



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Arquitectura IoT-MQTT para Monitoreo de la Calidad del Aire Interior IoT-MQTT Architecture for Indoor Air Quality Monitoring

Lúa-Madrigal, O.¹, Figueroa-Millán, P.E.^{2*}, López-Osuna, S.A.³

¹ Profesor adjunto del Departamento Ingeniería Eléctrica y Electrónica del Tecnológico Nacional de México/I.T. Colima, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9477-3059>.

² Profesor adjunto de la División de Estudios de Posgrado del Tecnológico Nacional de México/I.T. Colima, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7562-7578>*

³ Profesor investigador miembro del Comité doctoral de CEPC Universidad, Colima, México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-4073-1019>.

olimpolua@colima.tecnm.mx; patricia.figueroa@colima.tecnm.mx*; skary.lopez@cepc.com.mx

Innovación tecnológica: Arquitectura IoT-MQTT de acceso abierto para el monitoreo y control de la calidad del aire interior.

Área de aplicación industrial: Gestión de ambientes interiores en sectores educativo, laboral, salud, comercial e industrial ligera.

Recibido: 16 diciembre 2025

Aceptado: 14 julio 2026

Abstract

Indoor Air Quality (IAQ) is a crucial factor in mitigating respiratory diseases, as individuals spend up to 90% of their time indoors, especially in academic spaces where occupants remain for extended periods. However, traditional IAQ monitoring systems commonly rely on proprietary commercial ecosystems, restricting accessibility, interoperability, and adaptability. This study presents an IoT-MQTT architecture based on open-access technologies for near-real-time IAQ monitoring, which considers parameters such as carbon dioxide (CO₂), total volatile organic compounds (TVOC), temperature, and relative humidity. It was developed through a four-phase methodology encompassing technological research and surveillance, design, development, and testing. The system integrates three sensing nodes built upon the ESP32 microcontroller with CCS811 and DHT22 sensors, embedding a custom linear offset compensation algorithm within its firmware for thermo-hygrometric variables. Technical and operational validation testing of the architecture was conducted in a 60.48 m² university classroom over five consecutive days, utilizing a 10-second sampling interval to transmit data to a broker hosted on ThingSpeak, alongside local replication on a Raspberry Pi with persistence in Supabase. The system successfully detected

microclimatic variations linked to occupancy and ventilation, revealing peaks up to approximately 1300 ppm of CO₂ and 220 ppb of TVOC under high occupancy and limited air exchange conditions. The results demonstrate the feasibility, stability, and replicability of the architecture based on affordable open-access technologies, establishing a solid architectural foundation for the future implementation of automated environmental ventilation control strategies in academic environments.

Keywords: Air quality, indoor spaces, IoT, IAQ, MQTT.

Resumen

La calidad del aire interior (IAQ) es un factor crucial para mitigar enfermedades respiratorias, ya que las personas pasan hasta 90% de su tiempo en interiores, especialmente en espacios académicos en donde las personas permanecen durante largos periodos de tiempo. Sin embargo, los sistemas tradicionales de monitoreo de IAQ suelen basarse en ecosistemas comerciales propietarios, limitando su accesibilidad, interoperabilidad y adaptabilidad. En este trabajo se presenta una arquitectura IoT-MQTT basada en tecnologías de acceso abierto para el monitoreo de la IAQ en tiempo cuasi-real, la cual considera parámetros como dióxido de carbono (CO₂), compuestos orgánicos volátiles totales (TVOC), temperatura y humedad relativa. Ésta se desarrolló bajo una metodología de cuatro fases: investigación y vigilancia tecnológica, diseño, desarrollo y pruebas. El sistema integra tres nodos de sensado basados en el microcontrolador ESP32 con sensores CCS811 y DHT22 que incorporan en su firmware un algoritmo propio de compensación lineal de desfase (*offset*) para las variables termo-higrométricas. Las pruebas de validación técnica y operativa de la arquitectura se realizaron en un aula universitaria de 60.48 m² durante cinco días consecutivos, con una frecuencia de muestreo de 10 segundos permitiendo el envío de los datos hacia un broker alojado en ThingSpeak y replicación local en una Raspberry Pi con persistencia en Supabase. El sistema detectó variaciones microclimáticas asociadas al aforo y la ventilación, evidenciando picos de hasta 1300 ppm de CO₂ y 220 ppb de TVOC aproximadamente en condiciones de alta ocupación y renovación de aire limitada. Los resultados demuestran la viabilidad, estabilidad y replicabilidad de la arquitectura basada en tecnologías asequibles de acceso abierto, estableciendo una base arquitectónica sólida para el despliegue futuro de estrategias de control automático de ventilación ambiental en entornos académicos.

Palabras clave: Calidad del aire interior, IoT, IAQ, MQTT, monitoreo.

1. Introducción

La calidad del aire de los espacios que se frecuentan, especialmente en interiores, es un factor clave que afecta la salud; considerando que, acorde con la Organización Mundial de la Salud (OMS) se pasa entre el 80 y 90 % del tiempo en éstos y donde la Agencia de

Protección Ambiental (EPA) estima que la calidad del aire es de dos a cinco veces peor que en exteriores, debido a la mezcla de contaminantes externos e internos. Esto puede causar somnolencia, dolores de cabeza, alergias y otras condiciones de salud,

afectando la productividad y el bienestar general de las personas (Figols et al., 2020).

Además, es importante considerar que debido a la reciente pandemia ocasionada por el SARS-CoV-2 y a la disminución de las medidas sanitarias, se ha incrementado la necesidad de controlar mejor la calidad del aire en interiores (Chávez-Bracamontes et al., 2023), ya que existe evidencia de que los virus respiratorios pueden transmitirse por el aire. Por lo tanto, en espacios mal ventilados, las concentraciones virales pueden ser suficientes para infectar a personas, aumentando el riesgo de transmisión aérea con la permanencia prolongada en éstos, ya que las partículas virales pueden viajar más de dos metros debido a nubes de gas turbulento que atrapan y transportan gotas de diferentes tamaños. Los aerosoles pueden flotar en el aire durante minutos o horas, contribuyendo a la transmisión de enfermedades como la COVID-19 (Videa y Rodríguez, 2023).

En específico, la propagación del virus SARS-CoV-2 ocurre a través de gotículas (de tamaño mayor a 5 a 10 μm) y aerosoles ($\leq 5 \mu\text{m}$) emitidos por personas infectadas al respirar, hablar, toser o estornudar. Aunque las medidas tradicionales se centran en controlar las gotículas, gran parte de la COVID-19 se propaga mediante aerosoles, especialmente por personas asintomáticas. Las gotículas varían en tamaño y comportamiento en el aire, afectadas por gravedad, inercia y evaporación. Los aerosoles pueden transportarse por el aire, penetrar profundamente en los pulmones y propagar el virus antes de que aparezcan síntomas (Prather et al., 2020).

Por consiguiente, es importante considerar que, la respiración humana libera aerosoles y dióxido de carbono (CO_2) y en espacios cerrados, la concentración de CO_2 incrementa según la actividad realizada y factores

personales como sexo, edad y peso. Las tasas de emisión promedio de CO_2 para hombres y mujeres de 21 a 30 años, dependiendo de la actividad, son: 0.0056 litros/segundo estando sentados; 0.0080 litros/segundo caminando lentamente; 0.0120 litros/segundo con ejercicio ligero y 0.0160 litros/segundo con ejercicio moderado (Velarde et al., 2020).

Por lo tanto, cada persona dentro de un edificio puede exhalar alrededor de 8 litros de aire por minuto, el cual ha estado en contacto con los pulmones y que puede contener virus. Dado que la transmisión aérea es el principal factor en la propagación de los virus, los niveles de CO_2 en espacios cerrados pueden servir como un indicador del riesgo de transmisión de COVID-19. Por ejemplo, un estudio sobre un brote de tuberculosis en la Universidad de Taipei, Taiwán realizado en 2019, mostró que muchas habitaciones mal ventiladas tenían niveles de CO_2 superiores a 3000 ppm, cuando estos niveles se redujeron a menos de 600 ppm, el brote se detuvo. Esto demuestra que los altos niveles de CO_2 en edificios están vinculados directamente con la propagación de infecciones (Bohórquez et al., 2021).

Acorde con Zhao et al. (2020), cuando la concentración de CO_2 se duplica, el riesgo de contagio se sitúa en un 1%. Este riesgo experimenta un aumento significativo al alcanzar los 2,000 ppm, llegando al 4%. Continúa incrementándose hasta alcanzar un punto crítico del 11.5% cuando la concentración alcanza los 5,000 ppm, considerados niveles de saturación; lo cual, establece un alto riesgo para la transmisión de virus, destacando la importancia de implantar acciones preventivas.

Por lo tanto, factores como la concentración de dióxido de carbono, la temperatura y la humedad relativa, así como las partículas suspendidas PM2.5 y PM10, y los compuestos orgánicos volátiles (COV),

incluido el formaldehído, son indicadores clave que definen las condiciones de la calidad del aire interior (IAQ) (Montero et al., 2023). Por ejemplo, cuando la humedad relativa supera el 60%, puede impactar negativamente la calidad del aire, favoreciendo la aparición de síntomas respiratorios y oculares, los cuales pueden volverse más severos durante la jornada laboral (Daza et al., 2015). En este sentido, de acuerdo con los criterios utilizados por Rodríguez y Ortega (2024), los niveles de calidad del aire basados en la concentración de CO₂ se clasifican como: excelente (menos de 500 ppm), buena (500–600 ppm), regular (600–800 ppm) y mala (más de 800 ppm).

Aunque las recomendaciones de concentración de CO₂ varían entre países e instituciones, asociaciones como la Asociación Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) y la Federación de Asociaciones Europeas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (REHVA) establecen pautas claras. ASHRAE recomienda no superar los 1100 ppm en espacios cerrados, mientras que REHVA aconseja mantener niveles entre 800 y 1000 ppm. Una concentración de CO₂ por debajo de 1000 ppm es segura, entre 1000 y 2000 ppm es peligrosa, y cualquier nivel superior es inaceptable. Además, en espacios interiores como aulas donde la ocupación de personas puede ser más alta, el Centro de Investigación de Química Atmosférica de la UCC, sugiere un objetivo de 1000 ppm de CO₂ como indicador de COVID-19. Por tanto, superar este nivel puede aumentar la acumulación de virus en el aire y el riesgo de infección, incluso en habitaciones mal ventiladas (Bohórquez et al., 2021).

La enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) es la cuarta causa de muerte en el mundo y fue responsable de aproximadamente 3,5 millones de

fallecimientos en 2021, representando el 5% de todas las muertes globales (Organización Mundial de la Salud, 2023). Esta enfermedad afecta principalmente a personas en países de ingresos bajos y medios, donde factores como el tabaquismo y la contaminación del aire en interiores son comunes. Entre estas afecciones, destacan el COVID-19 y la Influenza, ocupando respectivamente el cuarto y noveno puesto en la lista de las diez principales causas de mortalidad en México durante los años 2021 y 2022 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2023).

Considerando lo anterior, ha habido una demanda creciente de soluciones tecnológicas orientadas al monitoreo y mejora de la calidad del aire interior, como una estrategia para enfrentar diversos aspectos relacionados con la propagación de enfermedades respiratorias y promover ambientes saludables. El Internet de las Cosas (IoT), que ha surgido para simplificar las actividades y rutinas cotidianas de los seres humanos, facilita el seguimiento de las pautas y precauciones de seguridad proporcionadas por la OMS (Ghaleb et al., 2021). Investigaciones previas han demostrado que las aplicaciones basadas en IoT pueden desempeñar un papel importante para enfrentar los efectos de la COVID-19 (Singh et al., 2020).

El IoT permite que los objetos físicos vean, oigan, piensen y realicen tareas haciéndolos "hablar" entre sí para compartir información y coordinar decisiones (Al-Fuqaha et al., 2015), sin requerir interacción humana mediante el empleo de diversos protocolos de comunicación y mensajería, los cuales facilitan la transmisión de datos segura y confiable. Entre éstos, se encuentran protocolos como: Extensible Messaging and Presence Protocol (XMPP), Constrained Application Protocol (CoAP) y Message Queuing Telemetry Transport (MQTT). En particular, MQTT se ha utilizado en

monitoreo de atención médica, agricultura inteligente, hogares inteligentes y aplicaciones industriales debido a su protocolo de mensajería liviano y comunicación eficiente entre dispositivos de máquina a máquina (Abdulah Al Hanif y Ilyas, 2024).

MQTT es un protocolo de mensajería que sigue una arquitectura publicador-suscriptor, diseñado para reducir al mínimo el uso del ancho de banda y los recursos del dispositivo, garantizando la entrega confiable de mensajes incluso en redes lentas o poco fiables, con bajo consumo de energía (Mishra y Kertesz, 2020). Este protocolo utiliza un modelo de suscriptor/publicador que permite una conexión flexible entre dispositivos, con publicadores que envían mensajes a través de canales (tópicos) y suscriptores que los reciben, gestionados por un bróker (OASIS, 2019). MQTT ofrece tres niveles de calidad de servicio (QoS): QoS 0 (entrega según las capacidades de la red, sin confirmación ni reintentos), QoS 1 (entrega garantizada al menos una vez, con posibles duplicaciones) y QoS 2 (entrega exacta una vez, sin pérdidas ni duplicaciones, siendo el más lento y costoso) (Mosquera, 2023).

No obstante, la interoperabilidad y la complejidad de integración de las soluciones IoT es un factor clave para el éxito de estas implementaciones, ya que la heterogeneidad de dispositivos, protocolos, plataformas y ecosistemas comerciales cerrados pueden dificultar el despliegue, la escalabilidad y la adaptación contextual de los sistemas de monitoreo de calidad del aire, haciendo que su implementación sea compleja y en ocasiones un factor limitante para su implementación.

Por consiguiente, en el presente artículo se presenta una arquitectura IoT-MQTT para el monitoreo de la calidad del aire interior mediante indicadores como temperatura,

humedad relativa, CO₂ y TVOC en aulas universitarias. El objetivo de esta investigación es diseñar, desarrollar y validar técnica y operativamente una arquitectura IoT-MQTT para el monitoreo de la calidad del aire interior en tiempo cuasi-real, demostrando su viabilidad como herramienta de apoyo para la supervisión de las condiciones ambientales y como base para futuras estrategias de control automático de ventilación y confort en espacios interiores. El alcance del artículo se enfoca en la validación técnico-operativa mediante experimentación de esta arquitectura, con la finalidad de establecer una base arquitectónica sólida para futuros desarrollos.

El artículo está organizado como sigue, en la sección de revisión de la literatura se presenta la revisión de diversos estudios y trabajos similares. La metodología describe los procedimientos y técnicas utilizadas para recolectar y analizar los datos. Los resultados presentan los hallazgos de esta investigación y en la discusión se proporciona un análisis cualitativo de los beneficios de la presente investigación relacionándolos con estudios previos, discutiendo las implicaciones, limitaciones y posibles direcciones futuras de investigación. Finalmente, el artículo proporciona las conclusiones y trabajo futuro que resume los hallazgos principales y su relevancia.

1.2 Revisión de la literatura

El monitoreo de calidad del aire mediante el empleo de soluciones de IoT es aún un área de investigación actual, derivado de las estrategias de mitigación de la COVID-19. A continuación, se presenta esta revisión de la literatura desde dos perspectivas: estudios previos sobre la observación y análisis de la calidad del aire en espacios interiores mediante la medición de CO₂ y otros parámetros; prototipos y sistemas de

monitoreo remoto de la calidad del aire a través de IoT.

1.2.1 Estudios sobre análisis de la calidad del aire en espacios interiores

Videa y Rodríguez (2023) realizaron un estudio con la finalidad de medir los niveles de CO₂, temperatura y humedad relativas en cinco aulas mediante un sensor infrarrojo marca ARANET4, donde participaron 86 estudiantes, los datos medidos fueron comparados con los niveles de CO₂ estándares; además, analizaron la correlación con la temperatura y humedad. Los resultados, analizados mediante tablas dinámicas, evidenciaron niveles bajos de CO₂ sin riesgo significativo para la transmisión de la COVID-19, así como una correlación negativa entre CO₂ y temperatura.

Guijarro et al., (2021) realizaron un estudio de los niveles de CO₂, con una frecuencia de muestreo de cada 10 segundos durante tres días en un aula del Instituto Ramiro de Maeztu utilizando sensores Wohler-cdl-210. Además, se midió la velocidad del aire con un dispositivo Testo 445, registrando aperturas y cierres de ventanas y puertas para correlacionar los niveles de CO₂ con el flujo de ventilación. En la configuración del experimento cuando no se abrieron las ventanas y puertas el nivel de CO₂ alcanzó hasta 1000 ppm, al abrirlas se redujo a 750 ppm, de igual manera se probaron con distintas configuraciones, concluyendo que la ventilación adecuada es crucial para mantener niveles seguros de CO₂ en las aulas.

Rodríguez y Ortega (2024) realizaron un estudio en un salón escolar de 80 m², equipado con una puerta de 1.8 m² y una ventana de 1 m². El horario escolar era de 7:30 a.m. a 2 p.m., con 15 estudiantes de preparatoria y un profesor diferente en cada clase. Durante el monitoreo, se instruyó mantener la puerta y la ventana abiertas para

asegurar una ventilación adecuada; sin embargo, en algunas clases, estas se cerraron, lo que provocó un aumento en los niveles de CO₂ de hasta 1600 ppm en un lapso de 4 horas, partiendo de 400 ppm. La concentración de CO₂ disminuía a niveles aceptables (800 ppm) durante los recesos y cuando el salón estaba vacío, pero aumentaba rápidamente al ocupar nuevamente el espacio.

Quiroga (2023) llevó a cabo un estudio para medir la concentración promedio de CO₂ en diversas actividades dentro de las aulas y calcular la probabilidad de infección de COVID-19 para personas susceptibles. Los resultados, presentados, indican que durante actividades de tipo exposición oral la concentración más alta de CO₂, promedió entre 1342 ± 620 ppm con una probabilidad de infección del 0.0094%. El trabajo en grupo mostró la segunda concentración más alta de CO₂, con un promedio de 322 ± 79 ppm y una probabilidad de infección del 0.0028%. En contraste, durante una clase magistral y exámenes se presentaron concentraciones más bajas de CO₂ (240 ± 38 ppm y 231 ± 53 ppm, respectivamente) y probabilidades de infección más bajas (0.0004% y 0.0003%). Esto sugiere que actividades con niveles más altos de CO₂ podrían implicar un mayor riesgo de transmisión de COVID-19, destacando la importancia de la ventilación adecuada en espacios cerrados.

Finalmente, Chung-Yen et al., (2021), recomiendan que para el monitoreo de la concentración de CO₂ en interiores, se deben seguir los siguientes requisitos técnicos. Ubicar el sensor de CO₂ a una altura de 1.2-1.5 m del suelo y al menos a 20 cm de fuentes de CO₂, como personas, preferiblemente en el centro del área de actividad. El aire interior debe estar bien mezclado; un sensor es adecuado para espacios menores de 24 m², mientras que áreas más grandes requieren varios sensores. Evitar colocar el sensor en

contacto directo con el flujo de aire del sistema de calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC, por sus siglas en inglés) o de las ventanas para prevenir lecturas inexactas. Calibrar y utilizar el sensor según las instrucciones del fabricante.

Desde el punto de vista normativo, diversas organizaciones internacionales han establecido recomendaciones para la evaluación de la calidad del aire interior. La Asociación Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) recomienda mantener concentraciones de CO₂ inferiores a 1000 ppm en espacios ocupados, mientras que la Federación de Asociaciones Europeas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (REHVA) sugiere niveles entre 800 y 1000 ppm como referencia para una ventilación adecuada. Asimismo, organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS) destacan la importancia de la ventilación y el monitoreo continuo de contaminantes para reducir riesgos asociados a la exposición prolongada en espacios interiores. Estas recomendaciones constituyen referencias ampliamente utilizadas para la evaluación y gestión de la calidad del aire interior.

1.2.2 Prototipos o sistemas de monitoreo remoto de la calidad del aire mediante IoT

Mosquera (2023) desarrolló un sistema de monitoreo remoto de la calidad del aire en espacios interiores y utilizó el bróker AWS IoT Core, compatible con MQTT 3.1.1, el cual reduce la necesidad de infraestructura adicional y proporciona kits de desarrollo de software (SDKs, por sus siglas en inglés) para varios dispositivos y lenguajes de programación como C, C++, Python, Java y JavaScript.

Gómez et al. (2023) configuraron y desplegaron una red de sensores de CO₂ en un

edificio universitario para monitorear y gestionar remotamente las aulas, empleando tecnología inalámbrica Wi-Fi para su conexión a una Raspberry Pi, la cual actuó en el borde de la red para recopilar datos de cada sensor mediante peticiones HTTP, preprocesarlos, identificar su origen, adaptarlos en formato JSON y encapsularlos en mensajes MQTT para enviarlos al servidor ThingsBoard. Este servidor centralizó el monitoreo de los niveles de CO₂ en todo el edificio, verificó la coherencia de los datos recibidos y configuró el motor de reglas de la plataforma para emitir alertas cuando los valores fueran anómalos. Además, se utilizó un panel de control y visualización de ThingsBoard. En el nodo Edge también se implementaron servicios locales de bases de datos de series temporales (InfluxDB) y visualización de datos (Grafana), proporcionando alternativas locales a algunas funcionalidades de la plataforma IoT.

Soledispa (2020) desarrolló un prototipo para medir la calidad del aire en aulas de clases en Guayaquil. El objetivo era evaluar la concentración de CO₂ y la humedad. Para este propósito, se seleccionó el sensor MQ-135, que tiene la capacidad de medir ambas variables. Su rango de detección abarca desde 300 ppm hasta 10,000 ppm. El objetivo era observar el rendimiento de los estudiantes cuando los niveles de CO₂ superan las 1,000 ppm, que se considera el límite permisible.

Chávez-Bracamontes et al., (2023) presentaron un sistema IoT que tuvo como objetivo supervisar y gestionar la calidad del aire en espacios cerrados. Consta de cuatro componentes principales: a) un sistema inalámbrico de monitoreo, b) una plataforma en línea con servicios en la nube gestionados por ThingSpeak y FireBase, c) un sistema automatizado de control de ozono, y d) una aplicación móvil para registrar usuarios, visualizar datos en tiempo cuasi-real y guardar registros históricos. El sistema

requiere un punto de acceso Wi-Fi para que el monitoreo inalámbrico pueda transmitir las mediciones de gases interiores. Los sensores de CO₂ y O₃, integrados en el sistema de monitoreo inalámbrico, se conectan a un microcontrolador ESP32 para la transmisión de los datos vía Wi-Fi a la plataforma en línea para su procesamiento y almacenamiento.

Quiroga (2023) presentó la creación e implementación de una red inalámbrica compuesta por un sensor de CO₂, un sensor de partículas y un módulo Wi-Fi, la cual se conectó a una red de malla para transmitir datos a un servidor en la nube. Este servidor, a su vez, utilizó Node-RED para el procesamiento de datos y ThingSpeak para su visualización. Las alarmas se basaron en umbrales de CO₂ ajustables según la actividad en el aula.

Romero et al. (2022) desarrollaron un sistema embebido para monitorear la concentración de CO₂ en un espacio cerrado y emitir alarmas sonoras cuando se superaran los parámetros establecidos. El sistema utilizó un sensor MQ135 para detectar los niveles de CO₂, una tarjeta ESP32 para la transmisión de los datos vía Wi-Fi, una pantalla OLED SSD130 para mostrar los datos y un DFPlayer Mini para las alarmas sonoras. Asimismo, se empleó la plataforma ThingSpeak utilizando MQTT para el almacenamiento y visualización de los datos, posibilitando su análisis posterior.

Gómez-Meza et al., (2022) diseñaron un prototipo IoT para el monitoreo de material particulado en espacios reducidos mediante cuatro módulos de sensado, cada uno con un sensor Nova SDS011 y un microcontrolador ESP32, éstos configurados en una red en malla y los datos se transmiten a una Raspberry Pi 4 que actúa como servidor local y se publican en la plataforma ThingSpeak para la visualización y análisis remoto de los resultados.

Figols et al., (2020) desarrollaron una propuesta para mejorar la calidad del aire interior en edificios utilizando el dispositivo MICA, que mide parámetros por ampliar el concepto de calidad del aire al incluir más contaminantes, permitir una monitorización continua para detectar patrones y ajustar medidas, y utilizar la plataforma My inBiot para gestionar y visualizar datos en tiempo real.

En conjunto, los trabajos revisados muestran diferentes enfoques para la implementación de arquitecturas IoT orientadas al monitoreo de la calidad del aire interior. Algunas propuestas utilizan infraestructuras en la nube especializadas, como AWS IoT Core (Mosquera, 2023), mientras que otras incorporan procesamiento en el borde, servidores locales o redes en malla para mejorar la gestión de los datos (Gómez et al., 2023; Quiroga, 2023; Gómez-Meza et al., 2022). Asimismo, existen soluciones que integran mecanismos de control automático, aplicaciones móviles o algoritmos avanzados de análisis (Chávez-Bracamontes et al., 2023; Figols et al., 2020). Sin embargo, se observa una limitada cantidad de estudios enfocados en la validación técnico-operativa de arquitecturas basadas en MQTT para entornos educativos, utilizando plataformas de acceso abierto y configuraciones simplificadas que faciliten su implementación y evaluación en condiciones reales.

2. Materiales y métodos

A continuación, se presenta la metodología de desarrollo para la arquitectura IoT-MQTT para monitoreo de la calidad del aire en interiores presentada en este artículo; además, del escenario experimental para la validación de la arquitectura. como temperatura, humedad, CO₂, TVOC. Los datos se transmiten a la plataforma IoT “ThingSpeak”

en la nube. La metodología que se siguió se describe a continuación.

2.1 Metodología de desarrollo

Para el diseño, desarrollo y validación de la arquitectura, se implementó la metodología ilustrada en la Figura 1, la cual consta de cuatro fases: investigación y vigilancia tecnológica, diseño, desarrollo y pruebas.

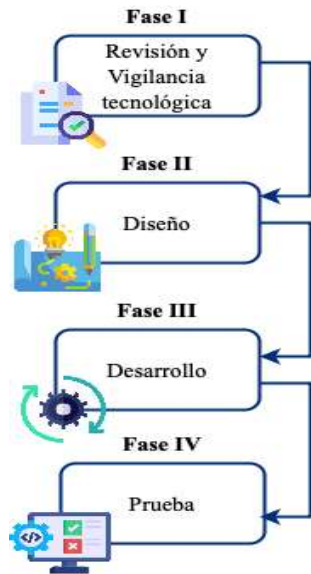


Figura 1. Metodología en Fases.
Fuente: Elaboración propia.

La primera fase, tiene como objetivo identificar soluciones existentes e identificar las limitaciones y áreas de oportunidad para el prototipo de la arquitectura presentada. Esta fase permitió analizar el estado del arte de sistemas IoT orientados al monitoreo ambiental y seleccionar las tecnologías más adecuadas en función de los requisitos de comunicación, seguridad, escalabilidad y flexibilidad, así como las necesidades específicas del entorno académico donde se validó el sistema.

En la segunda fase, se elaboró la memoria de ingeniería básica y de detalle, que comprendió la creación de diagramas eléctricos, electrónicos y de control, así como los planos en 2D y 3D de la estructura del

sistema. También se desarrollaron los diagramas de la lógica de programación, que incluyeron la definición del protocolo de mensajería, la topología de la red, la identificación del bróker MQTT, y la estructura de los tópicos empleados para la comunicación entre los dispositivos de la arquitectura.

En la fase de desarrollo, se gestionó la selección de componentes de hardware y software, así como la mejor estrategia para la fabricación y ensamblaje del prototipo. Además, se configuró el bróker MQTT en ThingSpeak, se desarrolló el firmware para módulos de sensado, y se integraron los dispositivos en la red.

Finalmente, en la cuarta fase, se llevaron a cabo las pruebas unitarias e integrales. Se inició con las pruebas de los componentes individuales antes del ensamblaje, seguidas de pruebas a nivel de subsistema y del sistema completo. Estas incluyeron pruebas de conectividad y validación de funcionalidad general de la arquitectura IoT-MQTT mediante experimentación.

2.2 Escenario Experimental

El diseño experimental se llevó a cabo con el propósito de validar el desempeño de la arquitectura IoT-MQTT en su función de monitoreo, comprobando su capacidad para registrar, transmitir y visualizar en tiempo casi real las condiciones de la calidad del aire interior (IAQ). El estudio se realizó en el Aula W8 del Edificio de Ingeniería Industrial del Instituto Tecnológico de Colima, un espacio donde se desarrollan actividades docentes con ocupación variable.

El aula cuenta con un sistema de aire acondicionado y ventilación natural proporcionada por ventanales. Tiene una superficie de 60.48 m² y un volumen de 169.34 m³, con capacidad aproximada para 42

personas. La distribución de los sensores y el mobiliario se muestra en la Figura 2, donde se

aprecia la disposición del aula y la ubicación relativa de las zonas de monitoreo.

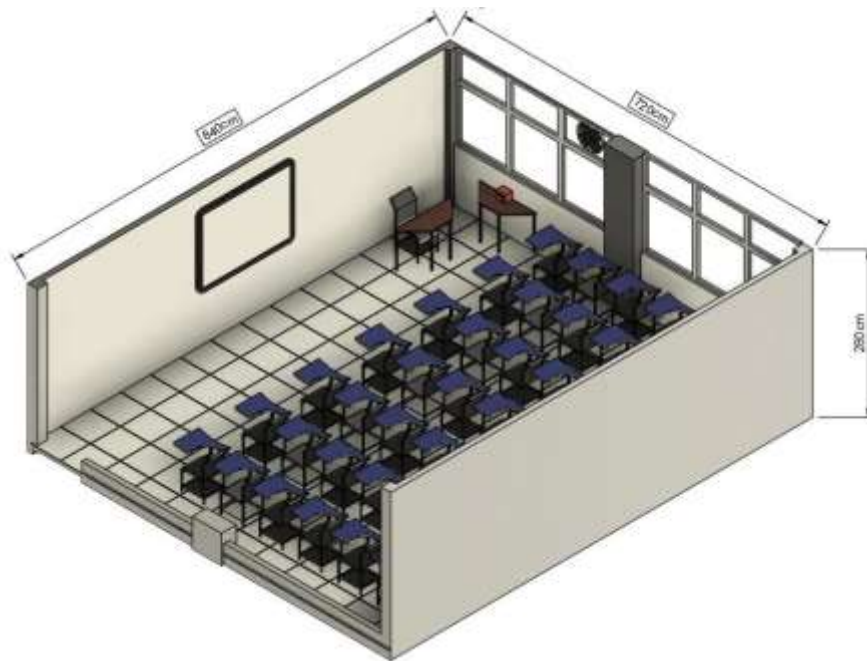


Figura 2. Distribución de dispositivos IoT de sensado y extracción.

Fuente: Elaboración propia.

Para el experimento se emplearon tres módulos de sensado, identificados como Módulo B, Módulo C y Módulo D, los cuales registraron de manera continua temperatura, humedad relativa, CO_2 y TVOC. La transmisión de datos hacia la plataforma ThingSpeak en la nube se configuró a intervalos de 10 segundos mediante el protocolo MQTT, utilizando una red Wi-Fi local. Cada módulo se ubicó estratégicamente para capturar gradientes espaciales dentro del aula. Aunque el sistema se desplegó mediante éstos tres módulos distribuidos en distintos puntos del aula, el análisis que se presenta en la sección de resultados se centró en el Módulo D, debido a que su ubicación en el escritorio del profesor permitió captar con mayor precisión las fluctuaciones ambientales locales provocadas por la interacción entre los alumnos, el flujo de aire acondicionado y las condiciones de ventilación natural.

Para esto, se registraron las mediciones durante cinco días consecutivos de clases ordinarias, así como observaciones sobre las condiciones del aula (número aproximado de ocupantes, apertura o cierre de puertas y ventanas, uso del sistema de aire acondicionado o de ventilación natural) a través de una bitácora. Estas observaciones permitieron interpretar con mayor precisión las fluctuaciones observadas en los niveles de CO_2 y TVOC.

Además, se aplicaron dos enfoques de calibración y reducción de errores sobre el firmware del microcontrolador de la placa ESP32, con la finalidad de garantizar la confiabilidad y precisión de los datos recolectados por los módulos de sensado. Estos enfoques son: 1) implementación de un algoritmo de compensación lineal de desfase (offset) por software para el sensor de temperatura y humedad DHT22, debido a que se identificaron desviaciones constantes en

las lecturas crudas del módulo durante las pruebas experimentales preliminares; por tanto, se calcula en cada iteración una supresión de $-0.40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para la temperatura y de -4.5% para la humedad relativa, asegurando lecturas alineadas con el comportamiento esperado. 2) activación de los mecanismos de calibración digital que emplea el sensor CCS811, basados en tecnología de óxido metálico semiconductor (MOX) mediante el empleo de la librería `Adafruit_CCS811.h` y la instrucción `ccs.begin()`. Este componente aprovecha un algoritmo integrado de Corrección Automática de Línea Base (ABC), que evalúa la resistencia eléctrica del sensor en periodos de no ocupación para reajustar de forma autónoma el umbral base de $\sim 400\text{ ppm}$ de CO_2 equivalente (eCO_2), corrigiendo sin requerir calibración manual externa.

Por otro lado, los datos recolectados fueron preprocesados aplicando normalización de formatos, conversión de marcas de tiempo y corrección de separadores decimales. Se eliminaron valores faltantes, lecturas inválidas como valores de CO_2 y TVOC

iguales a cero (característicos de estados no operativos del sensor) y valores fuera de rangos creíbles. Finalmente, se generaron series temporales, ordenándose y agrupándose por módulo para la generación de las estadísticas presentadas en la sección de resultados (promedio, nivel de confianza y análisis ANOVA.).

El diseño experimental permitió caracterizar la dinámica ambiental del aula bajo diferentes condiciones de ocupación, ventilación natural o uso del sistema de aire acondicionado, evidenciando la utilidad de la arquitectura IoT-MQTT como herramienta para el monitoreo continuo y contextualizado de la calidad del aire interior en entornos académicos.

2.3 Arquitectura IoT-MQTT para monitoreo y control de IAQ

La arquitectura IoT-MQTT para el monitoreo de la calidad del aire interior se basa en un modelo publicador-suscriptor implementado mediante el protocolo de mensajería MQTT (Figura 3).

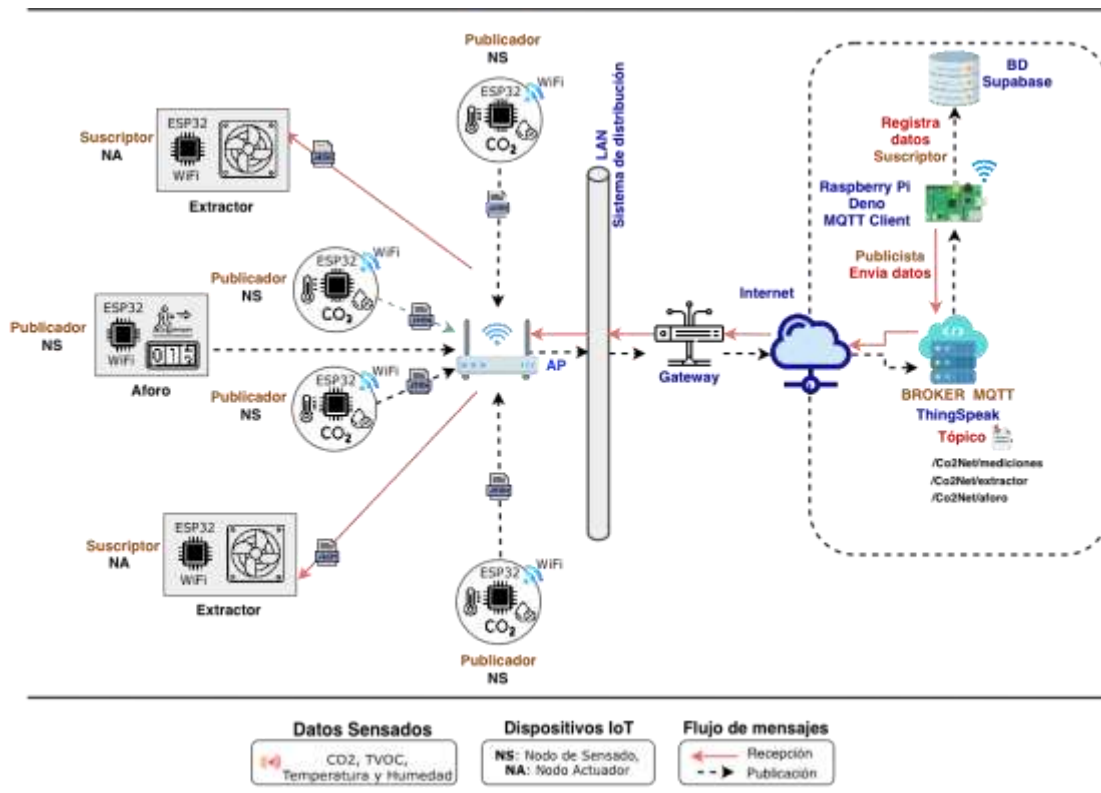


Figura 3. Arquitectura IoT-MQTT para monitoreo y control de IAQ.

Fuente: Elaboración propia.

MQTT es ampliamente reconocido como el estándar por defecto para el intercambio de datos en aplicaciones IoT debido a su bajo consumo de recursos, escalabilidad y eficiencia en redes inestables o de bajo ancho de banda.

Los nodos de sensado publican datos (CO_2 , TVOC, temperatura y humedad relativa) en tiempo cuasi real utilizando MQTT a través de la red Wi-Fi institucional, enviando las mediciones hacia un bróker MQTT alojado en la plataforma ThingSpeak que se comporta como un intermediario entre los dispositivos y la plataforma de monitoreo remoto, donde éstos son almacenados y graficados para supervisar su comportamiento de ser necesario. Para esto, los nodos de sensado implementan en su firmware esta transferencia de datos mediante el uso de la API ThingSpeak.h en combinación con un cliente TCP (WiFiClient), funcionando como una capa de software que traduce las lecturas

de los sensores y las publica de forma transparente hacia los canales de la plataforma remota, garantizando la compatibilidad con el paradigma publicador-suscriptor definido en la arquitectura IoT-MQTT del sistema. Su ejecución se realiza a través de un ciclo cerrado síncrono secuencial (void loop) diseñado con un periodo de refresco de 10 segundos (10,000 ms). Este flujo se efectúa en tres etapas controladas por retardos precisos: 1) 2 segundos donde se accede al sensor químico mediante `ccs.readData()` y se proyectan localmente los valores de eCO_2 y TVOC en una pantalla LCD de 16x2 caracteres (mapeada en los pines GPIO 19, 23, 18, 17, 16, 15); 2) 2 segundos donde se muestrea la temperatura y humedad relativa mediante el sensor DHT22 (Pin GPIO 2), se aplican las ecuaciones de offset por software y se transmiten las cuatro variables ambientales hacia el canal en la nube (2590906) mediante `ThingSpeak.writeFields()`; y 3) 6 segundos de

espera antes de reiniciar el ciclo. Por consiguiente, la Raspberry Pi fue configurada como cliente MQTT con el objetivo de almacenar localmente las mediciones en una base de datos Supabase y evaluar la futura integración de un módulo de control. Aunque el diseño arquitectónico prevé que el módulo de control permita integrar nodos actuadores (por ejemplo, extractores de aire), esta funcionalidad no fue implementada durante las pruebas experimentales, por lo que no formó parte del proceso de validación técnico-operativa de la arquitectura.

La comunicación entre los dispositivos se realiza mediante una red local LAN que enlaza los puntos de acceso con el Gateway institucional, proporcionando conectividad estable hacia Internet y garantizando la transmisión de datos hacia el bróker en la nube. Este esquema asegura un flujo continuo de información desde los sensores hacia las plataformas de análisis y almacenamiento.

3. Resultados

Los resultados que se presentan describen dos aspectos del sistema, su validación técnica del Sistema IoT-MQTT y el análisis e interpretación de los datos recolectados.

3.1 Validación técnica del Sistema IoT-MQTT

La validación técnica del sistema IoT-MQTT se centró en comprobar el funcionamiento del flujo completo de adquisición, transmisión y recepción de datos ambientales conforme a la arquitectura propuesta. Para ello, se evaluó el desempeño de los nodos de sensado (ver Figura 4), la conectividad a la red Wi-Fi institucional, la publicación de datos mediante el protocolo MQTT, la operación del bróker en la nube y la recepción local

desde una Raspberry Pi configurada como cliente suscriptor.



Figura 4. Nodo de sensado (CO₂, TVOC, Temperatura, Humedad).

Los módulos de sensado basados en ESP32 demostraron estabilidad en la adquisición continua de temperatura, humedad relativa, CO₂ y TVOC, enviando una lectura cada 10 s sin interrupciones significativas durante las sesiones de monitoreo. Cada variable sensada se publicó en un tópico o canal específico siguiendo un esquema jerárquico que facilitó la clasificación y trazabilidad de los mensajes.

La Figura 5 muestra un ejemplo representativo del comportamiento temporal de las cuatro variables monitorizadas, generado mediante un MATLAB Visualization directamente sobre el canal MQTT. En dicho panel se aprecia la continuidad del flujo de datos, la ausencia de discontinuidades atribuibles al bróker y la correspondencia exacta entre el intervalo de muestreo configurado y la frecuencia de actualización observada.

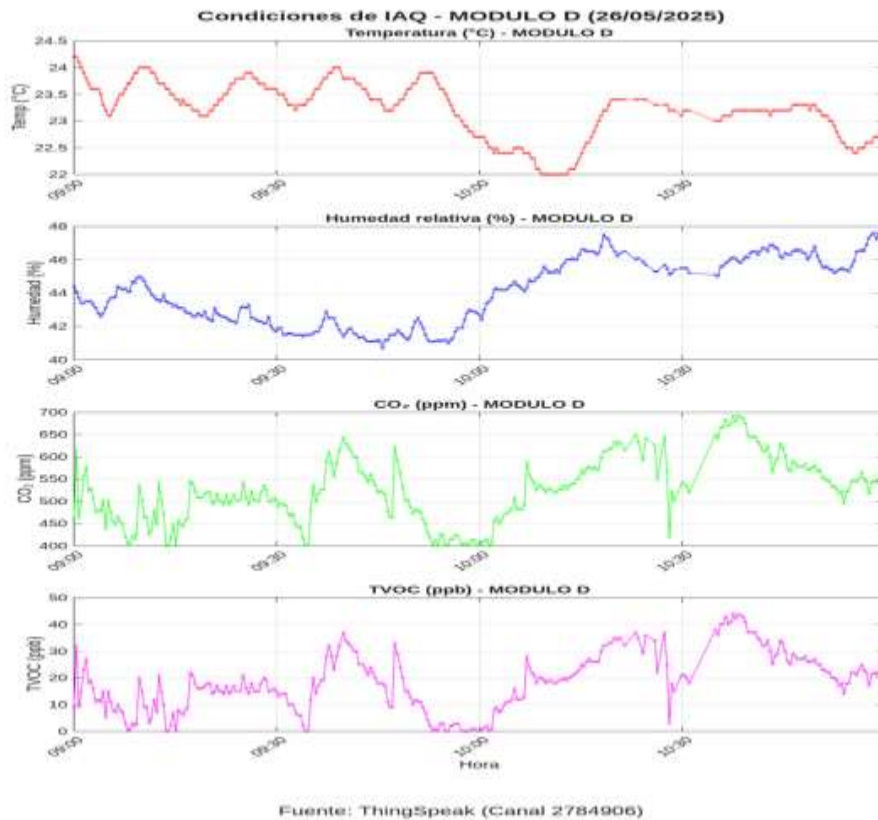


Figura 5. Panel de visualización generado en ThingSpeak mediante MATLAB Visualization para el módulo de monitoreo D del 26/05/2025, mostrando la evolución temporal de la temperatura, humedad relativa, CO₂ y TVOC.

De manera paralela, la Raspberry Pi actuando como cliente MQTT suscrito a los tópicos recibió todas las publicaciones emitidas por los módulos de sensado, validando así la implementación del modelo publicador-suscriptor y los almacenó en la base de datos Supabase, demostrando la integración del sistema con mecanismos externos de persistencia en la nube.

Por tanto, la validación técnica confirma que la arquitectura IoT-MQTT proporciona un canal estable, eficiente y escalable para el monitoreo continuo de la calidad del aire interior. El sistema mantuvo una comunicación estable entre sensores (publicadores), bróker y cliente suscriptor, cumpliendo con los requisitos operativos de la arquitectura y estableciendo las bases para futuras extensiones, como la activación

automática de mecanismos de control ambiental.

3.2 Análisis e interpretación de los datos recolectados.

Como se mencionó anteriormente, para el análisis e interpretación de los datos recolectados, se seleccionó el Módulo D. La experimentación se realizó durante el periodo comprendido entre el 26 y el 30 de mayo de 2025, registrándose mediciones continuas de temperatura, humedad relativa, concentración de CO₂ y TVOC. Es importante, recordar que las observaciones de campo obtenidas durante la experimentación se emplearon para contextualizar los cambios detectados en cada variable.

Las Figuras 6 a 9 ilustran la evolución de las variables monitoreadas durante este periodo

junto con sus respectivos Intervalos de Confianza al 95% (IC 95%). Además, para determinar si las tendencias temporales durante los cinco días de muestreo eran estadísticamente significativas, se ejecutó un análisis de varianza (ANOVA) individual para cada una de éstas. Los resultados indican que todas las variables presentaron fluctuaciones diarias estadísticamente significativas ($p < 0.001$), lo que confirma que las variaciones temporales observadas no

están asociadas al error de medición o a fluctuaciones aleatorias del entorno. En conjunto, estas tendencias evidencian que las variaciones presentadas, por ejemplo, en cuanto a concentraciones elevadas de CO_2 y TVOC, se deben a condiciones de aforo alto y ventilación limitada, y reducciones en momentos de menor actividad o mayor intercambio de aire. A continuación, en la Figura 6 se presenta el comportamiento de la temperatura.

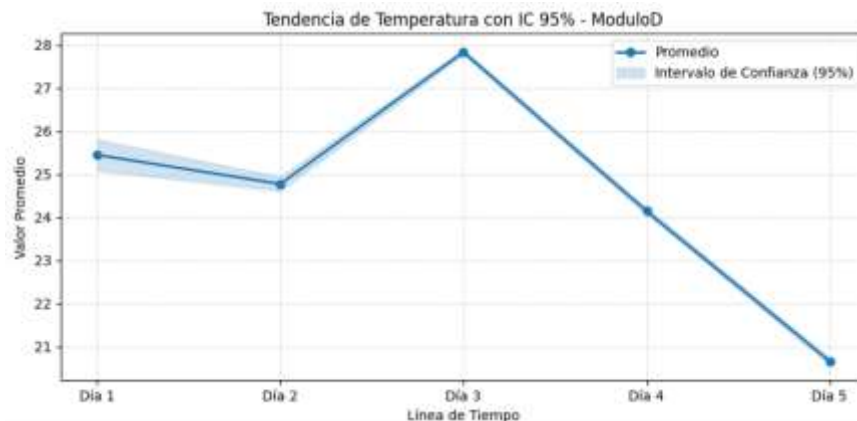


Figura 6. Evolución diaria de la temperatura promedio e intervalos de confianza (IC 95%) en el Módulo D.

La temperatura presentó una tendencia descendente (ver Figura 6), pasando de promedios cercanos a 25.5 °C el 26 de mayo a aproximadamente 20.6 °C el 30 de mayo. El análisis de varianza confirmó la significancia de estas variaciones temporales a lo largo del ciclo de 5 días ($F=463.60$, $p < 0.001$). Los intervalos de confianza (IC 95%) muestran una mayor dispersión en las mediciones durante los primeros dos días, lo cual se asocia a una alta ocupación (25 alumnos), uso de aire acondicionado y movimiento frecuente de puerta y alumnos, generando fluctuaciones por intercambio de aire con el exterior. Por el contrario, el incremento observado el 28 de mayo representó el punto máximo del periodo (aproximadamente 27.8 °C).

Hacia los últimos días, la reducción en los márgenes de los intervalos de confianza y la

estabilización térmica reflejan una mayor eficiencia del sistema de climatización y menor densidad de ocupación, condiciones que favorecieron un equilibrio térmico más estable dentro del aula.

Por otro lado, la humedad relativa (ver Figura 7) mostró un incremento gradual desde el inicio del periodo hasta alcanzar su valor máximo el 29 de mayo con un promedio de aproximadamente 56.1%, seguido de una disminución marcada el 30 de mayo (aproximadamente 42.5%). El análisis de varianza confirmó que estas variaciones diarias son estadísticamente significativas, registrando el efecto temporal más pronunciado del estudio ($F = 1272.19$, $p < 0.001$). La tendencia ascendente y la concentración de los intervalos de confianza (IC 95%) coinciden con los periodos de cierre del aula y el uso continuo del aire

acondicionado, condiciones que redujeron la ventilación natural y propiciaron la

acumulación de humedad por la exhalación de los ocupantes.

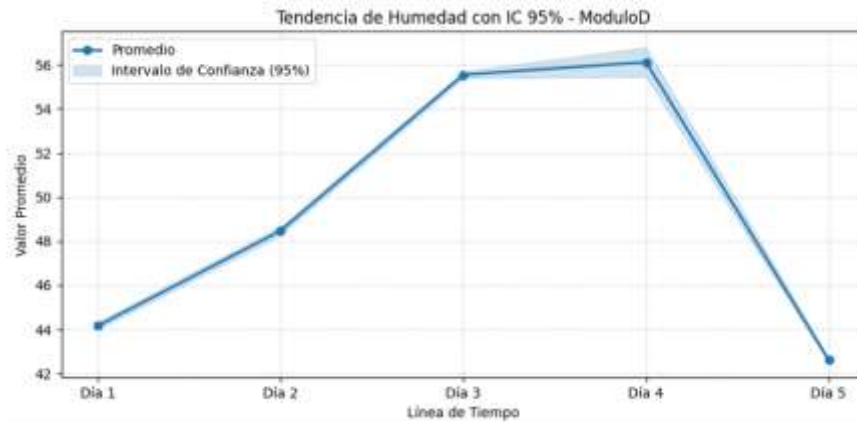


Figura 7 Evolución diaria de la humedad relativa promedio e intervalos de confianza (IC 95%) en el Módulo D.

El 29 de mayo se registró el promedio diario más elevado del periodo, acompañado de una ligera ampliación en el intervalo de confianza en comparación con los días previos, lo que denota una mayor fluctuación en las condiciones de humedad durante esa jornada. Por el contrario, el 30 de mayo la humedad promedio descendió sensiblemente hasta estabilizarse en aproximadamente 42.5%, presentando un intervalo de confianza sumamente estrecho que indica un ambiente térmico más seco, homogéneo y controlado hacia el final del ciclo experimental.

Las concentraciones de CO₂ (ver Figura 8) alcanzaron su máximo diario el 27 de mayo

con un promedio de aproximadamente 1292 ppm, periodo en el que el aula registraba una ocupación media de alrededor de 15 alumnos y condiciones de ventilación limitada. El análisis de varianza evidenció que las fluctuaciones diarias en los niveles de CO₂ fueron estadísticamente significativas a lo largo de los 5 días ($F = 340.40$, $p < 0.001$). Asimismo, la amplitud del intervalo de confianza (IC 95%) durante este pico refleja una mayor dispersión en los registros de esa jornada, lo cual es consistente con la variabilidad en los flujos de ocupación y los periodos de confinamiento del aire.

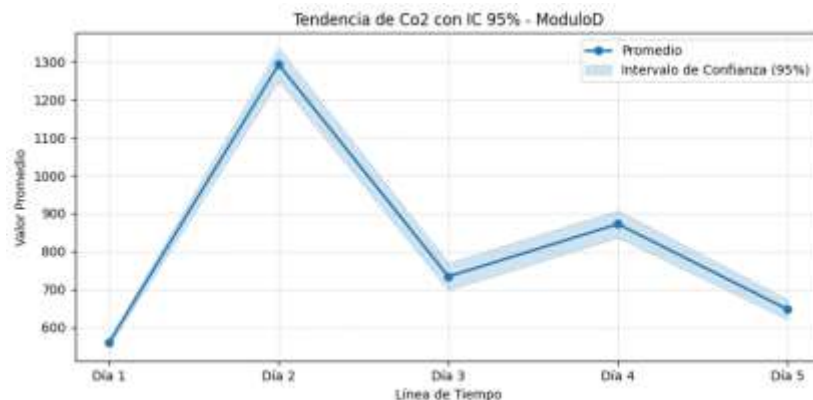


Figura 8. Evolución diaria de CO₂ promedio e intervalos de confianza (IC 95%) en el Módulo D.

Como se puede observar, en los días siguientes el promedio descendió gradualmente hasta situarse en aproximadamente 649 ppm (30 de mayo); lo cual, coincidió con un estrechamiento en el intervalo de confianza que confirma condiciones ambientales más homogéneas debido a una mejor ventilación y menor ocupación del aula. Confirmándose con esto la correlación entre alta ocupación, ventilación deficiente y acumulación de CO₂, fenómeno ampliamente documentado en estudios de calidad del aire interior. Las concentraciones máximas observadas superan el umbral de 1000 ppm, lo que indica momentos de ventilación insuficiente durante el periodo de mayor ocupación.

Por otro lado, el TVOC alcanzó su pico máximo el 27 de mayo con un promedio de aproximadamente 218 ppb, para luego iniciar

un descenso sostenido con un leve repunte el 29 de mayo, finalizando el periodo con el valor de 5 ppb (ver Figura 9) promedio más bajo el 30 de mayo. Adicionalmente, el análisis de varianza validó la significancia estadística de estas fluctuaciones diarias a lo largo del periodo de estudio ($F=299.57$, $p<0.001$). Acorde con la bitácora de observaciones, se identificó que el incremento inicial coincide con la mayor densidad de ocupación y escasa ventilación del aula, condiciones que favorecen la acumulación de compuestos volátiles emitidos por personas, materiales y productos de limpieza. Las concentraciones disminuyeron conforme se mejoró la ventilación natural y se redujo el número de alumnos, facilitando la disipación de contaminantes gaseosos lo que se refleja hacia el final del periodo.

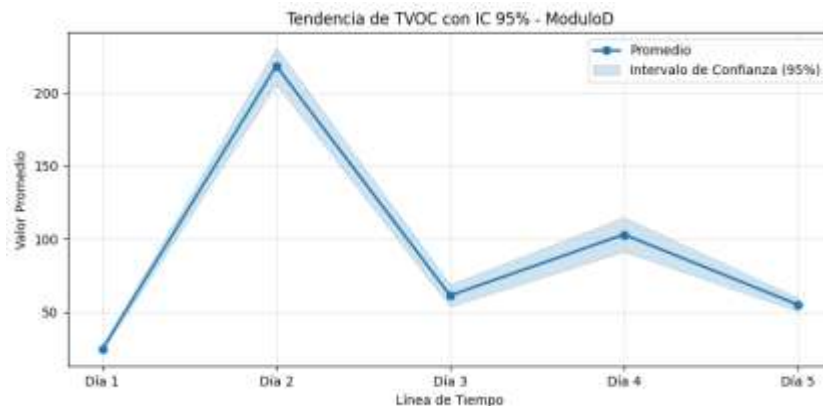


Figura 9. Evolución diaria de TVOC promedio e intervalos de confianza (IC 95%) en el Módulo D.

Por consiguiente, se puede afirmar que las mediciones confirman la sensibilidad de la arquitectura IoT-MQTT para detectar cambios ambientales originados por el uso del espacio y lo cual se respalda por la consistencia de los intervalos de confianza. Así, los descensos observados evidencian hacia el final del periodo un ambiente interior más estable y saludable, relacionado a menor ocupación y ventilación sostenida del aula. Estos resultados estadísticos validan la

factibilidad técnica y operativa de la arquitectura propuesta como herramienta de apoyo para monitorear condiciones de calidad del aire en aulas universitarias.

3.3 Consideraciones sobre la calidad del aire interior y confort térmico

Los resultados muestran la relación directa entre la ocupación, la ventilación y la climatización del aula. En consonancia con la literatura sobre Calidad Ambiental Interior

(IEQ, por sus siglas en inglés), el incremento simultáneo de CO₂ y TVOC durante los días de mayor aforo confirma que la actividad humana es la fuente principal de emisión en el espacio, con una variabilidad diaria estadísticamente significativa en todos los parámetros.

La posterior disminución de estos contaminantes, junto con el descenso térmico y la estabilización de la humedad, valida el uso del aire acondicionado combinado con ventilación natural como estrategia eficaz para la dilución de impurezas.

Respecto al confort térmico, los promedios diarios de temperatura (20.6 °C a 27.8 °C) y humedad relativa (42.5% a 56.1%) se mantuvieron dentro de los rangos recomendados por las normativas internacionales, asegurando condiciones confortables para los ocupantes durante la mayor parte del periodo evaluado.

No obstante, los promedios de CO₂ superiores a 1000 ppm en los días de mayor aforo revelan tasas de ventilación insuficientes. Esto sugiere la necesidad de implementar en futuras etapas un sistema de ventilación o extracción forzada, dimensionado específicamente según las tasas de generación de CO₂ y TVOC registradas durante los picos de ocupación.

En este sentido, la arquitectura IoT-MQTT desarrollada no solo demuestra viabilidad para el monitoreo en tiempo cuasi-real, sino que sienta los fundamentos técnicos para el diseño de estrategias predictivas y de control automático orientadas a garantizar el confort térmico y la calidad del aire interior.

3.4 Discusión

La arquitectura IoT-MQTT propuesta demuestra ser una solución escalable y eficaz para el monitoreo de aire interior en tiempo

cuasi real. Frente a desarrollos previos como los de Mosquera (2023) y Gómez-Meza et al. (2022), esta implementación simplifica el despliegue al centralizar el flujo de datos en el bróker MQTT de ThingSpeak. De este modo, se evita la complejidad de configurar entornos como AWS IoT Core, servidores locales o procesamiento Edge, ofreciendo un sistema de bajo costo y fácil mantenimiento idóneo para instituciones de recursos limitados.

A diferencia de propuestas como la de Quiroga (2023), que incorporan redes en malla y herramientas de procesamiento como Node-RED, esta arquitectura utiliza un modelo publicador-suscriptor para priorizar la simplicidad operativa y facilitar su adopción. Asimismo, frente a sistemas más complejos como el de Chávez-Bracamontes et al. (2023) que integran monitoreo multigas, almacenamiento avanzado y aplicaciones móviles dedicadas, el diseño desarrollado se limita a la medición de CO₂, TVOC, temperatura y humedad relativa. Esta delimitación ofrece una alternativa ligera y viable para identificar variaciones significativas en la calidad del aire interior sin elevar la complejidad del hardware.

Gómez et al. (2023) y Figols et al. (2020), incorporan motores de reglas o algoritmos de inteligencia artificial (IA); sin embargo, la arquitectura presentada y validada en este estudio se limitó al monitoreo continuo y a la comunicación entre dispositivos IoT mediante MQTT, demostrando la integración funcional entre los nodos de sensado, el bróker MQTT y los nodos de actuación, constituyendo una base para futuras extensiones orientadas a la implementación de estrategias de control ambiental y la posible inclusión de técnicas de IA para la adquisición de conocimiento.

Asimismo, desarrollos como los de Romero et al. (2022) y Soledispa (2020) se limitan a

la emisión de alertas o al seguimiento de parámetros aislados de calidad del aire. En contraste, la arquitectura aquí presentada integra la medición simultánea de CO₂, TVOC, temperatura, humedad y aforo, incorporando además la activación automática de extractores para la ventilación del espacio. Como limitación metodológica, este estudio no contempló un análisis de correlación cruzada entre las variables ambientales ni la cuantificación del impacto directo de la extracción sobre la tasa de renovación del aire, aspectos que se perfilan como prioridades para la siguiente fase experimental.

Por otra parte, la validación técnico-operativa confirmó la estabilidad en la comunicación de los dispositivos IoT, la consistencia del tráfico de datos mediante MQTT y la interoperabilidad de ThingSpeak y Supabase para el almacenamiento y gestión de la información. Específicamente, ThingSpeak operó con éxito como bróker MQTT, sosteniendo el flujo continuo de mensajería entre nodos publicadores y suscriptores a lo largo de toda la fase experimental.

Es importante precisar que el alcance de esta investigación se limitó a la validación técnico-operativa de la arquitectura propuesta, priorizando la estabilidad de la comunicación y la integración funcional de los dispositivos en un entorno real. Por lo tanto, quedan fuera de este estudio el análisis de viabilidad económica, las pruebas de estrés para escalabilidad masiva, la evaluación avanzada de consumo energético y el análisis correlacional multivariable entre los parámetros ambientales registrados; vertientes que se perfilan como trabajos futuros clave para consolidar la robustez técnica y el valor analítico del sistema.

Por lo tanto, la investigación confirma la viabilidad de la arquitectura IoT-MQTT diseñada para el monitoreo ambiental en

interiores. Al integrar de manera estable hardware de sensado, actuadores y almacenamiento en la nube, se consolida la estructura técnica necesaria para futuros trabajos enfocados en el control automático, la analítica avanzada de variables y la gestión eficiente de la ventilación.

4. Conclusiones

Este estudio demostró la viabilidad técnica de una arquitectura IoT-MQTT basada en hardware comercial de bajo costo (ESP32, CCS811 y DHT22) para el monitoreo continuo de la calidad del aire interior. El sistema garantizó una transmisión de datos estable con un intervalo de muestreo de 10 segundos hacia ThingSpeak, validando además la comunicación síncrona con un cliente suscriptor local en Raspberry Pi sin pérdida de paquetes.

Durante la validación de cinco días en un aula con aforo de hasta 25 alumnos, la plataforma operó de forma ininterrumpida, capturando con alta sensibilidad las fluctuaciones microclimáticas y de contaminantes generadas por la ocupación y el uso de aire acondicionado. La solidez de estas lecturas quedó respaldada estadísticamente mediante pruebas ANOVA de alta significancia ($p < 0.001$). Aunque el diagrama arquitectónico incluye extractores como nodos de actuación para ilustrar la proyección del sistema, su evaluación física quedó fuera del alcance experimental de esta fase.

Como trabajos futuros derivados de esta investigación, se plantea evaluar cuantitativamente el desempeño de la red (latencia y pérdida de paquetes) y analizar el impacto real de la extracción mecánica automatizada sobre la renovación del aire. Asimismo, la disponibilidad de este flujo de datos continuo permitirá desarrollar análisis correlacionales multivariables de largo plazo para modelar la dinámica entre aforo,

variables climáticas y contaminantes (CO₂ y TVOC), facilitando la integración de algoritmos de aprendizaje automático para el control predictivo en aulas inteligentes.

5. Agradecimientos

Se reconoce el valioso apoyo de los estudiantes que colaboraron en el montaje de la red de sensores y en las pruebas de campo de la arquitectura IoT-MQTT.

6. Referencias

Figols González, M., Díaz de Garayo Balsategui, S., & Aláez Sarasibar, X. (2020). La monitorización de la calidad del aire interior como herramienta de evaluación y mejora de la salubridad de un espacio (Indoor air quality monitoring as a tool for evaluating and improving the healthiness of a space). *Anales de Edificación*, 6(3), 13–20. <https://doi.org/10.20868/ade.2020.4610>

Chávez-Bracamontes, R., Mancilla-Peña, F., Sepúlveda-Rubio, S., & Mejía-Cárdenas, C. (2023). Wireless CO₂ and ozone monitoring with IoT technology for indoor air quality. En *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático 2023* (Acapulco, Guerrero, México, 25–27 de octubre de 2023). Asociación Mexicana de Control Automático. <https://doi.org/10.58571/CNCA.AMCA.2023.1045>

Videa Galo, M., & Rodríguez Corea, N. (2023). Evaluación de medidas para reducir la transmisión de COVID-19 en espacios cerrados, Tegucigalpa, Honduras. *Revista Médica Hondureña*, 91(2), 94–99. <https://doi.org/10.5377/rmh.v91i2.16614>

Prather, K. A., Wang, C. C., & Schooley, R. T. (2020). Reducing transmission of SARS-CoV-2: Masks and testing are necessary to combat asymptomatic spread in aerosols and

droplets. *Science*, 368(6498), 1422–1424. <https://doi.org/10.1126/science.abc6197>

Velarde, F., Mamani-Paco, R., & Andrade-Flores, M. (2020). Estimación de la probabilidad de contagio de COVID-19 por aerosoles en ambientes cerrados: Aplicaciones a casos en la ciudad de La Paz, Bolivia. *Revista Boliviana de Física*, 37(37), 22–30. http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1562-38232020000200004

Bohórquez, M. C., Chapa, J. L., López, D., Manrique, M. A., Miranda, C., & Tintero Caballero, R. (2021). Use of filters and special materials in classrooms, based on the assessment of the presence of CO₂ as an indicator of COVID reduction and control in closed spaces. *Building & Management*, 5(3), 51–62. <https://doi.org/10.20868/bma.2021.3.4714>

Zhao, M., Wang, M., Zhang, J., Ye, J., Xu, Y., Wang, Z., Ye, D., Liu, J., & Wan, J. (2020). Advances in the relationship between coronavirus infection and cardiovascular diseases. *Biomedicine & Pharmacotherapy*, 127, 110230. <https://doi.org/10.1016/j.biopha.2020.110230>

Montero Gutiérrez, P., Cerezo Narváez, A., Pastor Fernández, A., Otero Mateo, M., & Quesada Silva, P. (2023). Monitoring and control of basic air quality conditions in a university education facility. *DYNA*, 98(5), 1–7. <https://doi.org/10.6036/10819>

Daza Pérez, M. Á., Martínez Benavidez, D. X., & Caro Hernández, P. A. (2015). Contaminación microbiológica del aire al interior y el síndrome del edificio enfermo. *Biociencias*, 10(2), 37–50. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5460365>

Rodríguez Muñoz, N. A., & Ortega Ávila, N. (2024). Medidores de CO₂: ¿Útiles para reducir el contagio de la COVID-19? *Milenaria, Ciencia y Arte*, (23), 43–46. <https://doi.org/10.35830/mcy.vi23.461>

World Health Organization. (2023). Chronic obstructive pulmonary disease (COPD). [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-\(copd\)](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/chronic-obstructive-pulmonary-disease-(copd))

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2023). Estadística de defunciones registradas de enero a junio de 2022 (preliminar) (Comunicado de prensa núm. 29/23). <https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2023/DR/DR-Ene-jun2022.pdf>

Ghaleb, T. A., Bin-Thalab, R. A., & Abdullah Alselwi, G. A. A. (2021). How Internet of Things responds to the COVID-19 pandemic. *PeerJ Computer Science*, 7, e776. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.776>

Singh, R. P., Javaid, M., Haleem, A., & Suman, R. (2020). Internet of Things (IoT) applications to fight against COVID-19 pandemic. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 14(4), 521–524. <https://doi.org/10.1016/j.dsx.2020.04.041>

Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>

Al Hanif, A., & Ilyas, M. (2024). Effective feature engineering framework for securing MQTT protocol in IoT environments. *Sensors*, 24(6), 1782. <https://doi.org/10.3390/s24061782>

Mishra, B., & Kertesz, A. (2020). The use of MQTT in M2M and IoT systems: A survey. *IEEE Access*, 8, 201071–201086. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3035849>

Mosquera Escobar, C. (2023). Desarrollo de un sistema de monitoreo remoto de la calidad del aire en espacios interiores [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/33202/1/MosqueraCristian_2023_MonitoreoRemotoAire.pdf

Guijarro Miragaya, P., Estay Leal, T., Patrón Saade, L., & Tendero Caballero, R. (2021). The CO₂ assessment in a school classroom for an optimal natural ventilation strategy. *Building & Management*, 5(3), 29–43. <https://doi.org/10.20868/bma.2021.3.4712>

Quiroga Barrios, D. A. (2023). Implementación de una red inalámbrica de sensores de CO₂ usando IoT como sistema de alerta ante una ventilación deficiente frente al COVID-19 en aulas de clase [Trabajo de grado, Universidad Antonio Nariño]. https://redcol.minciencias.gov.co/Record/UAntonioN2_3e88f0c47105dbdc2403f6bb9dbbd598

Chung-Yen Chen, Ping-Hui Chen, Jia-Kun Chen, & Ta-Chen Su. (2021). Recommendations for ventilation of indoor spaces to reduce COVID-19 transmission. *Journal of the Formosan Medical Association*, 120(12), 2055–2060. <https://doi.org/10.1016/j.jfma.2021.08.007>

Gómez D'Orazio, L., Medina, S., & Montezanti, D. (2023). Integración de una red de sensores con una plataforma IoT para control inteligente de aulas. Instituto de Investigación en Informática LIDI (III-LIDI), Facultad de Informática, Universidad Nacional de La Plata–Comisión de

Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires.

http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/149527/Documento_completo.pdf-PDFA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Soledispa Villegas, J. T. (2020). Análisis de niveles muy altos de CO₂ en las aulas de clases mediante el sensor MQ-135 [Trabajo de titulación, Universidad de Guayaquil]. <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/58211>

Romero López, Y., Álvarez González, R., Maya Ramírez, R. L., & Sánchez Gálvez, A. M. (2022). Desarrollo de un sistema embebido para advertir sobre las condiciones de riesgo de contagio de COVID-19 mediante el monitoreo de la calidad del aire. *Research in Computing Science*, 151(12), 171–180. https://rcs.cic.ipn.mx/2022_151_12/Desarrollo%20de%20un%20sistema%20embebido%20para%20advertir%20sobre%20las%20condiciones%20de%20riesgo.pdf

Gómez-Meza, J. S., Matute-Arias, S. V., & Negrete Peña, T. J. (2022). Diseño de un prototipo IoT para el monitoreo de material particulado en espacios reducidos utilizando ESP32 con servidor hospedado en la nube. *Sinergia Académica*, 4(3), 1–18. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8079673>