

SISTEMA DE MONITORIZACIÓN REMOTA DE LA CALIDAD DEL AIRE PARA AMBIENTES INTERIORES

Calzadilla Nápoles Otto Antonio, Romero-Herrera Rodolfo
Escuela Superior de Cómputo, Instituto Politécnico Nacional
Sección de estudios de Posgrado e Investigación
Unidad Profesional Adolfo López Mateos, Ciudad de México, México
Tel., 55 5729 6000 ext 52040
e-mail: ocalzadillan2100@alumno.ipn.mx, romeroh@ipn.mx

RESUMEN.

La monitorización de la calidad del aire es esencial para proteger la salud pública, evaluar el cumplimiento de regulaciones ambientales y preservar el medio ambiente. Proporciona información valiosa para la toma de decisiones y la implementación de acciones efectivas para mejorar la calidad del aire. El objetivo principal consistió en diseñar un sistema de monitorización remota de la calidad del aire para ambientes interiores. Se empleó un sensor de calidad del aire AM1008W para la obtención de valores de temperatura, humedad y concentración de contaminantes atmosféricos: PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂ y VOC. Se analizaron los datos obtenidos mediante la comparación con los valores medidos por un sensor Qingping CGDN1. Como resultado se validó la eficacia del sistema de monitorización desarrollado para obtener valores de concentración de contaminantes atmosféricos en ambientes interiores. Además, se desarrolló una aplicación Android que posibilita la visualización de los valores medidos en tiempo real.

Palabras Clave: Monitorización remota, contaminación del aire, análisis de datos, aplicación Android.

ABSTRACT.

Air quality monitoring is essential for protecting public health, assessing compliance with environmental regulations, and preserving the environment. It provides valuable information for decision-making and the implementation of effective actions to improve air quality. The main objective was to design a remote air quality monitoring system for indoor environments. An AM1008W air quality sensor was used to obtain values for temperature, humidity, and the concentration of atmospheric pollutants: PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, and VOC. The obtained data were analyzed by comparing them with values measured by a Qingping CGDN1 sensor. As a result, the effectiveness of the developed monitoring system in obtaining pollutant concentration values in indoor environments was validated. Additionally, an Android application was developed to allow real-time visualization of the measured values.

Keywords: Remote monitoring, air pollution, data analysis, Android application.

1. INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es uno de los mayores riesgos ambientales para la salud humana. Estudios experimentales y epidemiológicos han vinculado la exposición a contaminantes del aire con una amplia gama de efectos adversos, especialmente en grupos vulnerables como niños, mujeres embarazadas y adultos mayores con enfermedades preexistentes [1]. Estos

efectos incluyen asma, bronquitis, enfermedades cardíacas, problemas reproductivos y neurológicos, nacimientos prematuros y mortalidad infantil [2].

Cada año, la contaminación del aire causa aproximadamente 7 millones de muertes prematuras y numerosos años de vida saludable perdidos. En niños, esto puede reducir el crecimiento pulmonar y aumentar infecciones respiratorias y el asma; en adultos, las principales causas de muerte prematura son la cardiopatía isquémica y los accidentes cerebrovasculares, con evidencia creciente de efectos en diabetes y enfermedades neurodegenerativas [3]. La mayoría de la población mundial respira aire que no cumple con los estándares de calidad de la OMS, con niveles insalubres de partículas finas y dióxido de nitrógeno, afectando especialmente a países de ingresos bajos y medianos [4].

En México, la contaminación del aire, especialmente de partículas, ozono, dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre, afecta gravemente la salud, particularmente en áreas urbanas. Se recomienda a los residentes de estas zonas modificar sus hábitos para reducir la exposición y los riesgos para la salud [5]. El monitoreo de la calidad del aire es esencial para evaluar las condiciones ambientales, desarrollar estrategias de control y comunicar los riesgos. Según el Informe Nacional de Calidad del Aire de 2020 en México, en 32 de 47 ciudades y zonas metropolitanas monitoreadas, al menos una estación superó los límites permisibles de ozono [6]. Los Sistemas de Monitoreo de la Calidad del Aire (SMCA) son fundamentales para entender y gestionar la contaminación atmosférica urbana [7] [8].

Se precisa el desarrollo de sistemas de monitorización de la calidad del aire que contribuyan a la obtención de datos de contaminación atmosférica en la región y pongan a disposición de la población de forma temprana y precisa esta información.

2. TRABAJOS RELACIONADOS

En la actualidad, el monitoreo de la calidad del aire ha ganado relevancia debido al aumento de la contaminación y la disponibilidad de dispositivos económicos. Van den Bossche et al propusieron una metodología de monitoreo móvil para mapear cómo varía la calidad del aire en áreas urbanas [9]. Utilizaron sensores portátiles y vehículos equipados, demostrando que el monitoreo móvil permite captar una visión más detallada de la contaminación en comparación con los métodos fijos tradicionales. Zheng et al desarrollaron un sistema basado en

LPWA (Low-Power Wide-Area) que combina sensores de calidad del aire, una red de comunicación LPWA y una plataforma para la visualización y análisis de datos. El sistema demostró ser eficaz para la recopilación y transmisión de datos en tiempo real en entornos urbanos [10]. Phala et al crearon un sistema conforme a los estándares ISO/IEC/IEEE 21451, que incluye nodos para procesar datos y sensores para medir partículas, temperatura y humedad. La implementación mostró que el sistema es efectivo y preciso en la recolección y presentación de datos de calidad del aire [11]. Gao et al desarrollaron Mosaic, un sistema de monitoreo económico que utiliza dispositivos móviles para medir la concentración de contaminantes. Su bajo costo y facilidad de uso demostraron ser beneficiosos para la captura de datos en tiempo real [12]. Kumar and Jasuja presentaron un sistema basado en IoT que emplea un Raspberry Pi y sensores para medir la calidad del aire. Los resultados indicaron que el sistema es efectivo en la recolección y procesamiento de datos [13]. Otros trabajos destacados incluyen plataformas móviles como City Scanner [14] y sistemas portátiles como IoT-Mobair [15], que emplean tecnologías avanzadas para mejorar la recopilación y análisis de datos sobre la calidad del aire en diferentes entornos.

3. MÉTODOS.

El sistema de monitorización remota posee un Raspberry Pi 4 Model B como dispositivo de control y adquisición de datos; un sensor de calidad del aire AM1008W que posibilita la obtención de valores de temperatura ambiental, humedad relativa y de concentración de contaminantes atmosféricos: CO₂, PM₁₀, PM_{2.5} y compuestos orgánicos volátiles. Los valores medidos por el sensor AM1008W y los indicadores de funcionamiento del sistema se envían a la plataforma Initial State, que posibilita la visualización remota de los valores en tiempo real. Se desarrolla una aplicación en Android Studio que se conecta con la plataforma Initial State que propicia la visualización selectiva de la información. Además, se realiza el registro de los datos obtenidos por el sistema cada 15 minutos en una base de datos almacenada en la Micro SD que se encuentra conectada al Raspberry Pi con el objetivo de posibilitar el análisis de los datos históricos del sistema. En la Figura 1 se presenta la arquitectura del sistema de monitorización remota de la calidad del aire.

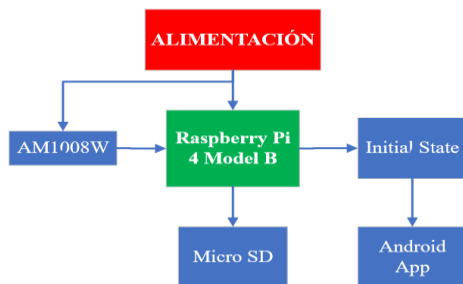


Fig. 1. Arquitectura del sistema de monitorización de la calidad del aire.

Raspberrry Pi es una placa de desarrollo de bajo costo fabricada por la Fundación Raspberry Pi (Fig. 2). El Raspberry Pi 4 Model B posee un procesador Quad core 64-bit ARM-Cortex A72 que

emplea el set de instrucciones ARMv8. En la Tabla 1 se muestran las principales características de este dispositivo.



Fig. 2. Raspberry Pi 4 Model B.

TABLA 1. Características del Raspberry Pi 4 Model B empleado en el sistema de monitorización de calidad del aire.

Características	Especificaciones
Procesador	Broadcom BCM2711, Quad-core Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit SoC @ 1.5GHz
Memoria RAM	2GB LPDDR4-3200 SDRAM
Conectividad inalámbrica	Wi-Fi 802.11ac de doble banda (2.4 GHz y 5 GHz), Bluetooth 5.0, BLE
Puertos USB	2 x USB 2.0, 2 x USB 3.0
Conectividad de red	Gigabit Ethernet
Almacenamiento	Tarjeta microSD
GPIO	40 pines GPIO
Alimentación	5V DC a través de conector USB-C

El sensor de calidad del aire para ambientes interiores AM1008W, fabricado por la empresa Cubic Ltd (Fig. 2), posee integrados sensores de PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, VOC, temperatura y humedad, que posibilitan la obtención de datos en tiempo real. Presenta un rendimiento estable, diseño de estructura compacta, múltiples funciones y formas de conexión opcionales, que posibilitan su aplicación en sistemas de purificación de aire, sistema de ventilación, aire acondicionado, entre otros. En la Tabla 2 se presentan las especificaciones técnicas de este dispositivo.



Fig. 3. Sensor de calidad del aire AM1008W.

TABLA 2. Características del sensor de calidad del aire AM1008W.

Características	Especificaciones
Principio de operación	CO ₂ : NDIR PM: dispersión láser VOC: semiconductor
Rangos de medición	PM: 0 ~ 1000 µg/m ³ CO ₂ : 0 ~ 5000 ppm VOC: 0 ~ 3 level Temperatura: -20°C ~ 70°C RH: 0-95%RH
Precisión del sensor de PM _{2.5}	0 ~ 35 µg/m ³ , ± 5 µg/m ³ > 35 µg/m ³ , ±15% of reading Condiciones: 0°C ~ 40°C, 50 ±10%RH Referencia del instrumento: TSI
Precisión del sensor de CO ₂	± (50 ppm + 5% de lectura) a 10°C~50°C, 50±10%RH
Precisión del sensor de temperatura	±1°C a 0°C ~ 40°C, 50 ± 10% RH
Precisión del sensor de humedad	±5% RH
Máxima frecuencia de muestreo	1 Hz
Comunicación	UART_TTL (3.3V TTL)
Alimentación	5V DC ± 0.1V

Como método de validación de los valores de concentración de contaminantes medidos se realiza una comparación con los datos obtenidos por un sensor de calidad del aire Qingping CGDN1 (Fig. 4) que comparte la misma ubicación del sensor desarrollado. El sistema de monitorización de calidad del aire Qingping CGDN1 posee integrados sensores de PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, temperatura y humedad. Además, posibilita la visualización en tiempo real de los valores medidos a través de la pantalla que presenta y la adquisición de los datos históricos obtenidos por el sistema se realiza mediante empleo de la aplicación Android Qingping+. En la Tabla 3 se presentan las características de este dispositivo.



Fig. 4. Qingping Air Monitor Lite CGDN1.

TABLA 3. Características del Qingping Air Monitor Lite CGDN1

Características	Especificaciones
Rangos de medición	PM: 0 ~ 500 µg/m ³ CO ₂ : 400 ~ 9999 ppm Temperatura: 0°C ~ 50°C RH: 0 - 99% RH
Intervalo de registro de datos	15 min
Conectividad	Wi-Fi 2.4GHz, Bluetooth 5.0
Alimentación	5V/1A DC
Batería	2000 mAh

4. RESULTADOS

Se realiza la medición de valores de concentración de contaminantes atmosféricos en dos ubicaciones durante un período de 9 horas continuas con el sistema de monitorización remota de calidad del aire desarrollado y el sensor Qingping CGDN1. La primera prueba experimental se ejecuta el día 11 de junio del 2023 en el interior de una residencia ubicada en el municipio de Atotonilco de Tula en el período de 1:45 AM a 11:45 AM. La segunda prueba experimental se realiza el día 13 de junio del 2023 en el interior del Laboratorio de Postgrado de la Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional en el período de 10:30 AM a 7:30 PM, en las Figura 5 y 6 se presentan las ubicaciones seleccionadas.

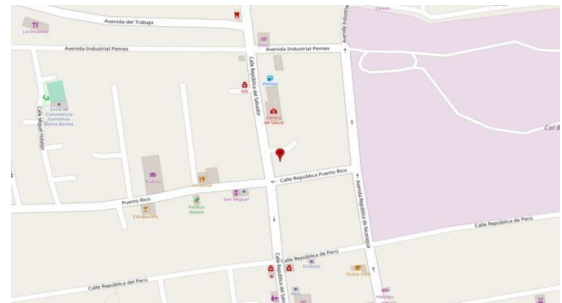


Fig. 5 Ubicación del sistema de monitorización remota durante la medición en Atotonilco de Tula.



Fig. 6 Ubicación del sistema de monitorización remota durante la medición en CDMX.

En el análisis de los datos registrados por el sistema de monitorización remota de la calidad del aire desarrollado y el sensor Qingping CGDN1 en el municipio de Atotonilco de Tula se obtienen valores de error absoluto promedio en las mediciones

de $\text{CO}_2 = 52.8 \text{ ppm}$, $\text{PM}_{10} = 6.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $\text{PM}_{2.5} = 4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En las Figuras 7, 8 y 9 se presentan las gráficas de los valores de concentración de contaminantes atmosféricos medidos por los sistemas.

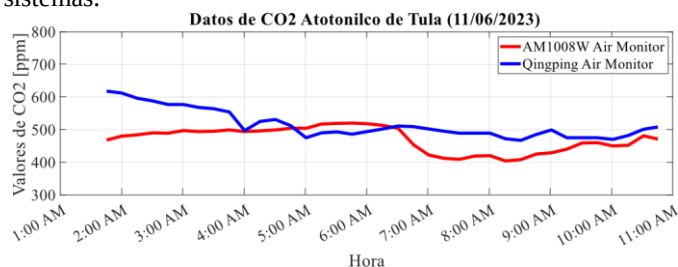


Fig. 7. Datos de CO_2 obtenidos con el sistema desarrollado y el Qingping Air Monitor en Atotonilco de Tula.

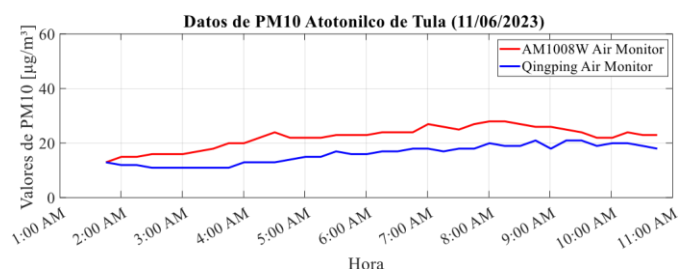


Fig. 8. Datos de PM_{10} obtenidos con el sistema desarrollado y el Qingping Air Monitor en Atotonilco de Tula.

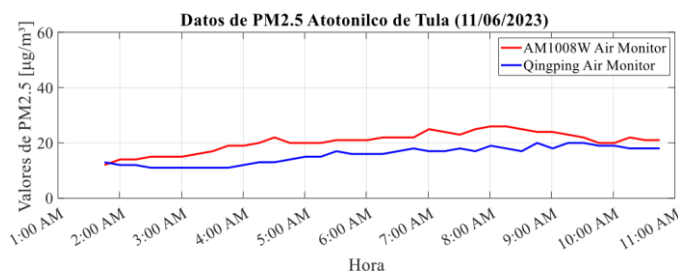


Fig. 9. Datos de $\text{PM}_{2.5}$ obtenidos con el sistema desarrollado y el Qingping Air Monitor en Atotonilco de Tula.

En el análisis de los datos registrados por el sistema de monitorización remota de la calidad del aire desarrollado y el sensor Qingping CGDN1 en la Ciudad de México se obtienen valores de error absoluto promedio en las mediciones de $\text{CO}_2 = 72.9 \text{ ppm}$, $\text{PM}_{10} = 4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $\text{PM}_{2.5} = 4.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En las Figuras 10, 11 y 12 se presentan las gráficas de los valores de concentración de contaminantes atmosféricos medidos por los sistemas.

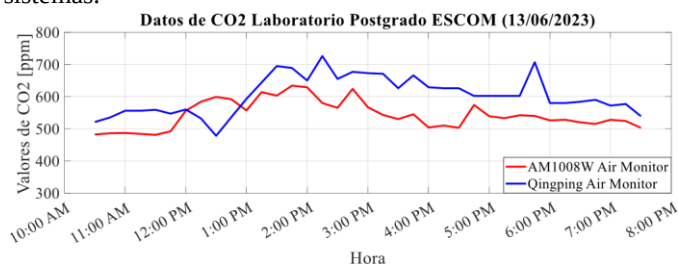


Fig. 10. Datos de CO_2 obtenidos con el sistema desarrollado y el Qingping Air Monitor en la ESCOM.

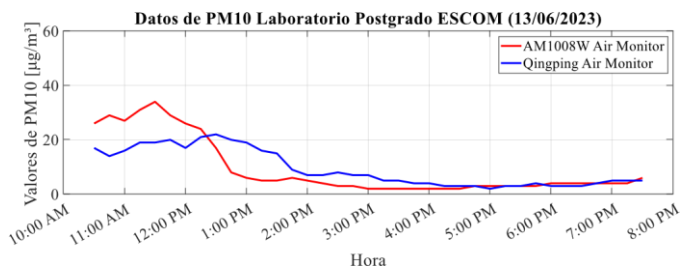


Fig. 11. Datos de PM_{10} obtenidos con el sistema desarrollado y el Qingping Air Monitor en la ESCOM.

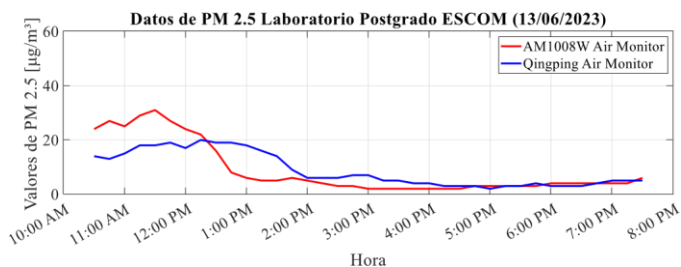


Fig. 12. Datos de $\text{PM}_{2.5}$ obtenidos con el sistema desarrollado y el Qingping Air Monitor en la ESCOM.

Estos valores de error absoluto promedio obtenidos se encuentran dentro de los rangos de incertidumbre en la medición de los sensores empleados, en correspondencia con sus especificaciones de precisión en la medición de cada uno de los contaminantes atmosféricos. Por lo tanto, validan la eficacia del sistema de monitorización de la calidad del aire desarrollado para obtener valores de concentración de contaminantes atmosféricos en ambientes interiores.

Se realizó la comparación entre los promedios horarios de valores de $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} , obtenidos por el sistema de monitorización desarrollado, y la estación de monitoreo del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (SINAICA) más cercana a las ubicaciones donde se ejecutó la medición durante las pruebas experimentales. En el municipio de Atotonilco de Tula, la distancia existente entre la ubicación del sistema de monitorización de calidad del aire desarrollado y la estación del monitoreo Primaria Revolución es de 540 metros. Mientras que en la Ciudad de México la distancia existente entre la ubicación donde se obtuvieron datos de calidad del aire con el sistema de monitorización desarrollado y la estación del monitoreo Camarones es de 5 kilómetros. En las Figuras 13 y 14 se muestran las ubicaciones del sistema de monitorización remota durante la medición y la estación de monitoreo del SINAICA más cercana.

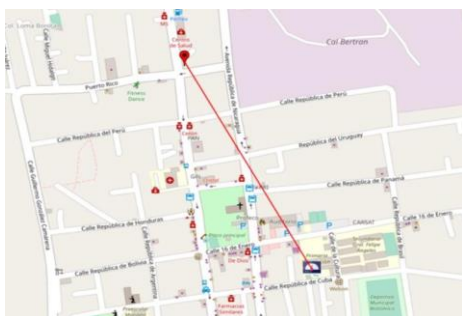


Fig. 13. Ubicación del sistema de monitorización remota durante la medición en Atotonilco de Tula y de la estación de calidad del aire Primaria Revolución.

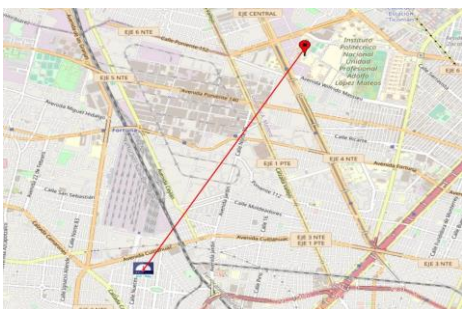


Fig. 14. Ubicación del sistema de monitorización remota durante la medición en CDMX y de la estación de calidad del aire Camarones.

En el análisis de los promedios horarios de valores de contaminantes obtenidos en el municipio de Atotonilco de Tula por el sistema de monitorización desarrollado y la estación de monitoreo Primaria Revolución se obtuvieron diferencias máximas en los promedios horarios de $PM_{10} = 79.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $PM_{2.5} = 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En las Figuras 15 y 16 se presentan las gráficas de los promedios horarios de valores de contaminantes obtenidos en esta localidad.

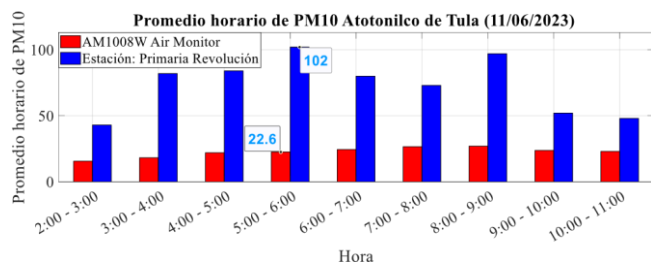


Fig. 15. Promedio horario de los valores de PM_{10} obtenidos con el sistema desarrollado y la estación de monitoreo Primaria Revolución.

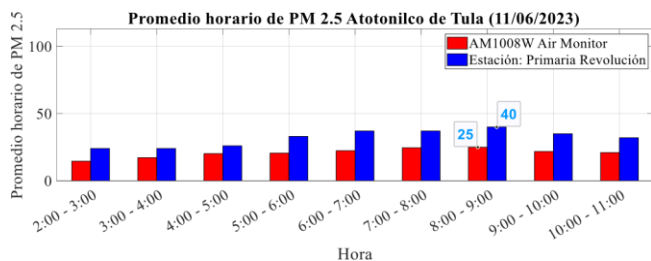


Fig. 16. Promedio horario de los valores de $PM_{2.5}$ obtenidos con el sistema desarrollado y la estación de monitoreo Primaria Revolución.

En el análisis de los promedios horarios de valores de contaminantes obtenidos en la Ciudad de México por el sistema de monitorización desarrollado y la estación de monitoreo Primaria Revolución se obtienen diferencias máximas en los promedios horarios de $PM_{10} = 40.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $PM_{2.5} = 22.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En las Figuras 17 y 18 se presentan las gráficas de los promedios horarios de valores de contaminantes obtenidos en esta localidad.

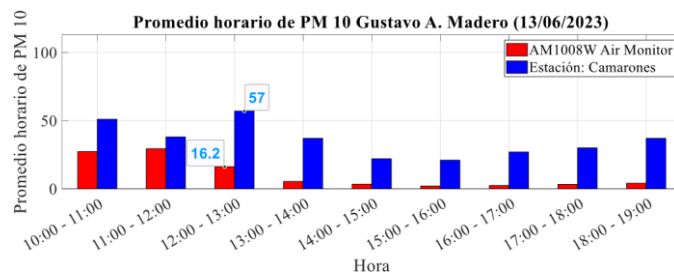


Fig. 17. Promedio horario de los valores de PM_{10} obtenidos con el sistema desarrollado y la estación de monitoreo Camarones.

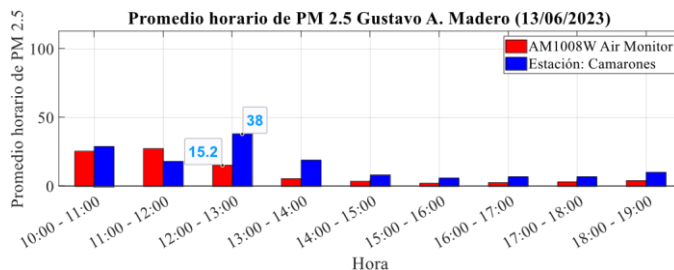


Fig. 18. Promedio horario de los valores de $PM_{2.5}$ obtenidos con el sistema desarrollado y la estación de monitoreo Camarones.

Los resultados de las comparaciones demuestran la elevada variabilidad espacial que presentan los valores de concentración de contaminantes atmosféricos.

Con el objetivo de posibilitar la visualización remota en tiempo real de los valores medidos por el sistema de monitorización de la calidad del aire y sus indicadores de funcionamiento se desarrolla una aplicación Android. En la Figura 19 se presenta la interfaz gráfica del sistema, donde se visualizan los valores de concentración de contaminantes medidos. En la Figura 20 se presentan los indicadores de funcionamiento del sistema.

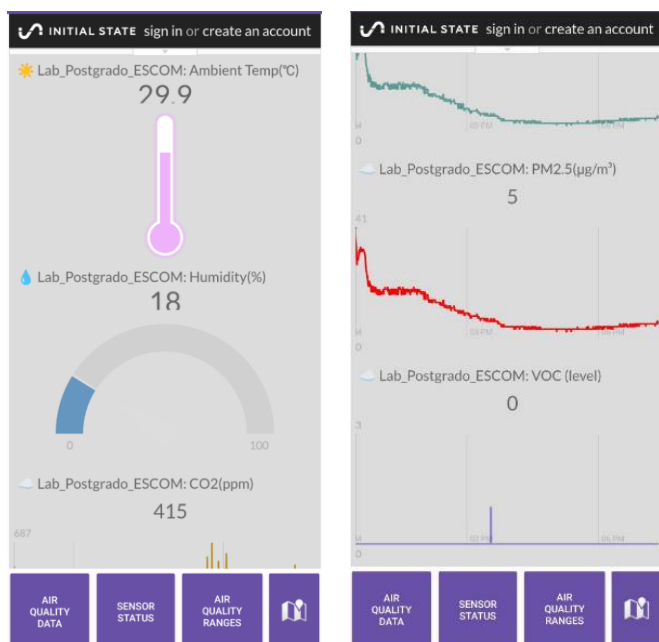


Fig. 19 Interfaz gráfica

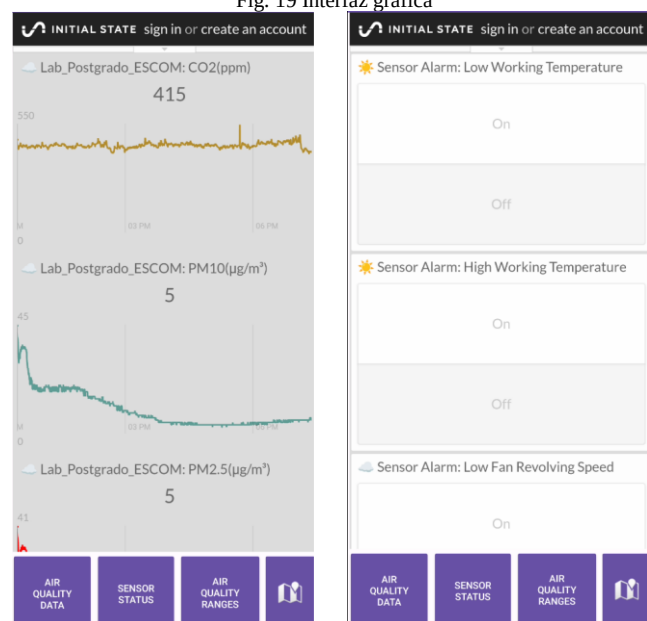


Fig. 20 Indicadores

5. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema de monitorización remota de la calidad del aire para interiores que posee un sensor AM1008W que posibilita la medición de humedad, temperatura y concentración de contaminantes atmosféricos PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂ y VOC.

Se obtuvieron valores máximos de error absoluto promedio en la medición de contaminantes CO₂ = 72.9 ppm, PM₁₀ = 6.2 µg/m³ y PM_{2.5} = 4.9 µg/m³ en el análisis de los datos obtenidos en las pruebas experimentales, estos valores se encuentran

dentro de los rangos de incertidumbre en la medición de los sensores empleados, y validan la efectividad del sistema desarrollado para medir la concentración de los contaminantes atmosféricos.

En la comparación de los valores de concentración de contaminantes atmosféricos medidos por el sistema de monitorización de calidad del aire desarrollado, y la estación del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire más cercana, se obtuvieron diferencias máximas de PM₁₀ = 79.4 µg/m³ y PM_{2.5} = 22.8 µg/m³, que demuestran la elevada variabilidad espacial que presentan las concentraciones de estos contaminantes en la Zona Metropolitana del Valle de México. Se desarrolló una aplicación Android que posibilita la visualización en tiempo real de los valores medidos.

6. REFERENCIAS

- [1] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). (2016). Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease. Disponible en <http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/250141/9789241511353eng.pdf?sequence=1>.
- [2] Kim, K.-H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment international*, 74, 136-143.
- [3] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). (2021). New WHO Global.
- [4] WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). (2022). Billions of people still breathe unhealthy air: new WHO data. Disponible en <https://www.who.int/news/item/04-04-2022-billions-of-people-still-breatheunhealthy-air-new-who-data>.
- [5] NORMA Oficial Mexicana NOM-022-SSA1-2019 (NOM). (2019). Salud ambiental. Criterio para evaluar la calidad del aire ambiente, con respecto al dióxido de azufre (SO₂). Valores normados para la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en el aire ambiente, como medida de protección a la salud de la población NORMA Oficial Mexicana NOM-172-SEMARNAT-2019 (NOM). (2019). Lineamientos para la obtención y comunicación del Índice de Calidad del Aire y Riesgos a la Salud.
- [6] Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2022). Informe Nacional de la Calidad del Aire 2020, México. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos. Ciudad de México.
- [7] NORMA Oficial Mexicana NOM-020-SSA1-2014 (NOM). (2014). Salud ambiental. Valor límite permisible para la concentración de ozono (O₃) en el aire ambiente y criterios para su evaluación.
- [8] Karagulian, F., Barbieri, M., Kotsev, A., Spinelle, L., Gerboles, M., Lagler, F., Redon, N., Crunaire, S., & Borowiak, A. (2019). Review of the performance of low-cost sensors for air quality monitoring. *Atmosphere*, 10(9), 506.
- [9] Van den Bossche, J., Peters, J., Verwaeren, J., Botteldooren, D., Theunis, J., & De Baets, B. (2015). Mobile monitoring for mapping spatial variation in urban air quality: Development and validation of a methodology based on an extensive dataset. *Atmospheric Environment*, 105, 148-161.
- [10] Zheng, K., Zhao, S., Yang, Z., Xiong, X., & Xiang, W. (2016). Design and implementation of LPWA-based air quality monitoring system. *IEEE Access*, 4, 3238-3245.
- [11] Phala, K. S. E., Kumar, A., & Hancke, G. P. (2016). Air quality monitoring system based on ISO/IEC/IEEE 21451 standards. *IEEE Sensors Journal*, 16(12), 5037-5045.
- [12] Gao, Y., Dong, W., Guo, K., Liu, X., Chen, Y., Liu, X., Bu, J., & Chen, C. (2016). Mosaic: A low-cost mobile sensing system for urban air quality monitoring. *IEEE INFOCOM 2016-The 35th Annual IEEE International Conference on Computer Communications* (pp. 1-9). IEEE.

- [13] Kumar, S., & Jasuja, A. (2017). Air quality monitoring system based on IoT using Raspberry Pi. 2017 International conference on computing, communication and automation (ICCCA).
- [14] Anjomshoaa, A., Duarte, F., Rennings, D., Matarazzo, T. J., deSouza, P., & Ratti, C. (2018). City scanner: Building and scheduling a mobile sensing platform for smart city services. IEEE Internet of things Journal, 5(6), 45674579.
- [15] Dhingra, S., Madda, R. B., Gandomi, A. H., Patan, R., & Daneshmand, M. (2019). Internet of Things mobile-air pollution monitoring system (IoTMobair). IEEE Internet of things Journal, 6(3), 5577-5584.