

IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO IoT PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN INTERIORES DE AUTOBUSES

IMPLEMENTATION OF AN IoT DEVICE FOR INDOOR AIR QUALITY ASSESSMENT IN BUSES

Marco Aurelio Cárdenas Juárez

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
marco.cardenas@uaslp.mx

Rafael Aguilar González

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
rafael.aguilar@uaslp.mx

Yubili Dayán Ramos Barbosa

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
a343419@alumnos.uaslp.mx

Jorge Simón Rodríguez

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México
jorge.sr@uaslp.mx

Salvador Ruiz Correa

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, México
salvador.ruiz@ipicyt.edu.mx

Recepción: 26/noviembre/2024

Aceptación: 24/junio/2025

Resumen

Vigilar la calidad del aire en interiores es relevante, ya que las personas pasan el 90% de su tiempo en espacios cerrados, donde los aerosoles exhalados pueden permanecer suspendidos largos periodos, aumentando el riesgo de enfermedades respiratorias. El transporte público en México es un ambiente dinámico que confina muchas personas en espacios reducidos durante las horas pico. Este estudio contextualiza un dispositivo IoT con un sensor de bajo costo para monitorear materia particulada (PM) 2.5 y PM10 en tres rutas de autobús, realizando campañas de medición y analizando los datos bajo diversas condiciones de ventilación y ocupación. Los resultados muestran los niveles PM a los que se expone un usuario de autobús en horas pico y corroboran que el uso de las tecnologías IoT ofrecen

una solución accesible para el monitoreo continuo de la calidad del aire en interiores y puede apoyar la implementación de políticas de salud pública.

Palabras Clave: Calidad del aire, IoT, Interiores, PM2.5, PM10.

Abstract

Monitoring indoor air quality is relevant, as people spend 90% of their time indoors, where exhaled aerosols can remain suspended for long periods, increasing the risk of respiratory diseases. Public transport in Mexico is a dynamic environment that confines many people in small spaces during peak hours. This study contextualizes an IoT device with a low-cost sensor to monitor particulate matter (PM) 2.5 and PM10 on three bus routes, conducting measurement campaigns and analyzing the data under various ventilation and occupancy conditions. The results show the PM levels to which a regular bus user is exposed during peak hours and corroborate that IoT technologies offer an accessible solution for continuous indoor air quality monitoring and might support the implementation of public health policies.

Keywords: Air quality, Indoor, IoT, PM2.5, PM10.

1. Introducción

La calidad del aire en interiores (IAQ, por sus siglas en inglés) ha recibido una atención significativa en los últimos años debido a su impacto directo en la salud de las personas. Particularmente, la exposición prolongada a aerosoles y partículas en suspensión puede incrementar el riesgo de desarrollar enfermedades respiratorias. Este problema es especialmente crítico en espacios cerrados y altamente concurridos, donde la ventilación es insuficiente.

El Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) es una tecnología que permite abordar el reto de evaluar la calidad del aire en interiores y que juega un papel fundamental en la implementación de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). En [Verdejo, 2021], se examina cómo las aplicaciones del IoT pueden contribuir a alcanzar los ODS, especialmente en el ámbito de la salud pública y la eficiencia energética, ya que promueven sistemas de salud socialmente inteligentes. Este

enfoque permite una gestión más eficiente de los recursos y una mejor calidad de vida para las personas al reducir la huella ambiental y mejorar la salud pública.

La implementación del IoT en diversas áreas ha sido objeto de numerosos estudios a lo largo de la última década. En [Patel, 2019], se realiza un análisis detallado del impacto del IoT en las aplicaciones de salud a lo largo de diez años. Los autores señalan que el crecimiento de dispositivos de monitoreo de salud conectados a internet ha revolucionado la industria global de la salud al proporcionar detalles sobre diversas variables fisiológicas y exámenes físicos de forma rápida, lo que permite a los médicos diagnosticar eficientemente problemas críticos, por ejemplo, los relacionados con el corazón. Este estudio resalta la capacidad del IoT para ofrecer interacciones en tiempo real entre médicos y pacientes, facilitando así el monitoreo remoto de la salud y mejorando significativamente la atención médica. En [Nagarajan, 2021], los autores presentan un estudio sobre el IoT y sus aplicaciones en el cuidado inteligente de la salud (en inglés, *smart health*). Los autores destacan cómo el IoT, combinado con la inteligencia artificial (IA), puede transformar los sistemas de salud al proporcionar una vigilancia continua y en “tiempo real” de parámetros críticos sobre de los pacientes. Esta convergencia de tecnologías permite no solamente la recolección de datos, sino también el análisis avanzado y la implementación de respuestas automáticas que ayudan a reducir los riesgos para la salud. Las aplicaciones del IoT también se extienden a la monitorización ambiental. En [Ahmad, 2021], los autores proponen un sistema de monitoreo inteligente de un espacio residencial basado en cómputo en la nube y el IoT. Este sistema permite la recolección de datos de parámetros ambientales, como la temperatura, la humedad y los niveles de gases tóxicos, utilizando sensores distribuidos en el entorno. Los datos recolectados son procesados en la nube. Los resultados de las pruebas realizadas demostraron que el sistema puede proporcionar datos precisos y en “tiempo real”, mejorando así la comodidad y seguridad del entorno habitacional. La monitorización de la calidad del aire en interiores es fundamental, ya que la mayoría de las personas pasan más del 90% de su tiempo en ambientes cerrados. En [Liu, 2021], se describe un sistema de monitoreo de calidad del aire en interiores basado en IoT, que emplea múltiples

puntos de detección para medir CO₂, materia particulada (PM) 2.5, temperatura y humedad. Este sistema utiliza una red Zigbee para transmitir los datos recolectados por los sensores a una plataforma en la nube, donde los usuarios autorizados pueden acceder a la información a través de aplicaciones móviles o navegadores web. Los resultados del estudio mostraron que las concentraciones de PM_{2.5} pueden aumentar significativamente durante actividades como la cocción, y que los niveles de CO₂ pueden alcanzar niveles peligrosos cuando las ventanas están cerradas. Este enfoque multi-punto proporciona una visión detallada y en “tiempo real” de la calidad del aire en diferentes áreas de un edificio, permitiendo tomar decisiones informadas para mejorar las condiciones ambientales. La implementación de sistemas de monitoreo de la calidad del aire basados en sensores IoT comerciales y accesibles es un enfoque práctico y eficiente para mejorar la IAQ. En [Yasin, 2022], los autores detallan el diseño e implementación de un sistema de monitoreo de IAQ utilizando dispositivos disponibles en el mercado. Este estudio proporciona una guía para la selección de sensores, la integración de datos y otras consideraciones importantes al utilizar estos dispositivos. Los resultados demostraron que el sistema puede adaptarse a diferentes escenarios con modificaciones menores y proporcionar la flexibilidad para intercambiar componentes según sea necesario. Los datos recolectados pueden integrarse fácilmente en software de análisis de código abierto para visualización y toma de decisiones informadas respecto a la IAQ.

Para abordar los desafíos relacionados con los compuestos orgánicos volátiles (VOC, por sus siglas en inglés) en la calidad del aire interior, también se han desarrollado esquemas de control adaptativo. Por ejemplo, en [Hung, 2020], se presenta un esquema de control adaptativo para minimizar la densidad de compuestos orgánicos volátiles utilizando una combinación de lógica difusa y algoritmos genéticos. Este esquema, denominado FGMLCS (del inglés *fuzzy genetic multi-layer control scheme*), puede ajustar los niveles de ventilación y otros parámetros ambientales en función de los niveles de VOC detectados. Los resultados demostraron las mejoras a la calidad del aire interior, reduciendo los riesgos asociados a la salud. La eficiencia energética y la monitorización inteligente

son aspectos importantes en la implementación de tecnologías IoT para la calidad del aire interior. En [Esfahani, 2020], se explora cómo el uso de sensores basados en eventos puede mejorar la eficiencia energética de los nodos IoT en el monitoreo de la calidad del aire. Este caso de estudio sobre monitoreo de la calidad del aire en ciudades inteligentes demuestra que los sensores activados por eventos pueden reducir significativamente el consumo de energía, prolongando la vida útil de las baterías y mejorando la sostenibilidad del sistema de monitoreo. La monitorización de la calidad del aire es vital para prevenir y controlar enfermedades respiratorias, especialmente en poblaciones vulnerables como niños asmáticos. En [Khan, 2020], se examina el impacto de las concentraciones de PM en la tasa de flujo espiratorio máxima (PEFR, por sus siglas en inglés) de niños asmáticos. Los autores encontraron una correlación significativa entre los niveles de PM_{2.5} y la reducción del PEFR, destacando la necesidad de un monitoreo constante y preciso de la calidad del aire para proteger la salud de estas poblaciones vulnerables. El estudio enfatiza la importancia de integrar sistemas de monitoreo de calidad del aire basados en IoT para proporcionar datos en tiempo real que puedan ser utilizados para tomar decisiones informadas y mejorar la calidad de vida de los niños asmáticos.

En [Li, 2020], se revisan las tendencias recientes y las direcciones futuras en la monitorización de la calidad del aire en interiores, destacando la importancia de desarrollar tecnologías avanzadas para la detección y análisis de contaminantes del aire. Los autores subrayan que la integración de sistemas de monitoreo basados en IoT con técnicas de inteligencia artificial puede mejorar significativamente la precisión y eficiencia del monitoreo de la calidad del aire.

Los estudios anteriores nos permiten dimensionar la variedad de escenarios en los que la calidad del aire en interiores juega un papel importante. En este contexto, un estudio para conocer el estado del ambiente en el transporte público, acorde al tiempo, espacio y número de personas, fue presentado en [Salthammer, 2022]. En este trabajo, se demuestra la importancia de medir la calidad del aire en interiores, la relación entre personas y el dióxido de carbón, así como las ventajas de ventilar estos espacios. También, en [Correia, 2023], se presenta la implementación de

sensores de costo accesible instalados en autobuses para medir la calidad del aire. En este caso, los resultados muestran que dependiendo de la ruta y la hora del día la calidad del aire puede empeorar. Con lo cual se puede alertar a la población anticipadamente para tomar medidas preventivas. Otro trabajo de campo para medir la contaminación de aire en autobuses fue presentado en [Zhao, 2023]. En ese estudio, se tomaron muestras de campo de partículas PM 2.5, mostrando los altos niveles de exposición a los que se someten las personas cuando el autobús aumenta el número de pasajeros. Una recomendación adicional que se menciona aquí es la necesidad constante de ventilación para evitar infecciones por virus.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la calidad del aire en interiores de autobuses del transporte público en México y contextualizar la implementación de un dispositivo IoT equipado con un sensor de PM2.5 y PM10 de bajo costo. Para ello, se presenta la instrumentación de un monitor portátil de la calidad del aire, equipado con sensores PM2.5 y PM10, cuyas lecturas se envían a la plataforma ThingSpeak a través de Internet para su visualización remota, almacenamiento y posterior análisis. Las mediciones se realizan en horario pico, por tramos de distintas rutas de autobuses urbanos; escenarios caracterizados por su alta ocupación, muchas veces por encima del máximo permitido que, por lo tanto, representan potenciales fuentes de contaminación. Este nos permite la recolección de los datos de calidad del aire a los que se expone un usuario regular en sus traslados diarios. Los resultados muestran que las concentraciones de PM2.5 y PM10 pueden alcanzar niveles muy altos en dichos ambientes de uso común entre la población, destacando la importancia de realizar mediciones extensas para conocer la IAQ en periodos largos, así como para la implementación de políticas para que cuenten con una ventilación adecuada y su monitoreo continuo para mantener niveles seguros de calidad del aire en beneficio de los usuarios.

2. Métodos

Selección de componentes

Para la integración del monitor, se seleccionó la placa ESP32 debido a su bajo costo, bajo consumo energético y capacidad para establecer conexiones Bluetooth

y Wi-Fi. La elección de los sensores se basó en la necesidad de medir temperatura y PM. Las partículas en suspensión, como PM2.5 y PM10, son contaminantes clave que provienen de la quema de combustibles, el tráfico y la industria. Particularmente, PM2.5, con un diámetro menor a $2.5 \mu m$, puede penetrar profundamente en los pulmones y el sistema cardiovascular, mientras que PM10, con un diámetro menor a $10 \mu m$, afecta principalmente las vías respiratorias superiores. Monitorear y controlar estos contaminantes es importante para reducir riesgos de salud, especialmente en ambientes interiores. La Tabla 1 presenta los límites máximos de estas partículas, de acuerdo con las directrices de la Organización Mundial de la Salud [OMS, 2021]. En 24 horas, el promedio de PM2.5 no debe ser mayor a $15 \mu g/m^3$, mientras que, para PM10 no debe de ser mayor a $45 \mu g/m^3$. En nuestro estudio, sin embargo, los periodos de medición son menores ya que emulan los traslados de un usuario regular del transporte público.

Tabla 1 Niveles máximos permitidos de PM2.5 y PM10.

Contaminante	Promedio Anual ($\mu g/m^3$)	Promedio de 24 Horas ($\mu g/m^3$)
PM2.5	5	15
PM10	15	45

Fuente: elaboración propia

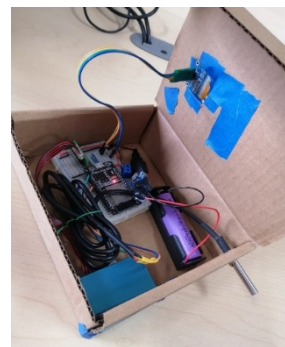
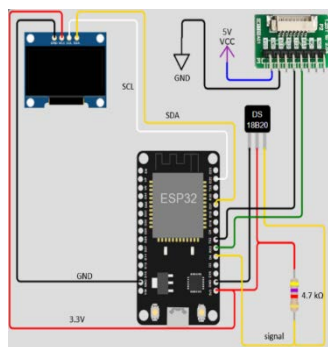
Considerando lo anterior, se seleccionaron y utilizaron los siguientes sensores:

- **Sensor de Temperatura DS18B20:** Este sensor permite medir temperaturas desde -50 hasta $125^\circ C$ de manera sencilla y precisa.
- **Sensor de Materia Particulada PMS5003:** Este sensor mide tres tipos de partículas: PM1.0, PM2.5 y PM10. Es importante mencionar que, inicialmente, el sensor dejaba de funcionar después de un número de mediciones, sin embargo, este problema se solucionó implementando una función en el ESP32 que reinicia el sensor después de cada 8 mediciones; un proceso que toma aproximadamente 2 minutos.

Instrumentación del monitor

El dispositivo se desarrolló integrando una placa ESP32, los sensores DS18B20 y PMS5003, y una pantalla OLED para visualizar las lecturas de los sensores. La

pantalla se actualiza con cada medición tomada por el sensor cada 30 s y los datos se envían a la plataforma ThingSpeak cada 90 s. El periodo de 30 s se estableció para capturar las variaciones de calidad del aire de un ambiente dinámico, como un autobús, en donde el número de pasajeros y las condiciones de ventilación cambian constantemente. El periodo de 90 s se seleccionó para ofrecer un consumo razonable de datos, ya que el acceso a internet del dispositivo es proporcionado por un teléfono móvil a través de la red celular, al que se conecta el dispositivo. El monitor incluye una batería para asegurar su portabilidad por un usuario de autobús. En la Figura 1a, se observa el diagrama de conexiones del dispositivo y los sensores. En la Figura 1b, se aprecia el prototipo del dispositivo instalado en una carcasa provisional, junto a los componentes físicos.



a) Diagrama de conexiones del dispositivo IoT. b) Prototipo del dispositivo en carcasa provisional.
Fuente: elaboración propia

Figura 1 Diagrama de conexiones y prototipo del dispositivo IoT.

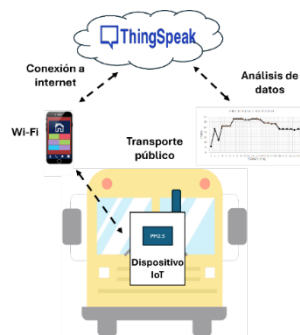
Procedimiento de medición

Las mediciones se realizaron emulando las rutas del trayecto real de un usuario regular del transporte público desde su casa a la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Cada traslado se encuentra bajo diferentes condiciones de ventilación y densidad de pasajeros en horarios matutino y vespertino en las siguientes rutas de autobuses urbanos:

- Ruta 9: densidad de pasajeros media ($< 70\%$) y alta ($> 70\%$) con ventilación media y buena, respectivamente.
- Ruta 11: densidad de pasajeros media ($> 60\%$) y baja ($< 50\%$) con ventilación buena y baja, respectivamente.

- Ruta 36: densidad de pasajeros baja ($< 50\%$) y buena ventilación.

El procedimiento de campo para realizar las mediciones se ilustra en la Figura 2. Las muestras fueron tomadas por un investigador, quien abordaba las unidades de transporte público y se situaba, en la medida de lo posible, en la parte central del autobús, en donde encendía el dispositivo para comenzar a recabar información. Los datos recolectados incluyeron las concentraciones de PM_{2.5} y PM₁₀, y la temperatura ambiente. Estos datos fueron capturados durante todos los recorridos y enviados directamente a la plataforma Thingspeak.



Fuente: elaboración propia

Figura 2 Procedimiento de medición.

El análisis de la información recolectada fue realizado posterior al proceso de medición, sin embargo, los datos fueron apreciados por el resto del equipo de investigadores en “tiempo real” de forma remota a través de la plataforma, quienes pudieron monitorear los niveles de PM a los que se exponía el investigador en el autobús. Las mediciones de temperatura se descartaron posteriormente en el análisis al no mostrar correlación con los niveles de PM.

Procesamiento de Datos

Los datos se descargaron de Thingspeak para su procesamiento y evaluación de la calidad del aire que experimenta un usuario regular del transporte público. Esto se realiza mediante la presentación de gráficas de los niveles de PM_{2.5} y PM₁₀ para cada trayecto y comparando los resultados obtenidos en diferentes condiciones.

3. Resultados

Se presentan los resultados para cada escenario estudiado, comparando las concentraciones de PM2.5 y PM10 con los niveles máximos permitidos establecidos por las directrices internacionales. Por simplicidad, con fines de apropiación social del conocimiento, se utiliza la clasificación del estado de la calidad del aire que se presenta en la Tabla 2, con el propósito de tener una interpretación accesible sobre la relevancia de los resultados obtenidos. En la Tabla 3 se presenta un resumen de las campañas de medición en los escenarios estudiados: tres rutas de transporte urbano por la mañana y por la tarde.

Tabla 2 Clasificación del estado de la calidad del aire.

Estado de calidad del aire	PM2.5 ($\mu g/m^3$)	PM10 ($\mu g/m^3$)
Muy Bueno	0 – 10	0 – 20
Bueno	11 – 20	21 – 35
Regular	21 – 25	36 – 50
Malo	26 – 50	51 – 100
Muy Malo	51 – 800	110 – 1200

Fuente: elaboración propia

Tabla 3 Resumen de las mediciones de PM2.5 y PM10.

Ruta de autobús	Horario	Ventilación	Capacidad estimada	PM2.5 ($\mu g/m^3$)	PM10 ($\mu g/m^3$)
Ruta 9	Matutino	Media	< 70%	06-33	06 – 37
Ruta 9	Vespertino	Buena	< 70%	17-54	24 – 58
Ruta 11	Matutino	Buena	> 60%	21-35	22 – 38
Ruta 11	Vespertino	Baja	< 50%	10-52	12 – 62
Ruta 36	Matutino	Buena	< 50%	1.9-41	2.1 – 49
Ruta 36	Vespertino	Buena	< 50%	20-54	16 – 66

Fuente: elaboración propia

En la Figura 3 se muestran los resultados de las mediciones de PM2.5 y PM10, respectivamente, para la ruta 9 de autobús urbano en horario matutino. En este horario, la capacidad del autobús era aproximadamente menor al 70%, y su ventilación era media (i.e., al menos la mitad de las ventanas cerradas). Durante los 25 min del trayecto, el PM2.5 alcanzó un nivel máximo de 33 $\mu g/m^3$ y el PM10 un nivel máximo de 37 $\mu g/m^3$, que se clasifican como estados malo y regular, respectivamente. En la Figura 4 se presentan los resultados de las mediciones de PM2.5 y PM10, respectivamente, para la ruta 9 de autobús urbano en horario

vespertino. Aunque la ventilación del autobús podía ser considerada como buena (i.e. se estimaron más de la mitad de las ventanas abiertas), se superaba el 70% de su capacidad, aproximadamente. En los 22 *min* de duración del trayecto, el PM2.5 alcanzó un nivel máximo de $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el PM10 un nivel máximo de $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que se clasifican como estados muy malo y malo, respectivamente.

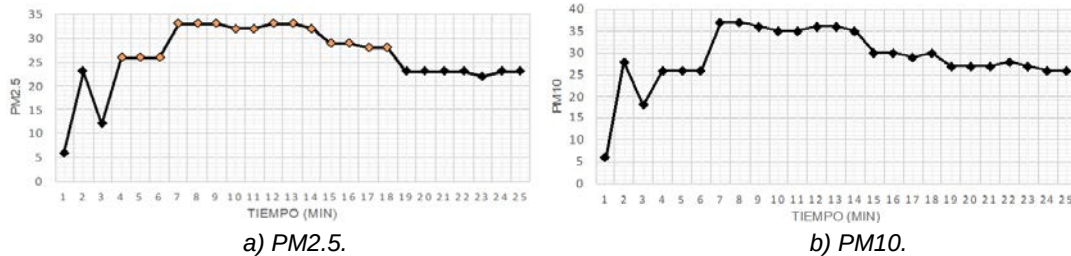


Figura 3 Resultados de mediciones de PM para la Ruta 9 en horario matutino.

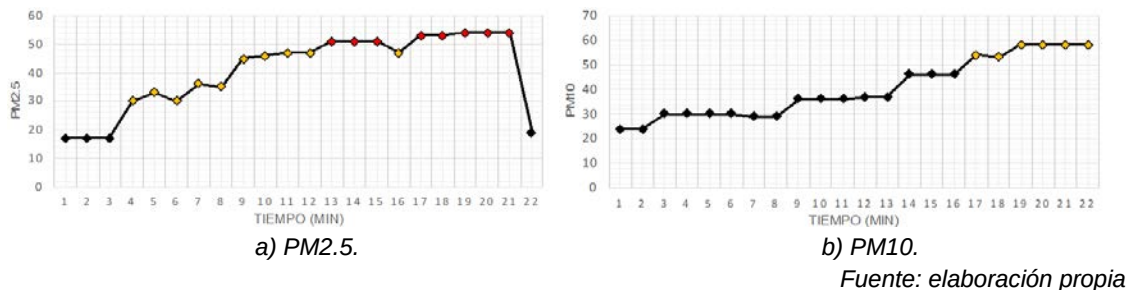
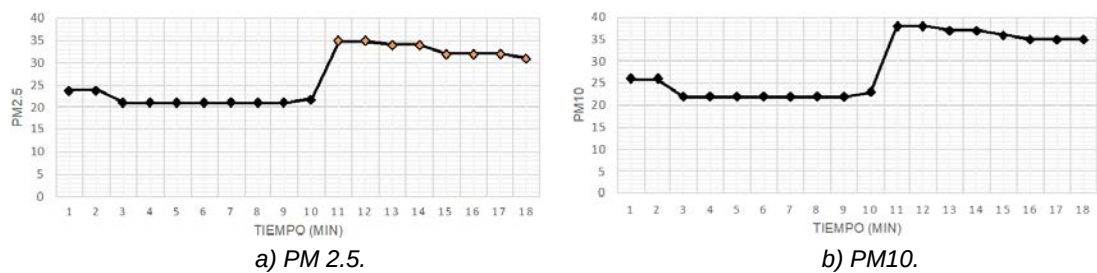


Figura 4 Resultados de mediciones de PM para la Ruta 9 en horario vespertino.

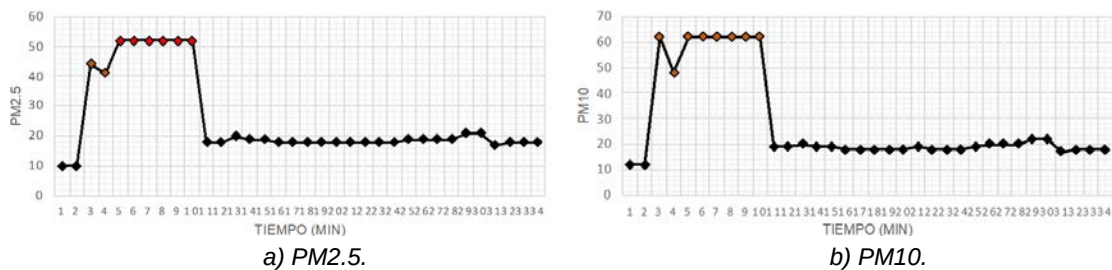
La Figura 5 muestra los resultados correspondientes a la ruta 11 de transporte urbano en horario matutino para PM2.5 y PM10. El trayecto tuvo una duración de 18 *min* y el autobús contaba con buena ventilación y se encontraba al menos al 60% de su capacidad. De forma similar al caso anterior, en este escenario, el PM2.5 alcanzó un nivel máximo de $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el PM10 un nivel máximo de $38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que se clasifican como estados malo y regular, de forma respectiva. Para la misma ruta 11, pero en horario vespertino, se realizó un trayecto de 34 *min* sin buena ventilación, pero con una ocupación estimada menor al 50%. Durante cierto periodo del trayecto, cuando se contaba con mayor ocupación, el PM2.5 alcanzó un nivel máximo de $52 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y el PM10 un nivel máximo de $62 \mu\text{g}/\text{m}^3$, que se clasifican como estados muy malo y malo, respectivamente, Figura 6. En la Figura 7 se

observan los datos del trayecto realizado en la ruta 36 del transporte urbano en horario matutino. Se puede observar que los niveles máximos de PM_{2.5} y PM₁₀ alcanzaron 41 y 52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que se clasifican como malo y regular, respectivamente. Cabe aclarar que la ventilación del autobús era buena, y se encontraba a menos de la mitad de su capacidad máxima. En condiciones similares de ventilación y capacidad se encontraba la misma ruta en horario vespertino, sin embargo, en esta medición, los valores máximos para PM_{2.5} y PM₁₀ alcanzaron 54 y 66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, clasificados como una calidad de aire muy mala y mala, respectivamente, Figura 8.



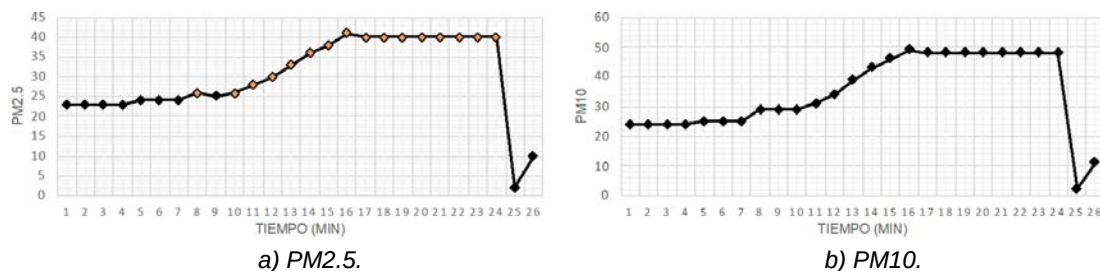
Fuente: elaboración propia

Figura 5 Resultados de mediciones de PM para la Ruta 11 en horario matutino.



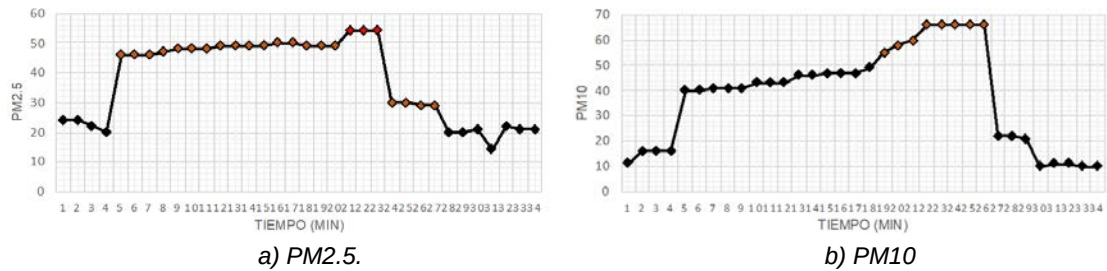
Fuente: elaboración propia

Figura 6 Resultados de mediciones de PM para la Ruta 11 en horario vespertino.



Fuente: elaboración propia

Figura 7 Resultados de mediciones de PM para la Ruta 36 en horario matutino.



Fuente: elaboración propia.

Figura 8 Resultados de mediciones de PM para la Ruta 36 en horario vespertino.

4. Discusión

Los resultados de este estudio indican que los niveles de calidad del aire en interiores de autobuses del transporte público pueden ser afectados por las condiciones de ventilación y su ocupación. Durante las horas pico, los niveles de PM2.5 y PM10 aumentan considerablemente, lo que puede tener efectos adversos en la salud respiratoria de los usuarios.

En el caso de las rutas de autobús estudiadas, se observó que la ventilación es un factor crítico. Las mediciones realizadas en las rutas con buena ventilación mostraron niveles más bajos de partículas en comparación con aquellas con ventilación limitada. Este resultado resalta la importancia de implementar sistemas de monitoreo de la calidad del aire en autobuses urbanos. El uso de dispositivos IoT de bajo costo es particularmente ventajoso para el monitoreo continuo de la calidad del aire debido a su accesibilidad y la posibilidad de realizar despliegues a gran escala con costos razonables. Esto facilita la expansión de redes de monitoreo de calidad del aire, permitiendo que los operadores de transporte puedan implementar estas tecnologías con presupuestos limitados. La capacidad de obtener y analizar datos en “tiempo real” permite una respuesta rápida a las condiciones cambiantes del entorno, lo cual es necesario para mantener niveles seguros de calidad del aire. Este estudio destaca la necesidad de mejorar la ventilación al interior de autobuses para mitigar los riesgos asociados con la exposición a partículas en suspensión. Las tecnologías IoT ofrecen una solución viable y accesible para el monitoreo continuo de la calidad del aire, proporcionando datos esenciales para la toma de decisiones y la implementación de mejoras en la infraestructura del transporte público en general. Los resultados de este trabajo son similares a los de estudios realizados

en otros lugares del mundo, destacando que la calidad del aire al interior del transporte urbano, donde se confina una gran cantidad de personas, debe monitorearse en periodos cortos dada la dinámica variable del ambiente. Un aspecto que puede agregarse en futuros estudios, es la conformación de una red inalámbrica de sensores, para comparar los datos agregados de ambiente dinámicos con los datos oficiales del Sistema Nacional de Información de Calidad del Aire (SINAICA).

5. Conclusiones

El estudio demostró que la calidad del aire en autobuses urbanos empeora especialmente cuando la capacidad de pasajeros supera el 70% y la ventilación es insuficiente. Los niveles elevados de PM_{2.5} y PM₁₀ en estos espacios pueden aumentar el riesgo de enfermedades respiratorias en los usuarios. El dispositivo IoT portátil desarrollado permitió un monitoreo continuo de la calidad del aire, subrayando su utilidad para evaluar sus niveles en estos entornos. Los resultados sugieren que utilizar tecnologías IoT para un monitoreo continuo y en tiempo real de la calidad del aire es importante para proponer la mejora de la ventilación en autobuses urbanos.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Ahmad, A., Rashid, M., & Zakariya, Z. Intelligent Monitoring System of Residential Environment Based on Cloud Computing and Internet of Things. *IEEE Access*, No. 9, 2021.
- [2] Al-Khalidi, S. A., & Elkhodr, M. Multi-Points Indoor Air Quality Monitoring Based on Internet of Things. *IEEE Access*, No. 9, 2021.
- [3] Correia, C., Martins, V., Matroca, B., Santana, P., Mariano, P., Almedida, A. and Almeida, S. A Low-Cost Sensor System Installed in Buses to Monitor Air Quality in Cities. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 2023.
- [4] Esfahani, F., Tahmasebi, H., & Ghaffari, A. Effect of Event-Based Sensing on IoT Node Power Efficiency: Case Study of Air Quality Monitoring in Smart Cities. *IEEE Access*, No. 8, 2020.

- [5] Hung, F. H., Tsang, K. F., Wu, C. K., Liu, Y., Wang, H., Zhu, H., Koo, C. H., & Wan, W. H. An Adaptive Indoor Air Quality Control Scheme for Minimizing Volatile Organic Compounds Density. *IEEE Access*, No. 8, 2020.
- [6] Khan, A. Predicting Asthma Attacks: Effects of Indoor PM Concentrations on Peak Expiratory Flow Rates of Asthmatic Children. *IEEE Access*, No. 8, 2020.
- [7] Li, X., Zhao, Q., & Wang, J. Indoor Air Quality Monitoring: Trends and Future Directions. *Sensors*, No. 19, 2020.
- [8] Nagarajan, R., Pandian, S. C., & Wahidabanu, R. S. A Comprehensive Survey of the Internet of Things (IoT) and AI-Based Smart Healthcare. *IEEE Access*, No. 9, 2021.
- [9] Organización Mundial de la Salud. Directrices mundiales de la OMS sobre la calidad del aire: partículas en suspensión (PM_{2.5} y PM₁₀), ozono, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono. Resumen Ejecutivo. Organización Mundial de la Salud, 2021.
- [10] Patel, K. H., Pandya, V. K., & Dave, H. A. A Decade of Internet of Things: Analysis in the Light of Healthcare Applications. *IEEE Access*, No. 7, 2019.
- [11] Salthammer, T., Fauck, C., Omelan, A., Wientzek, Sebastian and Uhde, E. Time and Spatially Resolved Tracking of the Air Quality in Local Public Transport. *Nature*, No. 12, 2022.
- [12] Verdejo Espinosa, Á., López, J. L., Mata Mata, F., & Espinilla Estevez, M. Application of IoT in Healthcare: Keys to Implementation of the Sustainable Development Goals. *Sensors*, No. 21, 2021.
- [13] Yasin, A., Delaney, J., Cheng, C.-T., & Pang, T.Y. The Design and Implementation of an IoT Sensor-Based Indoor Air Quality Monitoring System Using Off-the-Shelf Devices. *Applied Sciences*, No. 12, 2022.
- [14] Zhao, Y., Gu, C. and Song, X. Evaluation of indoor environmental quality, personal cumulative exposure dose, and aerosol transmission risk levels inside urban buses in Dalian, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023.