndose coeficientes de dispersión de alrededor del 70 %. Cuando la humedad llegó al 80 %, los coeficientes se incrementaron en 6 %, si las humedades eran menores al 70 % la r fue del 87 %, que es un incremento de 11 %, y con humedades por debajo del 60 % se llegó a coeficientes del 94 %, es decir, se produjo un 24 % de incremento en r pasando de 90 % a 60 % de humedad. Esto significa que a medida que baja la humedad se incrementa la correlación, sin embargo, al presentarse esta condición, las cantidades de datos relacionadas estadísticamente se van haciendo menores y pierden representatividad de manera importante.

Esto se pudo observar en días con humedades relativas menores al 60 %, donde los datos útiles se redujeron a tan solo 7 (8.14 % de los iniciales). Pese a ello, el incremento en los valores de r anuncia la influencia de la humedad relativa en el ejercicio de ajuste estadístico de las concentraciones diarias obtenidas de la medición realizada por cada uno de los sensores electroquímicos y del equipo T640.

La diferencia en la correlación y linealidad de las concentraciones de las dos técnicas de medición indican que al reducirse la humedad se va aumentando el coeficiente r en proporciones significativas: al pasar del 90 al 80 % este crece en un 6 %, del 80 al 70 % de humedad se tiene

el mayor incremento (entre 10 y 11 %) y del 70 al 60 % de nuevo se tiene entre 5 y 7 % de aumento, llegando una diferencia total entre el 22 y el 25 %. Esto conlleva a determinar que esta variable meteorológica es de suma importancia en la influencia de las técnicas de medición para los sensores electroquímicos, lo que genera una alta variabilidad en las concentraciones y altas dispersiones cuando se presentan altas humedades relativas. Por ello en los *inlets* o cabezotes y en algunos equipos automáticos se agregan dispositivos para el manejo de la humedad, ya vez que a humedades altas la medición puede presentar interferencias e incertidumbres que dan como no válida una concentración.

2. Análisis horario

Del total de series de datos horarios propuestos en el estudio de los sensores electroquímicos, solo en 2175 se cuenta con reporte de humedad relativa, por lo cual, con tal información se realizó el análisis a la variable meteorológica de humedad.

En particular, la humedad relativa es considerada una variable con gran amplitud, a causa de la dependencia de factores naturales ^[25] y no tiene una incidencia sustancial en la concentración de los contaminantes en la calidad del aire, pero sí puede afectar las diferentes técnicas de medición que se emplean para determinar la concentración, principalmente si son de tipo automático.

La [Tabla 7](#) presenta los valores de los coeficientes de dispersión r para los sensores electroquímicos. Cuando se decidió depurar las concentraciones presentadas en tiempo de exposición horario y con humedades relativas inferiores a ciertos porcentajes, como son el 90, 80, 70 y 60 %, se advirtió que los valores de r mostraron un mayor ajuste a medida que se reducía la humedad en un 4 % en total, por ejemplo, el sensor SPS30 inició con

un 77.37 % de correlación con humedades por debajo del 90 % bajo 2114 datos, llevándose el 97.19 % del total de información. En cambio, con humedades por debajo del 60 % se obtuvo solo 570 datos, es decir, el 25.21 % de concentraciones y un coeficiente de correlación del 81.53 %, siendo este sensor el que tuvo mejores resultados en los análisis realizados para cada una de las humedades definidas.

TABLA 7
CORRELACIÓN DE CONCENTRACIONES HORARIAS A DIFERENTES HUMEDADES

| HUMEDAD RELATIVA MÁXIMA (%) | PLANTOWER PMS7003 | PLANTOWER PMSA003 | HONEYWELL HMPA115S0 | SENSIRION SPS30 | PANASONIC SN-GCJA5 | NÚM. DE DATOS | % |
|-----------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|--------------------|---------------|-------|
| < 90 | 0.7667 | 0.7755 | 0.7391 | 0.7737 | 0.7692 | 2114 | 97.19 |
| < 80 | 0.7952 | 0.8032 | 0.7570 | 0.8008 | 0.7948 | 1554 | 71.44 |
| < 70 | 0.8068 | 0.8148 | 0.7821 | 0.8148 | 0.8067 | 994 | 45.70 |
| < 60 | 0.8027 | 0.8168 | 0.75651 | 0.8153 | 0.8099 | 570 | 26.21 |

Para los tiempos de exposición diaria y horaria es importante verificar que las lecturas en los sensores electroquímicos, como en las técnicas de medición equivalentes aprobadas por la EPA, no tengan influencia o error en la medición debido a la incidencia del vapor de agua en la atmósfera. Por esta razón, muchos equipos activos y automáticos tienen sistemas para separar las micropartículas de agua, como el calentador en el tubo de succión, lo que reduce la incertidumbre y el error en la medición de acuerdo a la técnica aplicada en los equipos equivalentes.

diarias útiles propuestas en el estudio, no se contó con la información suficiente sobre la presente variable meteorológica.

De igual manera que con el concepto de humedad relativa, a la temperatura también se le considera una variable de gran amplitud a causa de la dependencia de factores naturales ^[26].

En la [Tabla 8](#), los valores del r aumentan cada vez que se omiten las concentraciones reportadas en días con temperaturas superiores a 17, 16.5, 16, 15.5 y 15 °C, respectivamente. En el caso de las concentraciones con temperaturas mayores a 17 °C, la tendencia descrita se siguió presentando en todos los sensores, con excepción del HMPA115S0 que obtuvo el 86 % de correlación.

Efecto de la temperatura

1. Análisis diario

En este caso, se relacionaron de igual manera un total de 86 concentraciones debido a que en 9 de las 95 series

TABLA 8
CORRELACIÓN DE CONCENTRACIONES DIARIAS A DIFERENTES TEMPERATURAS

| TEMPERATURA MÍNIMA (°C) | PLANTOWER PMS7003 | PLANTOWER PMSA003 | HONEYWELL HMPA115S0 | SENSIRION SPS30 | PANASONIC SN-GCJA5 | NÚM. DE DATOS | % DE DATOS |
|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|--------------------|---------------|------------|
| > 15 | 0.8366 | 0.8425 | 0.8304 | 0.8475 | 0.8310 | 75 | 87.21 |
| > 15.5 | 0.8891 | 0.8957 | 0.8835 | 0.8982 | 0.8865 | 58 | 67.44 |
| > 16 | 0.911 | 0.9210 | 0.8984 | 0.9186 | 0.9113 | 40 | 47.67 |
| > 16.5 | 0.9079 | 0.9137 | 0.8883 | 0.9145 | 0.9126 | 25 | 29.07 |
| > 17 | 0.9424 | 0.9452 | 0.8608 | 0.9486 | 0.9331 | 8 | 9.30 |

Este comportamiento es tal que si solo se presentan temperaturas por encima de 15 °C, los coeficientes de correlación r serían del orden del 83 y 84 % para un total de 75 días evaluados con el 87.21 % de datos y al

ir incrementando la temperatura en 0.5 °C, estos coeficientes aumentan hasta llegar al 93 y 94 % de correlación, pero con solo 8 días de información y el 9.3 % de representatividad.

Lo anterior indica que los sensores generan una mejor condición de correlación con respecto al equipo certificado cuando se tiene una mayor temperatura, aumentando entre 6 % y 8 %. El SPS30 es el de mejor coeficiente, siendo este de 84.75 % para temperaturas mayores a 15 °C y hasta de 94.86 % para una temperatura superior a 17 °C.

2. Análisis horario

Para analizar el efecto de la temperatura sobre la diferencia entre las concentraciones horarias reportadas por cada uno de los sensores electroquímicos y el equipo equivalente, se relacionaron estadísticamente un total de 2181 datos válidos.

La mayoría de las concentraciones horarias se condensaron en valores por debajo de los 20 °C y mayores a los 12 °C. En la [Tabla 9](#) se presentan los coeficientes de correlación r para los sensores electroquímicos. Cuando se decidió depurar las concentraciones reportadas con temperaturas cada 2 °C en promedio, estas aumentaron gradualmente llegando a un rango entre 3 % y 5 %, a excepción del sensor HMPA115S0, en el que se redujo en el rango de temperaturas hasta un 12 %. Adicionalmente, en la tabla se presenta la cantidad de datos relacionados de manera estadística en cada uno de los casos y el porcentaje que representan frente a los datos iniciales de 2168, iniciando con el 95.96 % con 2093 datos al tener temperaturas mayores de 12 °C y mayor de 20 °C al presentarse únicamente 182 horas con el 8.34 %.

TABLA 9
CORRELACIÓN DE CONCENTRACIONES HORARIAS A DIFERENTES TEMPERATURAS

| TEMPERATURA MÍNIMA (°C) | PLANTOWER PMS7003 | PLANTOWER PMSA003 | HONEYWELL HMPA115S0 | SENSIRION SPS30 | PANASONIC SN-GCJA5 | NÚM. DE DATOS | % DE DATOS |
|-------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-----------------|--------------------|---------------|------------|
| > 12 | 0.7626 | 0.7706 | 0.7342 | 0.7693 | 0.7641 | 2093 | 95.96 |
| > 14 | 0.7837 | 0.7883 | 0.7503 | 0.7883 | 0.7798 | 1575 | 72.21 |
| > 16 | 0.8046 | 0.8047 | 0.7811 | 0.8080 | 0.7947 | 921 | 42.22 |
| > 18 | 0.8117 | 0.8191 | 0.7715 | 0.8217 | 0.8090 | 507 | 23.24 |
| > 20 | 0.8046 | 0.8135 | 0.64678 | 0.8162 | 0.7974 | 182 | 8.34 |

Los valores de r aumentaron cada vez que se depuraban las concentraciones reportadas con la temperatura. De manera general, tanto para las series de tiempo diarias como horarias en la mayoría de los casos se presentó un efecto relevante de la temperatura y la humedad relativa sobre el error y el coeficiente de dispersión r .

Respecto a la temperatura, mientras esta variable meteorológica descendía, el error se hizo más visible y r alcanzó valores con un menor ajuste estadístico entre las concentraciones de los sensores y de referencia. Lo anteriormente mencionado obedece únicamente a una tendencia de los datos y no a modelos de predicción estadística.

La tendencia del error y del coeficiente de dispersión con respecto a la temperatura y humedad relativa puede tener distintas explicaciones. Por ejemplo, en el caso del efecto de la humedad relativa sobre la respuesta de los sensores, en un estudio de 2019 ^[27] se indica que los sensores electroquímicos de bajo costo no cuentan con un sistema de secado de partículas antes del ingreso a la cámara de detección óptica, lo que implica que se estén

contabilizando tanto las partículas de aerosol como las gotas de niebla, lo cual genera un error en la medición del material particulado.

En una investigación de 2015 ^[11] se aborda una situación similar, explicando que el agua absorbe la radiación infrarroja y puede causar una sobrestimación de las concentraciones de masa de partículas debido a la intensidad de luz reducida que recibe el fototransistor. Adicionalmente, se menciona que el vapor de agua altamente concentrado puede provocar una falla en los circuitos de los sensores de partículas y así generar resultados de medición sesgados.

En otro estudio, en 2020 ^[26], se señala que, de acuerdo con el principio de funcionamiento de los sensores, se puede inferir que el vapor de agua podría absorber parte de la luz en condiciones de alta humedad relativa, lo cual genera que la intensidad de la luz recibida por los transistores fotoeléctricos se reduzca y se manifieste una sobrestimación de las concentraciones de masa de partículas.

En el caso de la temperatura y el sesgo en la medición de los sensores, este puede tener origen en la proporcionalidad que guarda la temperatura con respecto a la humedad relativa, debido a que, en condiciones de presión atmosférica poco variable, a medida que aumenta la temperatura el aire se vuelve más seco y la humedad relativa disminuye, a diferencia de cuando la temperatura se reduce, el aire se vuelve más húmedo y la humedad relativa aumenta.

Percentiles

Los percentiles es una medida de posición relativa del p-ésimo (punto) para un conjunto de datos, con la intención de conocer la posición de los datos para identificar datos extremos [28]. La [Tabla 10](#) muestra los percentiles para el equipo certificado y los sensores. En ella se aprecia que el p_{99} para el equipo certificado corresponde a una concentración de $37.53 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y solo 20 datos de 2168 se encuentran por encima de esta concentración. De los cinco sensores instalados, solo el SPS30 tuvo un comportamiento similar con un valor de $39.41 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido del HMPA115S0 con $42.71 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

TABLA 10
PERCENTILES DE CONCENTRACIONES DEL T640 Y SENSORES ELECTROQUÍMICOS

| PERCENTILES | T640 | PMS-7003 | PMSA-003 | HMPA-115S0 | SPS30 | SN-GCJA5 |
|-------------|-------|----------|----------|------------|-------|----------|
| 99 | 37.53 | 72.07 | 77.16 | 42.71 | 39.41 | 30.91 |
| 95 | 26.72 | 53.46 | 55.66 | 30.90 | 29.00 | 21.56 |
| 90 | 22.26 | 44.40 | 46.31 | 25.41 | 24.30 | 17.90 |
| 5 | 1.05 | 3.11 | 1.54 | 2.70 | 2.13 | 0.84 |

La situación antes presentada también se dio para los p_{95} y p_{90} . En todos los casos, los sensores PMS7003, PMSA003, SPS30 y HMPA115S0 tuvieron una mayor concentración en el análisis del percentil, a excepción del SN-GCJA5 que estuvo por debajo. No obstante, para el SPS30 las diferencias son muy bajas, por el ejemplo, en el p_{95} fue de $3.276 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y en el p_{90} de $2.037 \mu\text{g}/\text{m}^3$, a diferencia de los otros sensores que tienen para este último percentil $22.137 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en el PMS7003 y de $24.047 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Lo anterior muestra una perspectiva sobre la distribución de los datos y sus tendencias o patrones, en especial para el PMSA003.

Para el p_{25} y p_5 la mayor diferencia se dio con el sensor PMS7003, que obtuvo un valor de $12.944 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y 2.069

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, y la mínima con el sensor SN-GCJA5 con $1.194 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $0.207 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para el aparato de mejor tendencia a percentiles 30 en adelante, que corresponde al SPS30, su diferencia fue de $-4.244 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $1.084 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

IV. CONCLUSIONES

Los sensores electroquímicos de bajo costo estudiados (Plantower PMS7003 y PMA7003, Honeywell HPA115S0, Sensirion SPS30 y Panasonic SN-GCJA5) resultaron ser eficaces para identificar las tendencias generales de contaminación atmosférica y complementar las redes de monitoreo en la medición de $\text{PM}_{2.5}$, aunque tienen limitaciones en la precisión y rango de medición e incertidumbre sobre la sensibilidad en la medición (tamaño de partícula mínimo detectable), pues las especificaciones de estos equipos no incluyen dicha información.

El comportamiento de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ reportadas, según los sensores electroquímicos de bajo costo evaluados con respecto al equipo certificado Teledyne T640 para las series de tiempo horarias, indica que los sensores PMS7003 y PMA7003 sobrestimaron la concentración en más de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con el 42 % y 43 % de los datos medidos, mientras que los sensores HMPA115S0 y SPS30 lo hicieron en un porcentaje del 54 % y 52 %, respectivamente, por debajo de los $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En el caso del sensor SN-GCJA5, la mayor agrupación de datos fue del 60 % bajo un rango de concentración entre 3 a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Según el análisis comparativo de los datos de concentración obtenidos por los sensores y el equipo equivalente, el sensor SPS30 presenta la mejor relación estadística para las series de tiempo tanto diarias como horarias, con r de 0.7101 y 0.7694, respectivamente. Los demás dispositivos presentaron un coeficiente de correlación cercano, a excepción del sensor HMPA115S0 en la temporalidad horaria que presentó un valor r de 0.7381 y el sensor PMS7003 con r de 0.6950. De manera general, los valores de cada r tienen una correlación fuerte, sin embargo, los valores de r^2 no son tan apropiados, lo que indica que el modelo de regresión lineal no se ajusta al conjunto de datos reportados por el equipo T640.

Los datos de cada uno de los equipos es una distribución simétrica, porque en los percentiles 5 y 95, el porcentaje de datos sesgados es similar. Por otra parte,

en los cuartiles 1 y 3 y la mediana las concentraciones están muy separadas, por lo que indica una dispersión alta. Además, se presentó una relación del Q1 del equipo certificado con los sensores PMS7003 y PMA7003 en el Q3, donde reportan concentraciones diarias similares. Es importante señalar que las posiciones de los cinco sensores, en contraste con los valores del Teledyne T640, el dispositivo SPS30 tiene mejor relación. De manera puntual, aquí se hace referencia a los cuartiles, mediana y media de las concentraciones horarias y diarias.

Se demostró que los sensores electroquímicos de bajo costo, pueden convertirse en una herramienta importante en la tarea de complementar las actuales redes de monitoreo de calidad del aire y de caracterizar adecuadamente los niveles de contaminación a los que están expuestos los ciudadanos, a partir de una alta resolución espacio temporal y bajo número de datos faltantes. Sin embargo, se debe garantizar una adecuada toma de la muestra, junto con un oportuno procesamiento y reporte de los datos, además de lograr el aseguramiento y control de calidad de la información.

Adicionalmente, es necesario señalar que, en las circunstancias actuales, los sensores electroquímicos de bajo costo pueden utilizarse para evaluaciones indicativas de la calidad del aire, pero habría que tener en cuenta la incertidumbre en los datos generados, es decir, que este tipo de tecnología debe ser metodológicamente implementada en un tiempo prudente (mínimo un año), con el fin de establecer de manera indicativa el comportamiento de la calidad del aire para examinar enseguida la situación en los sitios o áreas donde se reporten concentraciones de interés o estados de excepcionalidad a través del uso de equipos automáticos aprobados por la EPA.

Debido a su alta correlación y variabilidad con respecto al equipo certificado, los sensores de bajo costo pueden llegar a ser útiles para identificar tendencias generales de contaminación atmosférica y servir como medidores indicativos en redes ciudadanas de monitoreo.

Además, es muy importante acompañar la medición de la calidad del aire con la toma de lecturas al mismo tiempo de exposición de variables meteorológicas, como temperatura y humedad relativa, para poder validar la información y así garantizar que las concentraciones no presenten alteraciones.

REFERENCIAS

- [1] F. Ballester, "Contaminación atmosférica, cambio climático y salud", *Rev Esp Salud Pública*, vol. 79, n.º 2, pp. 159-175, mar.-abr. 2005.
- [2] M. Romero, F. Diego y M. Álvarez, "La contaminación del aire: su repercusión como problema de salud", *Rev Cubana Hig Epidemiol*, vol. 44, n.º 2, pp. 1-14, 2006.
- [3] J. A. Rosales-Castillo, V. M. Torres-Meza, G. Olaiz-Fernández y V. H. Borja-Aburto, "Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población: evidencias de estudios epidemiológicos", *Salud Pública Méx.*, vol. 43, n.º 6, pp. 544-555, 2001, disponible en: <https://www.scielosp.org/pdf/spm/2001.v43n6/544-555/es>.
- [4] A. Quijano, M. J. Quijano y J. A. Henao, "Caracterización fisicoquímica del material particulado-fracción respirable PM2.5 en Pamplona-Norte de Santander-Colombia", *Bistua*, vol. 8, n.º 1, pp. 1-20, en.-jun. 2010.
- [5] N. Castell *et al.*, "Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?", *Environ Int*, vol. 99, pp. 293-302, feb. 2017, doi: [10.1016/j.envint.2016.12.007](https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007).
- [6] M. Gao, J. Cao y E. Seto, "A distributed network of low-cost continuous reading sensors to measure spatiotemporal variations of PM2.5 in Xi'an, China", *Environ Pollut*, vol. 199, pp. 56-65, abr. 2015, doi: [10.1016/j.envpol.2015.01.013](https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.013).
- [7] G. Miskell, J. Salmond y D. E. Williams, "Low-cost sensors and crowd-sourced data: Observations of siting impacts on a network of air-quality instruments", *Sci Total Environ*, vol. 575, pp. 1119-1129, en. 2017, doi: [10.1016/j.scitotenv.2016.09.177](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.177).
- [8] L. X. Roncancio, "Evaluación del desempeño de sensores de bajo costo como complemento para el monitoreo de la calidad del aire de Bogotá y como herramienta para la determinación del grado de exposición de una población caso de estudio", tesis de magister en ingeniería ambiental, Universidad Nacional de Colombia., Bogotá D.C., 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/77273>
- [9] O. O. Flores, R. A. Cortez y V. I. Rosa, "Sistema telemático de monitoreo de calidad del aire en zonas remo-

- tas, utilizando técnicas IoT y big data: fase I. Estación IoT automatizada para el monitoreo de calidad del aire por contaminantes PM_{2.5} y PM₁₀”, Universidad Tecnológica San Salvador, San Salvador, 2019. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11298/1144>
- [10] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire”, oct. 2010. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo-Calidad-del-Aire-Manual-Diseno.pdf> (accedido: mar. 10, 2024).
- [11] Y. Wang, J. Li, H. Jing, Q. Zhang, J. Jiang y P. Biswas, “Laboratory evaluation and calibration of three low-cost particle sensors for particulate matter measurement”, *Aerosol Sci Technol*, vol. 49, n.º 11, pp. 1063-1077, oct., 2015, doi: [10.1080/02786826.2015.1100710](https://doi.org/10.1080/02786826.2015.1100710).
- [12] A. Clements y R. Vanderpool. (2019). Seminario web de herramientas y recursos de la EPA – FRM/FEM y sensores: Estrategias complementarias para determinar la calidad del aire ambiental. [Presentación]. Disponible en: https://espanol.epa.gov/system/files/documents/2021-10/102821-05p_10-15-2021-spanish-y1010-082521-frm-and-air-sensors_dec-2019-tools-webinar_508-tagged-1.pdf
- [13] K. K. Johnson, M. H. Bergin, A. G. Russell y G. S. W. Hagler, “Field Test of Several Low-Cost Particulate Matter Sensors in High and Low Concentration Urban Environments”, *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 18, n.º 3, pp. 565-578, doi: [10.4209/aaqr.2017.10.0418](https://doi.org/10.4209/aaqr.2017.10.0418).
- [14] Teledyne API, “Model T640 with NumaView™ Software”, T640 PM Mass Monitor, 2023. <https://www.teledyne-api.com/products/particulate-instruments/t640> (accedido: mar. 27, 2024).
- [15] Aqicn, “Digital universal particle concentration sensor”, PMS7003 series data manual, 2016. <https://aqicn.org/air/sensor/spec/pms7003-english-v2.5.pdf> (accedido: mar. 27, 2024).
- [16] GoTronic, “Digital universal particle concentration sensor”, PMSA003 series data manual, 2016. <https://www.gotronic.fr/pj2-pmsa003-series-data-manual-english-v2-5-2083.pdf> (accedido: mar. 27, 2024).
- [17] Honeywell, “Particulate Matter Sensors”, HPM Series, 2019. <https://sps.honeywell.com/us/en/products/advanced-sensing-technologies/healthcare-sensing/particulate-matter-sensors/hpm-series> (accedido: mar. 27, 2024).
- [18] Sensirion, “Particulate Matter Sensor for Air Quality Monitoring and Control”, Datasheet SPS30, 2020. <https://cdn.sparkfun.com/assets/2/d/2/a/6/Sensirion-SPS30-Particulate-Matter-Sensor-v0.9-D1-1-.pdf> (accedido: mar. 10, 2024).
- [19] Panasonic Industry, “SN-GCJA5 Particulate Matter Laser Sensor”. Panasonic.com. <https://na.industrial.panasonic.com/products/sensors/air-quality-gas-flow-sensors/lineup/laser-type-pm-sensor/series/123557/model/123559> (accedido: mar. 27, 2024).
- [20] Environmental Protection Agency (EPA). “Ambient Monitoring Technology Information Center (AMTIC)”. EPA.com. Accedido: mar. 27, 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/amtic>
- [21] Environmental Protection Agency (EPA), “List of Designated Reference and Equivalent Methods”, Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, Carolina del Norte, fecha de emisión: jun. 15, 2020.
- [22] L. F. Orellana, “Relación entre liderazgo y la motivación al logro de los estudiantes que participan en alguna agrupación estudiantil de las facultades de Ingeniería, Humanidades, Ciencias Jurídicas y Sociales y Ciencias Empresariales”, tesis de magister, Universidad Rafael Landívar, Guatemala de la Asunción, 2015. [En línea]. Disponible en: <http://recursosbiblio.url.edu.gt/tesiseortiz/2015/05/83/Orellana-Luis.pdf>
- [23] A. C. Bustos, “Efecto de la migración venezolana sobre el desempleo en Colombia: 2012-2019”, proyecto de grado para obtener el título de economista, Fundación Universitaria Los Libertadores, Bogotá, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://repository.libertadores.edu.co/server/api/core/bitstreams/da1a9d16-269e-42b1-98ca-9d446b4070a4/content>
- [24] F. M. J. Bulot *et al.*, “Long-term field comparison of multiple low-cost particulate matter sensors in an outdoor urban environment”, *Sci Rep*, vol. 9, n.º 1, pp. 74-97, may. 2019, doi: [10.1038/s41598-019-43716-3](https://doi.org/10.1038/s41598-019-43716-3).

- [25] G. M. Polanco, “Prueba de Concepto de una Nueva Energía Renovable: La Inercia Térmica Noche-Día”, trabajo fin de máster, Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/10317/12782>
- [26] H. Li *et al.*, “Evaluation of the Performance of Low-Cost Air Quality Sensors at a High Mountain Station with Complex Meteorological Conditions”, *Atmosphere*, vol. 11, n.º 212, pp. 17 feb, 2020, [doi: 10.3390/atmos11020212](https://doi.org/10.3390/atmos11020212).
- [27] H.-Y. Liu, P. Schneider, R. Haugen y M. Vogt, “Performance Assessment of a Low-Cost PM_{2,5} Sensor for a near Four-Month Period in Oslo, Norway”, *Atmosphere*, vol.10, n.º 41, pp. 19, 2019, [doi: 10.3390/atmos10020041](https://doi.org/10.3390/atmos10020041).
- [28] H. Llinás y C. Rojas, *Estadística descriptiva y distribuciones de probabilidad*. Barranquilla, Colombia: Editorial Universidad del Norte, 2015.

CONFLICTOS DE INTERÉS

Los autores declaran que no hay conflicto de interés en la publicación del presente trabajo.