



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE COMPUTACIÓN

**DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA EMBEBIDO E IOT PARA LA
DETECCIÓN Y MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Ciencias de la Computación

AUTOR: ANDERSON OMAR GUERRA CATAGÑA

TUTOR: MANUEL RAFAEL JAYA DUCHE

QUITO – ECUADOR

2026

**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Yo, Anderson Omar Guerra Catagña con documento de identificación N° 1726639345;
manifiesto que:

Soy el autor responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad
Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el
presente trabajo de titulación.

Quito, 02 de marzo de 2026

Atentamente,



Anderson Omar Guerra Catagña

1726639345

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Anderson Omar Guerra Catagña con documento de identificación N° 1726639345; expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy el autor del Proyecto Técnico: “Diseño y desarrollo de un sistema embebido e IoT para la detección y monitorización de la calidad del aire”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Ciencias de la Computación, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 02 de marzo de 2026

Atentamente,



Anderson Omar Guerra Catagña

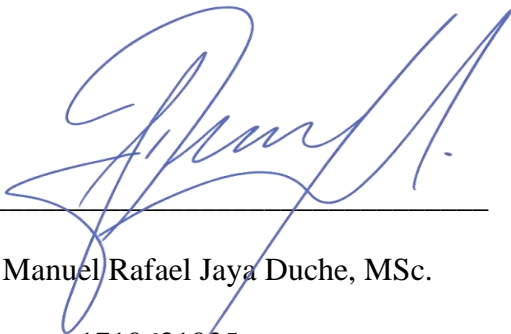
1726639345

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Manuel Rafael Jaya Duche con documento de identificación N° 1710631035, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DISEÑO Y DESARROLLO DE UN SISTEMA EMBEBIDO E IOT PARA LA DETECCIÓN Y MONITORIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE**, realizado por Anderson Omar Guerra Catagña con documento de identificación N° 1726639345, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción de Proyecto Técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 02 de marzo de 2026

Atentamente,



Ing. Manuel Rafael Jaya Duche, MSc.

1710631035

DEDICATORIA

Dedico este logro de manera especial a Dios, por ser la luz que ha guiado cada uno de mis pasos y por brindarme la fortaleza necesaria para perseverar en los momentos de mayor dificultad.

A mis padres, por su apoyo incondicional, su amor incansable y su fe inquebrantable en mis capacidades. Gracias por enseñarme el valor de la constancia, la importancia de la humildad y por permitirme apreciar la esencia de las cosas a través de su esfuerzo diario.

A mis hermanas, por sus consejos oportunos, su amor sincero y por ser ese ejemplo de liderazgo que me ha inspirado en cada etapa de mi vida.

A la persona que me acompaña hoy, gracias por tu apoyo constante, por tu paciencia y por el cariño que me brindas en cada momento.

A mis mejores amigos, quienes siempre han estado presentes para escucharme, brindándome palabras de aliento y un apoyo incondicional que valoro profundamente.

Este logro es, y siempre será, de ustedes y para ustedes.

Anderson Omar Guerra Catagña

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más profundo agradecimiento a todas las personas que me han acompañado a lo largo de este camino; sus palabras de aliento y su motivación constante fueron el motor que me impulsó a seguir adelante y no rendirme ante las adversidades.

A la Universidad Politécnica Salesiana y a cada uno de los docentes que formaron parte de mi proceso académico. Gracias por compartir su conocimiento y por brindarme las herramientas necesarias para alcanzar esta meta y convertirme en un profesional íntegro.

De manera especial, agradezco a mi Tutor, cuya guía experta, paciencia y apoyo incondicional fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Sus enseñanzas y su disposición para orientarme en cada etapa de este proceso, que no estuvo exento de retos, han sido invaluable para la culminación exitosa de este proyecto.

A mis amigos, por estar presentes en cada paso, por su apoyo moral y por ser compañeros constantes en este proceso de aprendizaje. Finalmente, a la mujer que está a mi lado, gracias por tu presencia constante, por tu apoyo incondicional y por el amor que me fortalece cada día.

Anderson Omar Guerra Catagña

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I	1
ANTECEDENTES Y GENERALIDADES	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Problema de estudio.....	2
1.2.1. Antecedentes	2
1.2.2. Importancia	3
1.2.3. Delimitación.....	4
1.3. Justificación	5
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	6
1.5. Alcance	6
CAPITULO II	8
MARCO TEÓRICO	8
2.1. Calidad del Aire, Impacto Ambiental y Desafíos de la monitorización	8
2.1.1. Contexto Ambiental y Tecnológico en Ecuador	9
2.1.2. Desafíos Actuales en la Monitorización Ambiental	10
2.2. Tecnologías Fundamentales para la Monitorización Ambiental	10
2.2.1 Características Técnicas y Validación de Sensores de Bajo Costo.....	10
2.2.2. Protocolos de Comunicación y Transmisión de Datos en IoT.....	11
2.2.3. Mecanismos de Conexión y Protocolo MQTT	12
2.2.4. Rol de la Tecnología en la Prevención y la Vigilancia Ambiental	13
2.3. Protocolo de Comunicación MQTT y Arquitectura de Datos	14
2.3.1. Integración de Servicios Cloud y API REST.....	15
2.3.2. Evolución del Monitoreo Ambiental a la Arquitectura IoT.....	15
2.4. Estado del Arte: Sistemas de Monitoreo Ambiental	16
2.4.1 Proyecto AirBox (Taiwán).....	17
2.4.2. Nodos de Sensores Clarity (Solución Comercial)	18
2.4.3. Sistema SENSEI (Modelo Académico)	18
2.4.4. Características Técnicas y Funcionales Clave del Sistema Embebido	18
2.4.5. Factores Críticos de Aceptación y Usabilidad de Sistemas IoT	19
2.5. Integración de Tecnologías: IoT y Análisis de Datos en la Vigilancia Ambiental ...	20

2.5.1.	Análisis de Datos y Personalización de Alertas.....	20
2.5.2.	Privacidad y Seguridad en el Flujo de Datos IoT	20
2.6.	Aspectos Éticos y Desafíos Tecnocientíficos	20
2.6.1.	Ética de la Vigilancia Ambiental y la Autonomía Ciudadana	21
2.6.2.	Desafíos Tecnocientíficos	21
2.7.	Impacto Social y Ambiental del Monitoreo IoT.....	22
2.8.	Propuestas y Experiencias Exitosas en la Integración de Sistemas de Monitorización IoT	22
2.9.	Perspectivas Futuras y Tendencias en la Monitorización Ambiental IoT	23
CAPÍTULO III.....		24
METODOLOGÍA		24
3.1.	Enfoque de Investigación	24
3.2.	Diseño Metodológico del Proyecto	25
3.2.1.	Fase I: Análisis de Requerimientos y Selección de Hardware	25
3.2.2.	Fase II: Desarrollo del Firmware y Lógica de Control	29
3.2.3.	Fase III: Integración de Servicios Cloud (Backend).....	30
3.2.4.	Fase IV: Desarrollo de la Interfaz de Usuario	30
3.2.5.	Fase V: Pruebas, Validación y Optimización	30
3.3.	Arquitectura General del Sistema.....	31
3.3.1.	Arquitectura de Hardware (Capa de Percepción)	31
3.3.2.	Arquitectura de Comunicación y Red.....	32
3.3.3.	Arquitectura de Software y Almacenamiento (Capa de Aplicación).....	32
3.3.4.	Justificación de la Infraestructura Tecnológica (Contexto Técnico)	33
3.4.	Diagrama de Flujo del Sistema (Lógica de Funcionamiento)	34
3.5.	Implementación del Prototipo	36
3.5.1.	Configuración del Entorno de Desarrollo	38
3.5.2.	Conexión y Cableado (Hardware)	39
3.5.3.	Calibración de Sensores.....	42
3.5.4.	Configuración y Seguridad de la Base de Datos (Cloud).....	43
CAPÍTULO IV		47
PRUEBAS Y RESULTADOS		47
4.1.	Entorno de Pruebas	47
4.2.	Pruebas de Funcionamiento.....	49
4.2.1.	Prueba de la pantalla OLED y Visualización HMI	49

4.3. Validación de Conectividad y Sincronización Cloud.....	50
4.4. Análisis y Discusión de Resultados.....	52
4.4.1. Interpretación de los Niveles de Calidad del Aire.....	53
CONCLUSIONES.....	54
RECOMENDACIONES.....	56
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de Requerimientos y Selección de Hardware.....	25
Tabla 2. Tabla comparativa de dispositivos de procesamiento para sistemas IoT	26
Tabla 3. Comparación de sensores y módulos para la capa de sensado y localización.	27
Tabla 4. Comparación de dispositivos para la capa de visualización local.....	28
Tabla 5. Tabla de distribución de pines.....	41
Tabla 6. Cronograma de Implementación y Pruebas	44
Tabla 7. Escala de Referencia para Concentración de COx y Gases (ppm).	47
Tabla 8. Resultados de Medición e Interpretación de la Calidad del Aire	53
Tabla 9. Mediciones parqueadero UPS	54
Tabla 10. Mediciones Area verde.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Monitoreo urbano de la calidad del aire con IoT.....	2
Figura 2. Metodología del sistema IoT	25
Figura 3. Arquitectura general del sistema de adquisición y transmisión de datos	29
Figura 4. Arquitectura general del sistema de monitoreo ambiental	31
Figura5. Diagrama de bloques	35
Figura 6. Diagrama de flujo del sistema	36
Figura 7. Esquema de Conexiones	37
Figura 8. Arduino IDE, librerías	38
Figura 9. Diagrama del circuito	40
Figura 10. Fragmento de código, conexión a Firebase	41
Figura 11. Prototipo	42
Figura 12. Formula Índice de Calidad del Aire (AQI).....	43
Figura 13. Capturas Código	45
Figura 14. Diagrama de flujo del algoritmo, para la discriminación de gases y calculo AQI	46
Figura 15. Diagrama del análisis comparativo.....	48
Figura 16. Entorno de pruebas	49
Figura 17. Pantalla OLED.....	50
Figura 18. Realtime.....	51

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue desarrollar e implementar un sistema IoT de bajo coste para monitorear en tiempo real la calidad del aire interior, teniendo en cuenta no solo la concentración de óxidos de carbono sino también otros gases contaminantes importantes, como el dióxido de nitrógeno (NO₂), para lograr una evaluación más representativa de la condición del aire en ambientes cerrados.

El método se basó en el desarrollo de una arquitectura modular compuesta por sensores de la serie MQ para detección de gases contaminantes y un sensor BME280 para medición de variables ambientales, integrados mediante un sistema ESP32 en un chip (SoC). Se implementó un firmware optimizado para la adquisición, filtrado y transmisión inalámbrica de datos a la plataforma en la nube Firebase, complementado con visualización local mediante una pantalla OLED y una aplicación web responsiva con actualización en tiempo real.

Además, el sistema permitió identificar aumentos simultáneos de CO_x y NO₂, mostrando una rápida respuesta a los cambios en las condiciones ambientales.

En conclusión, el prototipo desarrollado valida una arquitectura tecnológica confiable, escalable y de bajo costo para el monitoreo ambiental localizado, la integración efectiva de hardware integrado y servicios en la nube, y proporciona una herramienta preventiva útil para entornos educativos y de oficina.

Palabras Clave: Internet de las cosas, Sistemas embebidos, Firebase, Arquitectura, Monitorización.

ABSTRACT

The objective of this work was to develop and evaluate a low-cost IoT system to monitor indoor air quality in real time, taking into account not only the concentration of carbon oxides but also other important pollutant gases, such as nitrogen dioxide (NO₂), to achieve a more representative evaluation of the air condition in closed environments.

The method was based on the development of a modular architecture composed of MQ series sensors for detecting pollutant gases and a BME280 sensor for measuring environmental variables, integrated by means of an ESP32 system on a chip (SoC). Optimized firmware was implemented for the acquisition, filtering and wireless transmission of data to the Firebase cloud platform, complemented by local visualization through an OLED display and a responsive web application with real-time updating.

In addition, the system made it possible to identify simultaneous increases in CO_x and NO₂, showing a rapid response to changes in environmental conditions.

In conclusion, the prototype developed validates a reliable, scalable and low-cost technological architecture for localized environmental monitoring, the effective integration of integrated hardware and cloud services, and provides a useful preventive tool for educational and office environments.

Keywords: Internet of Things, Embedded Systems, Firebase, Architecture, Monitoring.

CAPÍTULO I

ANTECEDENTES Y GENERALIDADES

1.1.Introducción

La monitorización de la calidad del aire ha evolucionado en las últimas décadas debido a la creciente preocupación por los efectos de la contaminación atmosférica en la salud y el medio ambiente. Tradicionalmente, este monitoreo se ha realizado mediante estaciones de referencia o ECA, las cuales ofrecen datos precisos, pero presentan altos costos de instalación y mantenimiento. Esta situación limita su implementación en muchos países en vías de desarrollo, como Ecuador, y reduce la disponibilidad de información espacial y temporal detallada.

En este contexto, el avance de las tecnologías de bajo costo, particularmente en el ámbito de los sistemas embebidos y el Internet de las Cosas (IoT), ha posibilitado el desarrollo de redes de sensores económicos que complementan a las estaciones de monitoreo tradicionales. De acuerdo con estudios recientes (ELSEVIER, 2024), si bien este tipo de sensores requiere procesos de calibración y validación para garantizar la confiabilidad de las mediciones, presentan como principal ventaja una mayor cobertura espacial.

Figura 1.

Monitoreo urbano de la calidad del aire con IoT



Nota. Representación conceptual. Elaborado por: El Autor.

1.2. Problema de estudio

1.2.1. Antecedentes

El avance de las tecnologías de bajo costo, especialmente en el campo de los sistemas embebidos y el Internet de las Cosas (IoT), ha impulsado un cambio de paradigma en la monitorización ambiental. Esta innovación ha permitido el desarrollo de redes de sensores de bajo costo (LCSN, por sus siglas en inglés) que buscan complementar, y en algunos casos sustituir, a las estaciones de referencia. Estudios recientes (ELSEVIER, 2024) han demostrado que, aunque los sensores económicos —como los utilizados para la medición de COx y NO2 pueden requerir procesos rigurosos de calibración y validación, ofrecen una ventaja crítica asociada a su alta densidad espacial. Esto permite obtener una visión mucho más detallada de la distribución de contaminantes a nivel de barrio o calle, lo cual resulta esencial para la identificación de “puntos calientes” de contaminación local.

La Universidad Politécnica Salesiana (UPS), a través de sus líneas de investigación en sistemas embebidos e IoT, ha identificado la necesidad de desarrollar soluciones tecnológicas orientadas a la sostenibilidad ambiental que se adapten a las realidades locales. En este contexto, el presente proyecto se alinea con dicho objetivo institucional al proponer una solución que

emplea arquitecturas de hardware accesible y plataformas en la nube, como Firebase, para el almacenamiento y despliegue de los datos. Esta aproximación no solo contribuye a la reducción de costos, sino que también facilita la implementación y escalabilidad de sistemas de monitorización ambiental.

Por lo tanto, este trabajo de titulación se justifica como una investigación aplicada que busca contribuir al estado del arte en la monitorización de la calidad del aire en Ecuador, ofreciendo una herramienta viable, económica y tecnológicamente avanzada para la vigilancia ambiental local.

1.2.2. Importancia

Al final el sentido de esta investigación es que queremos crear una herramienta tecnológica que esté disponible y funcione para medir la calidad del aire, muchas veces no hay datos claros porque los equipos son caros o no llegan a todos lados, entonces al usar un sistema IoT barato queremos que más personas accedan a esta información ambiental y así saber mejor lo que pasa en su entorno. No es un sistema perfecto, pero todavía contribuye mucho.

Su importancia se detalla en los siguientes ámbitos:

Primero, la importancia ambiental y social de este proyecto es que permite obtener datos sobre la calidad del aire en espacios pequeños o microambientes para poder identificar áreas de mayor contaminación que no pueden ser vistas por estaciones grandes, para que las personas puedan comprender mejor lo que sucede en su entorno y ser conscientes del cuidado del medio ambiente.

Importancia Tecnológica: Se centra en la integración eficiente de hardware de bajo costo, microcontroladores (como el ESP32 o similar) y la plataforma cloud Firebase para el almacenamiento, procesamiento y visualización de datos en tiempo real.

Importancia Práctica: Finalmente, este proyecto ofrece una solución que es portátil y fácil de instalar y que puede replicarse en otros lugares sin mucha dificultad. Esto permite a la

Universidad Politécnica de Salesiana u otras instituciones locales crear una red de monitoreo más densa y flexible, superando así las barreras financieras de los equipos tradicionales, que, aunque no es una tecnología particularmente sofisticada, cumple bien su función.

Importancia Académica: Contribuye directamente a las líneas de investigación de la universidad en Sistemas Embebidos, IoT y Sostenibilidad Ambiental, sentando las bases para futuros proyectos de investigación que requieran la validación o uso de sensores de bajo costo para la vigilancia de contaminantes como el COx y el NO2.

1.2.3. Delimitación

El presente proyecto se centrará en el diseño, construcción y validación de un único prototipo funcional de un sistema embebido IoT para la monitorización de la calidad del aire. La delimitación del alcance es la siguiente:

Alcance Funcional: El sistema se limitará a la detección y medición de parámetros específicos de la calidad del aire, principalmente COx y NO₂, así como variables ambientales como temperatura y humedad.

Alcance Geográfico: Las pruebas de validación y la demostración de la funcionalidad se llevarán a cabo en entornos controlados de laboratorio y en áreas específicas dentro de las instalaciones de la Universidad Politécnica Salesiana.

Alcance Tecnológico: El desarrollo se enfocará en el software embebido (código del SoC ESP32) y en la implementación del backend de datos utilizando una solución en la nube (Firebase). No se abordará la producción en masa ni el desarrollo de una aplicación móvil nativa.

Alcance de Alimentación: El prototipo operará con alimentación fija (adaptador de corriente) o baterías de corta duración, y no incluirá un sistema de energía solar o autónomo de larga duración.

1.3.Justificación

Respiras aire todos los días. Pero casi nunca sabes qué tan limpio es. En muchas ciudades la contaminación crece más rápido que la información disponible. Así que tú y muchos otros viven sin datos claros sobre el aire que los rodea. Hoy en día, muchos municipios usan sistemas tradicionales para medir la calidad del aire. Son estaciones grandes, caras y difíciles de mantener. Funcionan bien, claro, pero cubren pocas zonas. Entonces los datos no alcanzan para entender lo que pasa en cada barrio o calle.

Aquí entra una idea más simple. Más cercana. Un sistema basado en el Internet de las Cosas, conocido como IoT, permite medir el aire de forma continua y a bajo costo. Este tipo de sistema puede detectar gases como los óxidos de carbono COx y los óxidos de nitrógeno NO₂. No necesita equipos complicados. Solo sensores pequeños que hacen su trabajo.

Además, esta solución puede ayudar a instituciones públicas. Les da una herramienta extra para crear redes de monitoreo económicas. El prototipo usa software libre, componentes accesibles más la plataforma Firebase para guardar los datos. Entonces el sistema no se vuelve pesado ni costoso.

Otro punto a favor es su facilidad de uso. No necesitas expertos para instalarlo o mantenerlo. Eso importa mucho en países como Ecuador. El sistema también es portátil más usa conexión WiFi. Así que puedes colocarlo donde una estación fija no llegaría. No es un equipo de laboratorio, pero sí ofrece información constante sobre el entorno. Además, deja la puerta abierta a mejoras futuras como medir otros contaminantes.

1.4.Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseño e implementación de un prototipo funcional de un sistema integrado que utiliza IoT y sensores de bajo coste con el objetivo de medir y supervisar la calidad del aire, en particular el COx y el NO₂, en tiempo real para crear una solución tecnológica asequible y

fácilmente adaptable que ayude a supervisar el medio ambiente en ubicaciones específicas. Aunque el sistema no es especialmente complejo ni perfecto, resulta bastante útil para este tipo de aplicaciones.

1.4.2. Objetivos específicos

Diseñar y definir la arquitectura completa del sistema de monitorización, especificando la selección de sensores de bajo costo CO_x, NO₂, la plataforma de hardware embebido (microcontrolador) y la estructura de la base de datos en la nube (Firebase) para el almacenamiento de la información ambiental.

Implementar y ensamblar el prototipo embebido, desarrollando el firmware necesario para la adquisición, procesamiento de datos y la transmisión inalámbrica a la plataforma IoT, así como la interfaz de usuario para la visualización remota.

Validar y evaluar la precisión y estabilidad del sistema a través de pruebas en entornos reales dentro del campus universitario, comparando las mediciones obtenidas con parámetros de referencia para verificar la funcionalidad y el cumplimiento de los requisitos del proyecto.

1.5. Alcance

Este proyecto plantea el desarrollo de un prototipo funcional de un sistema IoT para la monitorización de la calidad del aire. La propuesta demuestra que el uso de tecnología de bajo costo junto con la plataforma Firebase puede ofrecer una solución accesible que complemente los sistemas tradicionales de monitoreo ambiental, sin buscar reemplazarlos. El sistema permite la medición continua de gases como el CO_x y el NO₂, el almacenamiento de datos históricos y la visualización remota casi en tiempo real.

El prototipo será validado mediante pruebas de campo en la Universidad Politécnica Salesiana, donde se evaluará la estabilidad de los datos, la transmisión de la información y el correcto funcionamiento del software. Los resultados permitirán realizar ajustes finales al firmware y al diseño del sistema.

Finalmente, este trabajo sirve como base para futuras mejoras y para el desarrollo de redes de monitoreo ambiental más amplias, accesibles y adaptables a distintos entornos.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Calidad del Aire, Impacto Ambiental y Desafíos de la monitorización

Promover una gestión ambiental eficaz y reducir la exposición a contaminantes es fundamental para proteger la salud y el bienestar públicos. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2023), la contaminación del aire es una de las mayores amenazas para la salud ambiental y afecta a la mayoría de las ciudades del mundo. Esta situación exige sistemas de monitorización del aire más precisos y localizados que permitan una mejor toma de decisiones por parte de las autoridades sanitarias y las organizaciones medioambientales.

En América Latina, y especialmente en Ecuador, el rápido crecimiento de las ciudades y el aumento del número de vehículos han exacerbado los problemas de calidad del aire. Los sistemas de monitoreo tradicionales basados en estaciones de referencia o estaciones de calidad del aire ofrecen mediciones precisas, pero sus altos costos de adquisición y mantenimiento limitan su implementación y cobertura. Además, las diferencias en la contaminación a nivel de calle o barrio significan que los datos obtenidos no necesariamente reflejan las condiciones ambientales reales. Ante este escenario, surge la necesidad de buscar alternativas tecnológicas más asequibles. Los sistemas basados en el Internet de las cosas (IoT) y sensores de bajo costo pueden complementar los métodos tradicionales y ofrecer una mayor densidad de medición y facilitar el acceso a la información ambiental. Estas soluciones proporcionan una mayor autonomía a ciudadanos y autoridades y son una solución viable para la detección de contaminantes como el dióxido de carbono (CO_x) y los óxidos de nitrógeno (NO₂), cuyo seguimiento se ha vuelto cada vez más necesario.

En este contexto, la adopción de tecnologías adaptadas a las condiciones sociales y económicas locales se presenta como un paso importante para mejorar la gestión de la calidad del aire en el Ecuador y la región.

2.1.1. Contexto Ambiental y Tecnológico en Ecuador

En Ecuador, el crecimiento urbano e industrial, junto con un aumento constante del parque automotor, ha tenido un impacto directo en la calidad del aire, especialmente en las ciudades más grandes. El aumento de enfermedades relacionadas con la contaminación del aire conlleva mayores costes sanitarios y reduce la calidad de vida de los ciudadanos, aunque en muchos casos el problema no recibe la atención necesaria y sigue empeorando con el tiempo. Actualmente, una parte importante de las zonas urbanas del país cuenta con información limitada sobre la calidad del aire debido a la baja cobertura de los sistemas de monitoreo existentes. La infraestructura se basa principalmente en estaciones de calidad del aire, que se implementan en pequeñas cantidades debido a los altos costos de instalación y mantenimiento. Esto limita la adquisición de datos en tiempo real y a escala micro ambiental, como en barrios o zonas de alto tránsito, informa el (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2024).

Esta situación es más pronunciada en zonas periféricas y comunidades con menos recursos, donde el acceso a la información ambiental es limitado. La falta de datos oportunos dificulta la toma de decisiones por parte de instituciones y ciudadanos, exacerbando los problemas de salud existentes y reduciendo el bienestar general de la población (Organización Panamericana de la Salud, 2023).

Ante este escenario, se hace necesario explorar alternativas tecnológicas que complementen los sistemas de vigilancia tradicionales. El uso de sistemas integrados basados en el Internet de las cosas (IoT) y sensores de bajo costo permite la medición continua de contaminantes y la visualización de datos casi en tiempo real utilizando plataformas en la nube como Firebase. Estas soluciones son una opción viable para mejorar el acceso a la información ambiental y fortalecer el monitoreo de la calidad del aire en el contexto ecuatoriano.

2.1.2. Desafíos Actuales en la Monitorización Ambiental

El aumento de la contaminación atmosférica ha incrementado la demanda de información ambiental confiable, especialmente para apoyar la toma de decisiones en salud pública. Entre los contaminantes más comunes en zonas urbanas se encuentran el dióxido de nitrógeno (NO₂), óxidos de carbono (CO_x) y el material particulado, los cuales requieren una vigilancia constante debido a sus efectos en la salud (Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica, 2023).

En consecuencia, la integración de soluciones tecnológicas para la monitorización de la calidad del aire contribuye a mejorar el conocimiento ambiental, optimizar los recursos disponibles y apoyar la gestión de riesgos asociados a la contaminación de manera más eficiente y sostenible (González, 2025).

2.2. Tecnologías Fundamentales para la Monitorización Ambiental

La selección de los componentes de adquisición de datos y la gestión del backend en la nube son pilares fundamentales para la funcionalidad y la sostenibilidad del sistema de monitoreo. A medida que las soluciones IoT buscan generar datos confiables, no solo enfrentan desafíos de conectividad, sino también la necesidad de utilizar sensores que sean precisos en entornos reales y una infraestructura de datos que pueda soportar tráfico constante (Tongshu Zheng, 2022).

Además, el servicio de Firebase Hosting mejora el acceso a la información desde distintos dispositivos con conexión a internet, incrementando la utilidad del sistema en entornos académicos y comunitarios. Al adoptar un enfoque Backend as a Service (BaaS), se reduce la dependencia de servidores propios, se mejora la escalabilidad y se minimizan los riesgos asociados a fallas de infraestructura y a altos costos operativos (zazz_admin, 2024).

2.2.1 Características Técnicas y Validación de Sensores de Bajo Costo

La implementación exitosa del prototipo depende de la capacidad de los sensores para transformar concentraciones de gas en señales eléctricas medibles. A pesar de que los sensores

de bajo costo no representan la precisión de un analizador de referencia, pueden ser un signo de variaciones significativas en la calidad del aire local, por lo que necesitan una atención a la calibración para evitar la deriva en sus lecturas (Palacios, 2025).

Sensor de óxidos de carbono (NDIR): Primero, este tipo de sensor usa una tecnología llamada infrarrojo no dispersivo, que es muy usada para medir COx porque es más estable y confiable, básicamente funciona porque el gas absorbe una parte de la luz infrarroja, y así se puede saber cuánto COx hay en el aire, a diferencia de otros sensores resistivos este suele dar mejores resultados, aunque al inicio parezca algo más complejo, en la práctica no afecta mucho el trabajo normal del microcontrolador y se puede usar sin mayores problemas, aunque no siempre se entiende del todo cómo funciona y eso queda un poco en el aire.

Sensor de Dióxido de Nitrógeno (Electroquímico): El NO₂ se detecta por medio de una reacción química de oxidación o reducción que genera una pequeña corriente, este proceso es uno de los puntos más delicados del sensor, porque cambia mucho cuando hay variaciones de humedad o temperatura, por eso el rendimiento puede verse afectado fácilmente, y si no se controla bien estos factores los datos pueden no ser tan confiables y la idea queda medio incompleta sin saber que tanto influyen en la medición.

La validación y calibración temprana del prototipo es esencial para implementar intervenciones que puedan frenar la evolución de los errores de medición (Kiss, 2025). Esto implica someter el sensor a gases conocidos o comparar sus lecturas con un instrumento de referencia antes de su despliegue final.

2.2.2. Protocolos de Comunicación y Transmisión de Datos en IoT

La transmisión de datos confiable es un punto muy importante para que un sistema de monitoreo funcione bien cuando ya está en uso, si los datos no llegan correctamente el sistema pierde utilidad con el tiempo, además los dispositivos embebidos pueden tener problemas de conexión a medida que pasan los días.

Por ejemplo, la calidad de la conectividad puede bajar por la saturación de la red, por señales débiles o por obstáculos físicos que no dejan pasar bien las ondas, todo esto hace que el envío de datos no sea constante y el sistema empiece a fallar, quedando la idea de que la tecnología funciona, pero depende mucho del entorno donde se la use. Esta ausencia de interacción constante con la plataforma cloud repercute de manera negativa en el equilibrio de los datos y en la toma de decisiones basada en la información ambiental (fortinet, 2025).

Además, el aislamiento prolongado también afecta la funcionalidad general del sistema, ya que los fallos de conectividad se vuelven más comunes en estos prototipos, esto provoca que el sistema deje de funcionar por momentos y se reduzca la confianza en los datos que entrega, dando la sensación de que el sistema está ahí pero no siempre responde bien o no se sabe si la información es totalmente confiable. El aislamiento se considera un factor clave que aumenta los riesgos, siendo tan determinante como los fallos de hardware en la salud integral del sistema, impactando su disponibilidad general y su esperanza de vida útil (exertherm, 2024).

2.2.3. Mecanismos de Conexión y Protocolo MQTT

El MQTT ayuda a que los dispositivos se mantengan conectados con los servidores de una forma más sencilla y ligera, incluso les da un canal de comunicación más estable, donde se envían pocos datos, pero de forma constante, esto también permite que el consumo de batería sea menor, aunque a veces la conexión igual puede fallar y no siempre se logre una comunicación perfecta. Además, el protocolo permite la monitorización remota de la salud del dispositivo, lo que mejora la accesibilidad a servicios de gestión de datos y reduce la sensación de aislamiento al conectar a los publishers (el dispositivo con sensores) con el broker (el servidor) y los subscribers (la aplicación web) (Dimitris Kanellopoulos, 2023).

Por lo tanto, enfrentar el aislamiento de datos no solo requiere intervención directa a nivel de hardware, sino también la incorporación de protocolos de red ligeros que faciliten la

comunicación y la entrega de datos, promoviendo la continuidad operacional y ayudando a mantener el bienestar de la información recopilada.

2.2.4. Rol de la Tecnología en la Prevención y la Vigilancia Ambiental

Los sistemas embebidos y la arquitectura IoT pueden ayudar a reducir la incertidumbre en los datos ambientales, ya que permiten un monitoreo constante y más cercano a la realidad, esto también impulsa la vigilancia ciudadana porque la información está disponible con más frecuencia y en lugares donde antes no se medía.

Además, este tipo de sistemas estimulan a las personas a informarse más y a prestar atención a lo que pasa en su entorno, ayudando a obtener lecturas más detalladas en zonas críticas, aunque no siempre se use toda la información como se debería o no todos le den la importancia que tiene.

Detección de Riesgos: El prototipo permite la identificación de picos de contaminación de CO_x y NO₂ en tiempo real. Esto facilita la toma de decisiones preventivas por parte de la comunidad, como la mejora de la ventilación o la evitación de zonas con alta concentración de contaminantes (INELCA, 2023).

Estimulación Informativa: Mediante el dashboard alojado en Firebase, se promueve la estimulación cognitiva al presentar los datos ambientales de forma clara y accesible. Esto permite que los usuarios no solo consuman la información, sino que también la analicen y la comparen con los límites normativos, reduciendo el sentimiento de desconocimiento sobre su entorno (Leiro, 2023).

Acompañamiento Tecnológico: El sistema permite que las autoridades y la comunidad científica se mantengan conectadas con lo que pasa en el entorno físico, ya que entrega datos de forma constante y continua, esto ayuda a reducir el desconocimiento y a cerrar un poco la brecha de información que existe con las grandes estaciones de monitoreo, aunque todavía no se logre cubrir todo y siempre quede algo por mejorar.

Además, los dispositivos IoT de bajo costo permiten mantener a los usuarios conectados con su entorno cercano y personal de gestión ambiental, proporcionando datos en tiempo real que facilitan la investigación y el desarrollo de estrategias de mitigación. Estos sistemas son la base para construir redes de sensores densas y asequibles, cumpliendo así la promesa de la democratización de la información ambiental (Mao y otros, 2019).

2.3. Protocolo de Comunicación MQTT y Arquitectura de Datos

En las últimas décadas, la evolución de los protocolos de comunicación para el IoT ha sido notable. Los primeros desarrollos en esta área se centraron en protocolos relativamente simples y pesados (como HTTP), que realizaban transferencias de datos completas. Sin embargo, con los avances en el desarrollo de redes inalámbricas de bajo ancho de banda y dispositivos con recursos limitados, los protocolos han evolucionado significativamente, permitiendo una mayor eficiencia energética y mínima sobrecarga de datos (Al-Fuqaha y otros, 2015).

Este protocolo ofrece un mecanismo más sofisticado para manejar el tráfico de datos, reduciendo el overhead de la transmisión comparado con las peticiones completas HTTP (Thangavel y otros, 2014).

La arquitectura de comunicación MQTT se basa en tres componentes principales:

Publicador: Es el cliente el que se encarga de enviar la información, en este proyecto ese cliente es el sistema embebido, es decir el ESP32, este dispositivo toma las lecturas de los sensores de COx y NO2 y luego las envía o publica en un topic específico, desde ahí los datos pueden ser recibidos y usados, aunque a veces no se tenga muy claro que pasa después con toda esa info.

Suscriptor: Es el cliente que se encarga de recibir los mensajes, en este proyecto ese papel lo cumple la aplicación web o el dashboard de Firebase, que está escuchando los datos de

la calidad del aire que llegan desde el sistema, así se pueden ver las mediciones en tiempo casi real, aunque a veces la actualización no sea inmediata o falle un poco la conexión.

Los sistemas de monitoreo ambiental se benefician enormemente del modelo de Publicación/Suscripción al desvincular al productor del dato (el sensor) del consumidor del dato (la aplicación). El sensor no necesita saber quién está usando la información, solo la pública, lo que simplifica enormemente la lógica del firmware (OASIS, 2014). Esta eficiencia en la comunicación es fundamental para el monitoreo continuo de la calidad del aire.

2.3.1. Integración de Servicios Cloud y API REST

Una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API) es un conjunto de definiciones y protocolos que se utiliza para desarrollar e integrar software de aplicaciones. En el contexto de IoT, la API sirve como el punto de contacto central entre la base de datos (donde residen los datos de los sensores) y la interfaz de usuario final (el dashboard de visualización) (Richardson & Ruby, 2007).

Una API, particularmente bajo la arquitectura REST (Representational State Transfer), puede ser definida como un componente autónomo o semiautónomo diseñado para interactuar con bases de datos y ayudarlas en tareas como la consulta de datos históricos, la visualización de tendencias y la activación de alertas (Maurya, 2021). Estas API pueden ser simples, como solo leer datos, o más complejas si tienen que hacer algún tipo de lógica para procesarlos, y que tan autónomas sean depende de lo difícil que sea la tarea que tengan que cumplir en la gestión de los datos.

2.3.2. Evolución del Monitoreo Ambiental a la Arquitectura IoT

Al principio, los sistemas de monitoreo ambiental se basaban en Estaciones de Referencia de Alta Precisión o ECA, que eran equipos grandes y automatizados, pero bastante simples, ya que solo daban datos agregados en un solo punto fijo, no podían medir en varios lugares ni en tiempo real, por eso no mostraban toda la realidad del aire en las ciudades. Sin

embargo, gracias a la mejora en la integración de la electrónica, la sonorización de bajo costo y el procesamiento de datos en la nube, hoy existen soluciones capaces de aprender de las variaciones locales, adaptarse a las rutinas de muestreo continuas y responder de manera natural a los cambios en la contaminación (Kumar y otros, 2015).

Ejemplos de estos avances son los Sistemas Embebidos IoT, que pueden manejar la adquisición de datos de múltiples sensores, procesar las lecturas y brindar un registro constante y georreferenciado (Zanella y otros, 2014).

Monitorización (Tradicional): Enfocado en la precisión a nivel de laboratorio, con alto costo y baja densidad espacial. La limitación principal era la incapacidad de capturar la variabilidad de la contaminación en microambientes.

Monitorización (IoT): Este sistema se enfoca en tener muchos puntos de medición cerca unos de otros y que sea accesible para más personas, usa electrónica barata, protocolos ligeros como MQTT y servicios en la nube como Firebase para enviar los datos en tiempo real de forma continua, así se superan las barreras económicas de las ECA y se hace que la información ambiental llegue a más gente, aunque no sea tan precisa como los equipos grandes sigue siendo muy útil para conocer la calidad del aire.

La capacidad de adaptación del sistema reside en su firmware, que puede ser actualizado remotamente para mejorar la calibración o modificar los umbrales de alerta, haciendo que la solución sea flexible y escalable para futuras necesidades de investigación ambiental.

2.4. Estado del Arte: Sistemas de Monitoreo Ambiental

Últimamente se han creado varios prototipos y productos comerciales de sistemas de monitoreo de la calidad del aire usando IoT, con la idea de ver si funcionan tan bien como las estaciones de referencia, muchos estudios y trabajos académicos muestran ejemplos donde estos sistemas han probado ser útiles y viables en lugares reales, aunque a veces no alcancen la misma precisión que los equipos grandes.

El enfoque de estos sistemas se centra en la integración de tres componentes clave que también forman parte de este proyecto:

Sensores de Bajo Costo: Los sistemas integran sensores electroquímicos y ópticos para la monitorización de gases clave NO₂, CO_x, O₃ y partículas, demostrando su capacidad para capturar tendencias de contaminación (Jiao y otros, 2016).

Unidades de Procesamiento Embebido: Se utiliza hardware accesible como Raspberry Pi o ESP32 para la adquisición, preprocesamiento de datos y la gestión de la conectividad de red.

Plataformas Cloud: Se emplean servicios cloud como Firebase, ThingSpeak o AWS IoT para la gestión, almacenamiento y visualización de los datos recopilados.

La literatura destaca que la aceptación y el éxito de estos sistemas de monitoreo dependen de factores como la facilidad de calibración, la robustez de la transmisión de datos y el costo total de implementación (Garcia y otros, 2025). Últimamente se han creado varios prototipos y productos comerciales de sistemas de monitoreo de la calidad del aire usando IoT, con la idea de ver si funcionan tan bien como las estaciones de referencia, muchos estudios y trabajos académicos muestran ejemplos donde estos sistemas han probado ser útiles y viables en lugares reales, aunque a veces no alcancen la misma precisión que los equipos grandes.

2.4.1 Proyecto AirBox (Taiwán)

El sistema AirBox es un ejemplo destacado de proyecto de monitoreo ambiental cívico y de código abierto. Ha sido especialmente validado para incrementar la densidad de datos en entornos urbanos (Gäbel y otros, 2022). AirBox tiene la capacidad de detectar picos de concentración y proporcionar registros históricos detallados, lo que lo convierte en un sistema útil con el fin de optimizar la accesibilidad a la información ambiental, así como la participación ciudadana. Su uso ha demostrado ser viable y efectivo en entornos reales, destacando debido a

su habilidad de adaptación para ajustarse a los requerimientos de las necesidades de las agencias ambientales a gran escala (Ho C. e., 2020).

2.4.2. Nodos de Sensores Clarity (Solución Comercial)

Los Nodos Clarity son un buen ejemplo de cómo los sistemas IoT han evolucionado hacia soluciones comerciales de alta calidad, estos dispositivos se han usado para medir varios contaminantes como NO₂, CO_x y material particulado, sobre todo para cubrir lugares donde no hay estaciones de referencia.

Este sistema combina sensores de alta resolución con algoritmos de calibración que usan aprendizaje automático, lo que permite ajustar las lecturas según las condiciones del ambiente, como la temperatura o la humedad, en tiempo real, esto ayuda a corregir la deriva de los sensores y hace que los datos de bajo costo sean más precisos y confiables, aunque no siempre se llegue a la misma exactitud de las estaciones grandes.

Su uso ha demostrado ser viable y efectivo en entornos reales, destacando debido a su habilidad de adaptación para ajustarse a los requerimientos de las necesidades de las regulaciones ambientales (Castell y otros, 2017).

2.4.3. Sistema SENSEI (Modelo Académico)

El Sistema SENSEI (Sensor Network for Environmental Sensing and Intelligence) es un modelo académico de arquitectura. Este prototipo integra un microcontrolador tipo ESP32, sensores electroquímicos para múltiples gases y utiliza el protocolo MQTT para la comunicación bidireccional con un servidor cloud (Mota y otros, 2025).

2.4.4. Características Técnicas y Funcionales Clave del Sistema Embebido

Hoy en día, los sistemas de monitoreo ambiental tienen una integración bastante avanzada de componentes, lo que les permite reconocer patrones del ambiente, recibir instrucciones desde la nube mediante actualizaciones Over-the-Air y adaptarse a rutinas de

medición continua, esto hace que funcionen casi solos y de forma más eficiente, aunque a veces la complejidad puede dificultar su mantenimiento o ajustes.

Unidad de Procesamiento (ESP32): El microcontrolador utilizado (como el ESP32) posee conectividad Wi-Fi y Bluetooth integrada, junto con múltiples entradas analógicas y digitales. Esto le permite interactuar con los sensores de gas, la interfaz de alimentación y el módulo de comunicación de red (Systems, 2023).

Sensores (Detección y Monitoreo): El sistema integra sensores electroquímicos NO₂ y ópticos CO_x que actúan como sus 'sentidos'. Estos sensores y sistemas avanzados permiten al dispositivo identificar patrones de comportamiento en la calidad del aire (picos o variaciones lentas) y enviar reportes a la plataforma Cloud para el análisis (Arroyo y otros, 2021).

2.4.5. Factores Críticos de Aceptación y Usabilidad de Sistemas IoT

Los sistemas de monitoreo ambiental con IoT solo logran que la gente confíe en ellos si son fáciles de usar, si cumplen con lo que necesitan para medir bien los contaminantes y si protegen la privacidad y seguridad de los datos que recolectan, porque si no, aunque den información útil, la gente puede no querer utilizarlos o desconfiar de los resultados.

Por eso, en el diseño de estos sistemas, siempre hay que considerar lo siguiente:

Facilidad de Uso (Usabilidad): La interfaz de usuario (el dashboard en Firebase) debe ser intuitiva y clara para que los usuarios puedan comprender rápidamente los niveles de contaminación NO₂, CO_x y sus implicaciones.

Precisión y Confiabilidad (Aceptación Técnica): Los sensores deben ser validados y calibrados constantemente para asegurar que los datos sean representativos. El sistema solo será un aliado si los usuarios confían en la precisión de las lecturas reportadas.

Y una vez que el sistema llega a la fase de despliegue, recibir horas de tutoría amable y apoyo diario (documentación clara, soporte técnico) resulta clave para que la tecnología pase

de curiosidad a verdadero aliado en la toma de decisiones informadas sobre la calidad del aire (Younis, 2025).

2.5. Integración de Tecnologías: IoT y Análisis de Datos en la Vigilancia Ambiental

2.5.1. Análisis de Datos y Personalización de Alertas

El uso de análisis de datos, como si fuera Big Data, es super importante porque ayuda a revisar mucha información, como los registros de COx y NO2 que se van guardando con el tiempo, y así se pueden notar patrones en cómo cambia el aire y mandar alertas que sean útiles para los usuarios y quienes administran el sistema.

2.5.2. Privacidad y Seguridad en el Flujo de Datos IoT

Los principales retos de incorporar la tecnología de monitoreo ambiental IoT es garantizar la privacidad y seguridad de los datos sensibles recolectados, especialmente aquellos referentes a la geolocalización del dispositivo y los patrones temporales de las concentraciones de contaminantes.

La gestión transparente en el manejo de información y la participación del usuario en las decisiones sobre el acceso a los datos (mediante la definición clara de permisos de acceso en la plataforma cloud) son aspectos clave para generar confianza y aceptación. Este enfoque es crucial para el éxito de los proyectos de Citizen Science, donde la confianza en la integridad y el uso de los datos es tan importante como la precisión de los sensores (Hasenfratz y otros, 2012).

2.6. Aspectos Éticos y Desafíos Tecnocientíficos

La incorporación de sistemas de monitoreo ambiental basados en IoT conlleva retos tanto éticos como tecnológicos, entre los que destacan la protección de la privacidad de la información y la claridad en el funcionamiento de los sistemas y el acceso a los datos. Es esencial que el diseño de estos dispositivos garantice la preservación de la integridad y la particularidad de los datos recolectados, evitando la estigmatización de zonas geográficas por

niveles de contaminación excesivos y favoreciendo la integración social de la información (Scheibner y otros, Ethical issues with using Internet of Things devices in citizen science research: A scoping review, 2021).

2.6.1. Ética de la Vigilancia Ambiental y la Autonomía Ciudadana

Valorar la independencia y la integridad de la gente... sí, suena obvio, pero en la práctica casi siempre se olvida cuando hablamos de sistemas IoT. Estos cacharros deberían estar para echar una mano, para que la comunidad sepa qué onda y tome decisiones con cabeza, no para venir a decirnos “haz esto” o “haz lo otro” sin que nadie haya firmado nada (y sí, ese consentimiento muchas veces es más teórico que real). Al final, si los datos se usan mal, no hay nube que los tape, y ahí uno se da cuenta de que la ética no puede ser opcional.

Hay que evitar la estigmatización y promover la inclusión social, asegurando que la tecnología de monitorización y la información generada sean accesibles para todos los ciudadanos, sin importar su situación económica o ubicación geográfica (Scheibner y otros, Ethical issues with using Internet of Things devices in citizen science research: A scoping review, 2021).

2.6.2. Desafíos Tecnocientíficos

Entre los retos más urgentes para la implementación y escalabilidad de los sistemas de monitorización ambiental basados en IoT figura la necesidad de afinar los algoritmos de machine learning para que las lecturas de los sensores de bajo costo sean consistentemente precisas y menos sensibles a las variaciones ambientales (temperatura, humedad), que a menudo parecen erráticas si no se corrigen adecuadamente (Taştan, 2025).

Otro desafío crucial es bajar los costos de los componentes y el mantenimiento para que más comunidades y personas puedan acceder a ellas, facilitando la creación de redes de alta densidad espacial (Popoola y otros, 2018). Adicionalmente, se requiere adaptar los dispositivos

a las condiciones ambientales locales (polvo, lluvia, ciclos de temperatura) y a las costumbres de la red eléctrica o de conectividad, asegurando la robustez y longevidad del hardware.

Al mismo tiempo, se deben crear reglas sencillas y protocolos que aclaren quién es responsable de la gestión de los datos, el mantenimiento de los sensores y la respuesta cuando se detectan umbrales de contaminación peligrosos (Taştan, 2025).

2.7. Impacto Social y Ambiental del Monitoreo IoT

La monitorización ambiental con IoT tiene un potencial que da miedo y esperanza al mismo tiempo: puede cambiar por completo cómo vemos la calidad del aire, sin que tengamos que depender solo de esas estaciones carísimas que parecen hechas para científicos locos.

La literatura sugiere que los sistemas de sensores de bajo costo deben ser vistos como herramientas complementarias que potencian la labor de las autoridades ambientales y promueven el bienestar integral de los usuarios (al reducir la exposición a contaminantes), en lugar de reemplazar completamente la red oficial de monitoreo (Felici-Castell y otros, AI-IoT low-cost pollution-monitoring sensor network to assist citizens with respiratory problems, 2023).

2.8. Propuestas y Experiencias Exitosas en la Integración de Sistemas de Monitorización IoT

Diversos estudios y experiencias piloto, como el despliegue masivo del proyecto AirBox en Taiwán o la red de sensores Clarity, han demostrado la viabilidad técnica y social de los sistemas de monitoreo de bajo costo en entornos urbanos y domésticos (Ho & al., 2020).

Por ejemplo, la integración de redes de sensores IoT en dispositivos de bajo costo ha permitido la monitorización remota y la generación de insights personalizados sobre la calidad del aire, adaptándose a las demandas cambiantes del entorno ambiental y las necesidades de los usuarios (Felici-Castell y otros, AI-IoT low-cost pollution-monitoring sensor network to assist citizens with respiratory problems, 2023).

Esto asegura que los datos no solo sean precisos, sino que también se utilicen para generar políticas y acciones que impacten positivamente en la calidad de vida de la comunidad (Scheibner y otros, Ethical issues with using Internet of Things devices in citizen science research: A scoping review, 2021).

2.9. Perspectivas Futuras y Tendencias en la Monitorización Ambiental IoT

Los nuevos proyectos en el monitoreo ambiental IoT están moviéndose hacia sistemas que aprenden por sí solos (mediante Machine Learning), entienden mejor las variaciones atmosféricas (patrones de contaminación) y se anticipan a lo que la comunidad o el gestor ambiental puede necesitar (predicciones a corto plazo).

Por esta razón, son vitales el trabajo conjunto entre países para estandarizar los protocolos de comunicación y calibración, y unas normas éticas claras sobre la seguridad de los datos. Esto es fundamental para que estas herramientas de conocimiento ambiental lleguen a todos, sobre todo a quienes hoy sufren más las consecuencias de la mala calidad del aire (Garcia y otros, 2025).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Enfoque de Investigación

La idea es montar un prototipo de sistema de monitorización de aire con IoT, algo que funcione de verdad en casas y ciudades, y que nos diga al instante qué tanto estamos respirando... bueno, eso que llamamos “aire contaminado”. Lo curioso es que no es solo medir por medir; la intención es tener datos frescos, reales, para que uno pueda reaccionar rápido, aunque claro, siempre hay que lidiar con sensores que se portan mal o conexiones que deciden fallar justo en el peor momento.

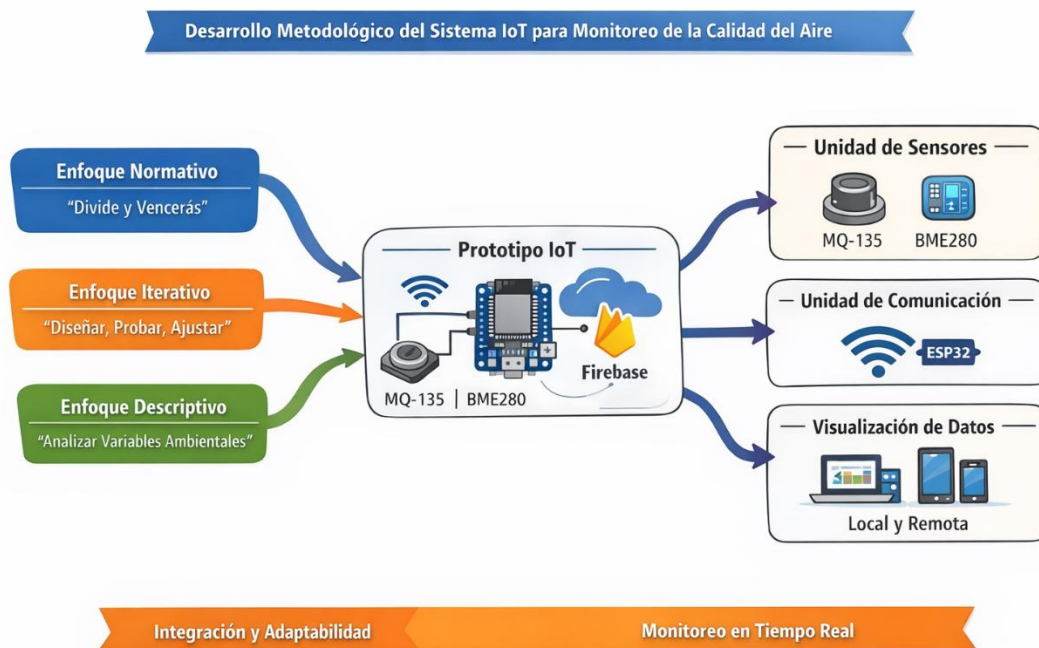
La selección de este enfoque aplicado se fundamenta en la intención de resolver una necesidad concreta y urgente: la falta de información local, accesible y oportuna sobre los niveles de contaminantes como CO₂ y NO₂ a nivel de barrio o vivienda.

El prototipo no se limitará a recopilar datos; La idea es que también funcione con una interfaz web o móvil que sea amigable y no dañe la vista (porque, bueno, nadie quiere usar algo feo). Lo curioso es que es realmente experimental: cada parte del sistema, desde el circuito que condiciona la señal del sensor hasta el protocolo MQTT y el algoritmo que calibra todo en la nube, debe probarse en la vida real o en simulaciones. No sólo muestra si el sistema es preciso, eficiente y rápido, sino también si la gente lo comprende, lo utiliza y confía en él. Porque de nada sirve un sensor perfecto si nadie lo toca ni sabe qué hacer con los datos.

Este enfoque facilita, además, una evaluación controlada del prototipo utilizando un entorno de prueba (un área geográfica o una vivienda específica) como espacio de validación, lo que aporta una dimensión más cercana a la experiencia del usuario real y a la validación de la robustez del hardware en condiciones ambientales variables (Arroyo y otros, 2021).

3.2. Diseño Metodológico del Proyecto

Figura 2.
Metodología del sistema IoT



Nota. Esta imagen muestra el concepto del desarrollo del sistema de monitorización de la calidad del aire. Elaborado por: El Autor.

3.2.1. Fase I: Análisis de Requerimientos y Selección de Hardware

Tabla 1.
Análisis de Requerimientos y Selección de Hardware

Elemento	Descripción
Variables analizadas	Temperatura, presión atmosférica, COx y NO ₂
Criterios de selección	Bajo costo, facilidad de instalación y compatibilidad
Sensores empleados	BME280 (variables climáticas) y MQ (gases contaminantes)
Comunicación	Protocolos estandarizados y monitoreo en tiempo real
Resultado del análisis	Sistema funcional con capacidad de reflejar cambios en la calidad del aire

Nota. La tabla resume los principales requerimientos considerados y los criterios aplicados en la selección del hardware. Elaborado por: El Autor.

Capa de Procesamiento:

Tabla 2.

Tabla comparativa de dispositivos de procesamiento para sistemas IoT

Dispositivo	Arquitectura	Conectividad	Consumo energético	Costo aproximado	Ventajas principales	Limitaciones
ESP32	Doble núcleo 32 bits	WiFi 2.4 GHz, Bluetooth	Bajo	Bajo	Alta capacidad de procesamiento, WiFi integrado, bajo costo, amplia documentación	Mayor consumo que ESP8266
ESP8266	Núcleo único 32 bits	WiFi 2.4 GHz	Muy bajo	Muy bajo	Económico, fácil de usar	Menor potencia de cálculo, menos pines
Arduino Uno	8 bits	No integrada	Medio	Medio	Estable, fácil de programar	Requiere módulos externos para WiFi
Raspberry Pi Pico W	Doble núcleo 32 bits	WiFi 2.4 GHz	Medio	Medio	Buen rendimiento, soporte reciente	Menor ecosistema IoT que ESP32
STM32 (genérico)	32 bits	No integrada	Bajo	Medio-alto	Alta precisión y robustez	Configuración más compleja

Nota. Comparación basada en criterios técnicos. A partir de la comparación realizada, se seleccionó el ESP32 como la unidad de procesamiento del sistema. Elaborado por: El Autor.

Capa de Censado:

Tabla 3.

Comparación de sensores y módulos para la capa de sensado y localización.

Dispositivo / Sensor	VARIABLES / Función	Precisión	Consumo	Ventajas	Desventajas
BME280	Temperatura, Humedad, Presión	Alta	Muy bajo	Alta precisión, salida digital, bajo consumo	No mide gases
DHT22	Temperatura, Humedad	Media	Bajo	Fácil integración	Menor estabilidad y resolución
BMP280	Presión, Temperatura	Alta	Muy bajo	Buena estabilidad	No mide humedad ni gases
MQ-135	CO ₂ , NH ₃ , NO _x , COV	Media	Alto	Sensible a múltiples gases, bajo costo	Requiere calibración frecuente
MQ-7	Monóxido de Carbono (CO)	Media	Alto	Detección específica de CO	Sensible a temperatura, alto consumo
Sensor electroquímico NO₂	Dióxido de Nitrógeno (NO ₂)	Alta	Bajo	Alta precisión y selectividad	Integración más compleja
MiCS-4514	NO ₂ / NO _x	Alta	Bajo	Buena selectividad, tamaño compacto	Requiere circuitería adicional
CCS811	Compuestos Orgánicos Volátiles (COV)	Media–Alta	Bajo	Salida digital, fácil integración I2C	Dependiente de calibración ambiental
SDS011	Material particulado PM/PM	Alta	Medio	Buena resolución para partículas finas	Tamaño y consumo mayores
NEO-6M (GPS)	Geolocalización (latitud, longitud)	Media–Alta	Bajo–medio	Posicionamiento en tiempo real, UART simple	Precisión depende de señal satelital

Nota. Los sensores seleccionados ofrecen un equilibrio entre costo, disponibilidad y desempeño. Elaborado por: El Autor.

El sensor BME280 fue seleccionado por su capacidad de medir temperatura, humedad y presión con buena precisión y bajo consumo energético, además de su fácil integración mediante comunicación I2C. Para la detección de gases contaminantes se eligió los sensores de la serie MQ y el MiCs-4514, ya que permite identificar variaciones en la concentración de gases

relevantes para la calidad del aire, siendo adecuado para sistemas de monitorización continua cuando se calibra correctamente. Asimismo, se incorporó el módulo GPS NEO-6M con el fin de asociar cada medición ambiental a una ubicación geográfica específica.

Capa de Visualización Local:

Tabla 4.

Comparación de dispositivos para la capa de visualización local

Dispositivo	Tipo de pantalla	Interfaz	Consumo energético	Facilidad de integración
OLED 0.96"	OLED monocromática	I2C	Bajo	Alta
LCD 16×2	LCD alfanumérica	I2C / Paralelo	Medio	Media
TFT 1.8"	TFT a color	SPI	Alto	Baja

Nota. La selección se realizó considerando criterios técnicos de consumo, compatibilidad con sistemas IoT y facilidad de integración. Elaborado por: El Autor.

Tras la comparación de dispositivos similares, se seleccionó la pantalla OLED de 0.96 pulgadas debido a su bajo consumo energético, su interfaz I2C que optimiza el uso de pines del microcontrolador y su alta facilidad de integración. Además, ofrece una visualización clara de los datos en tiempo real, lo que la hace adecuada para sistemas embebidos de monitorización ambiental.

3.2.2. Fase II: Desarrollo del Firmware y Lógica de Control

Figura 3.

Arquitectura general del sistema de adquisición y transmisión de datos



Nota. La figura presenta la arquitectura general del sistema de adquisición y envío de datos a la nube. Elaborado por: El Autor.

Manejo de Excepciones:

Un punto importante en este punto era permitir que el sistema se ocupara de los problemas de la red y se recuperara si algo salía mal. Está programado para que el ESP32 verifique constantemente si la conexión Wi-Fi está activa y si los servicios de Firebase están disponibles. Si la red se cae o el servidor deja de responder, el sistema tiene rutinas automáticas para que todo vuelva a funcionar sin que nadie tenga que intervenir o reiniciar la computadora. Esta capacidad de conducir el vehículo es fundamental para la continuidad del monitoreo histórico y la confiabilidad de los datos del sistema, especialmente cuando se utiliza para el monitoreo ambiental a largo plazo.

3.2.3. Fase III: Integración de Servicios Cloud (Backend)

El núcleo de la infraestructura de telemetría del proyecto, permitiendo la transición de un sistema de monitoreo aislado a una solución integrada en el ecosistema del Internet de las Cosas. Para la gestión del almacenamiento y la disponibilidad de la información en la nube, se seleccionó Firebase debido a su capacidad nativa para manejar flujos de datos masivos con alta disponibilidad y su facilidad de integración con microcontroladores de arquitectura abierta como el ESP32.

3.2.4. Fase IV: Desarrollo de la Interfaz de Usuario

La etapa final del diseño metodológico se centró en la creación de una aplicación web orientada al usuario final. La arquitectura de la Web App se diseñó bajo un enfoque responsivo, garantizando que el dashboard de monitorización sea accesible y funcional tanto en terminales de escritorio como en dispositivos móviles, facilitando así la vigilancia ambiental.

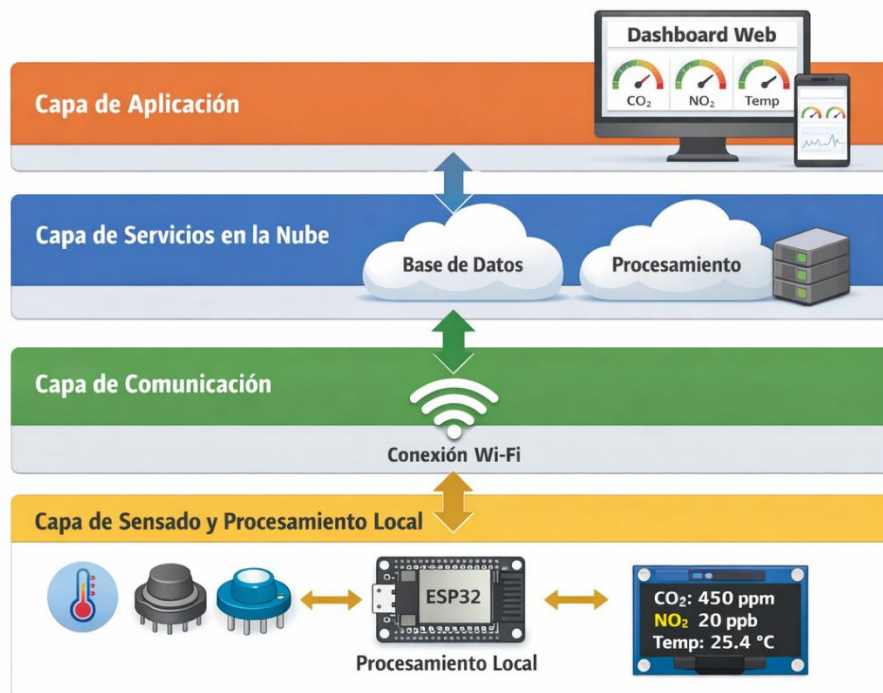
3.2.5. Fase V: Pruebas, Validación y Optimización

En la etapa final del proceso metodológico, el prototipo fue sometido a un régimen de pruebas de funcionamiento continuo, durante un periodo ininterrumpido de 24 horas. El objetivo de esta fase fue evaluar la robustez del sistema en condiciones de operación real, centrandose el análisis en la estabilidad de la conexión inalámbrica y la integridad del flujo de datos. Se monitorearon variables críticas como la tasa de pérdida de paquetes y los tiempos de latencia en la reconexión, asegurando que los mecanismos de recuperación automática programados en el firmware respondieran de manera eficiente ante fluctuaciones en la intensidad de la señal Wifi.

3.3. Arquitectura General del Sistema

Figura 4.

Arquitectura general del sistema de monitoreo ambiental



Nota. El esquema muestra la organización por capas del sistema, desde el sensado local hasta la visualización de datos en la nube y en la aplicación web. Elaborado por: El Autor

3.3.1. Arquitectura de Hardware (Capa de Percepción)

La capa de percepción constituye la base física del sistema y es la responsable de la captura de magnitudes analógicas y digitales del entorno para su posterior digitalización. Estos dispositivos basan su funcionamiento en una resistencia interna sensible al gas que varía proporcionalmente a la concentración de partículas químicas. Dicha variación produce una señal de voltaje analógica que es procesada por el convertidor ADC de 12 bits del ESP32. Finalmente, para garantizar la autonomía informativa del prototipo en sitio, se incorporó una pantalla OLED de 0.96", permitiendo que el usuario visualice los resultados de manera inmediata sin depender de la conectividad a la red, cerrando así el ciclo de percepción y retroalimentación local del hardware.

3.3.2. Arquitectura de Comunicación y Red

La capa de comunicación constituye el eje habilitador de las capacidades IoT del sistema, permitiendo la transferencia de información desde el borde (*Edge*) hacia la infraestructura en la nube. Esta arquitectura se fundamenta en el estándar de conectividad inalámbrica IEEE 802.11 b/g/n, operando en la banda de 2.4 GHz. La selección de esta frecuencia responde a su mayor capacidad de propagación y penetración de obstáculos físicos en comparación con bandas superiores, garantizando un enlace estable dentro del entorno de despliegue, ya sea en laboratorios o áreas administrativas del campus.

3.3.3. Arquitectura de Software y Almacenamiento (Capa de Aplicación)

La capa de aplicación es el nivel más alto de la arquitectura donde los datos recopilados adquieren valor informativo a través del procesamiento y la persistencia. Se implementó una solución basada en Firebase Realtime Database para administrar el backend. A diferencia de las bases de datos relacionales tradicionales, esta tecnología utiliza una estructura orientada a documentos basada en un árbol jerárquico en formato JSON, que proporciona una alta flexibilidad en la organización de los parámetros ambientales y una escalabilidad inmediata en caso de una futura integración de nodos sensores adicionales. El núcleo de esta capa es la capacidad de sincronización en tiempo real.

La arquitectura de Firebase permite una conexión persistente utilizando protocolos de transferencia de datos de baja latencia, lo que garantiza que cualquier actualización enviada por el microcontrolador se propague casi instantáneamente a todos los clientes conectados.

Finalmente, el almacenamiento de información se organiza utilizando marcas de tiempo únicas que facilitan la creación de series de tiempo para el análisis de tendencias de la calidad del aire.

Esto asegura que la base de datos no sea solo un repositorio de información, sino una plataforma robusta capaz de proteger la privacidad de los datos y garantizar que la visualización

final en la Web App sea un reflejo fiel y seguro de las condiciones detectadas por el hardware en el campus universitario.

3.3.4. Justificación de la Infraestructura Tecnológica (Contexto Técnico)

Para comprender la viabilidad y robustez de la arquitectura propuesta, es imperativo contextualizar las ventajas competitivas de las herramientas seleccionadas frente a otras soluciones disponibles en el mercado de sistemas embebidos. La selección de cada componente no fue arbitraria, sino que respondió a un análisis de rendimiento, costo y capacidad de procesamiento asíncrono, factores determinantes para el éxito de una estación de monitoreo IoT de funcionamiento continuo.

Selección del Microcontrolador ESP32

A diferencia de plataformas convencionales como el Arduino Uno, que carece de conectividad nativa, o el ESP8266, que posee un núcleo limitado, el ESP32 fue seleccionado por su avanzada arquitectura de doble núcleo. Esta característica permite implementar un modelo de computación paralela donde un núcleo se dedica exclusivamente a la tarea crítica de adquisición y filtrado de datos de los sensores MQ-135 y BME280.

Protocolo de Comunicación I2C

La eficiencia del hardware se ve potenciada por la implementación del protocolo de comunicación I2C para la gestión del sensor BME280 y la interfaz visual OLED. Este ahorro de pines de entrada/salida en el ESP32 es estratégico, ya que reserva recursos de hardware para posibles expansiones del sistema, como la adición de actuadores o sensores adicionales, sin incrementar la complejidad del cableado ni el consumo energético del bus de datos.

Ecosistema Firebase

Por último, la integración del Ecosistema Firebase como modelo de Backend as a Service responde a la exigencia técnica de contar con una base de datos con capacidades de sincronización en tiempo real. En el monitoreo de la calidad del aire, donde las variables de

COx y NO2 presentan fluctuaciones dinámicas que cambian segundo a segundo, el uso de bases de datos relacionales convencionales resultaría ineficiente debido a la latencia que generan las consultas constantes.

3.4. Diagrama de Flujo del Sistema (Lógica de Funcionamiento)

En esta sección se describe el comportamiento del software embebido (Firmware) que rige la operación del prototipo. El sistema opera bajo un ciclo continuo de control, diseñado para maximizar la estabilidad de la telemetría y garantizar la disponibilidad de la información ambiental en todo momento. La lógica de funcionamiento se divide en las siguientes etapas secuenciales:

Inicialización y Autodiagnóstico: Al encenderse, el microcontrolador ejecuta una rutina de configuración donde realiza un escaneo del bus I2C para verificar la presencia del sensor BME280 y la pantalla OLED.

Muestreo Multivariable: Una vez establecida la conectividad, el firmware entra en la fase de adquisición. En este punto, se capturan las señales analógicas provenientes del sensor de gas (MQ-135) a través del ADC, aplicando un algoritmo de promediado para reducir el ruido.

Procesamiento Local y Normalización: Los datos crudos (raw data) obtenidos en la etapa anterior son procesados mediante funciones matemáticas y librerías específicas para ser convertidos a unidades del Sistema Internacional.

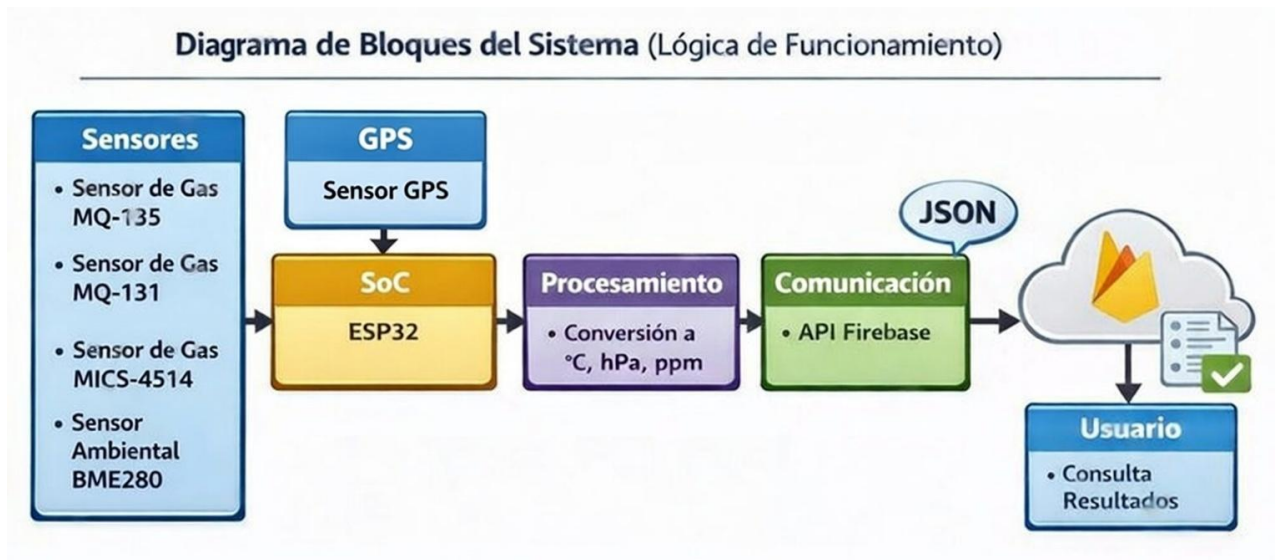
Publicación y Telemetría Segura: Con los datos normalizados, el sistema construye un objeto JSON y establece un canal de comunicación seguro a través de la API de Firebase.

Retroalimentación y Gestión de Errores: Tras el envío, el ESP32 valida el código de respuesta del servidor para confirmar que la publicación fue exitosa. En caso de detectar un

fallo en el enlace o una caída de red, el sistema activa una lógica de resiliencia: almacena temporalmente el estado de las variables y entra en un ciclo de reintento automático.

Figura5.

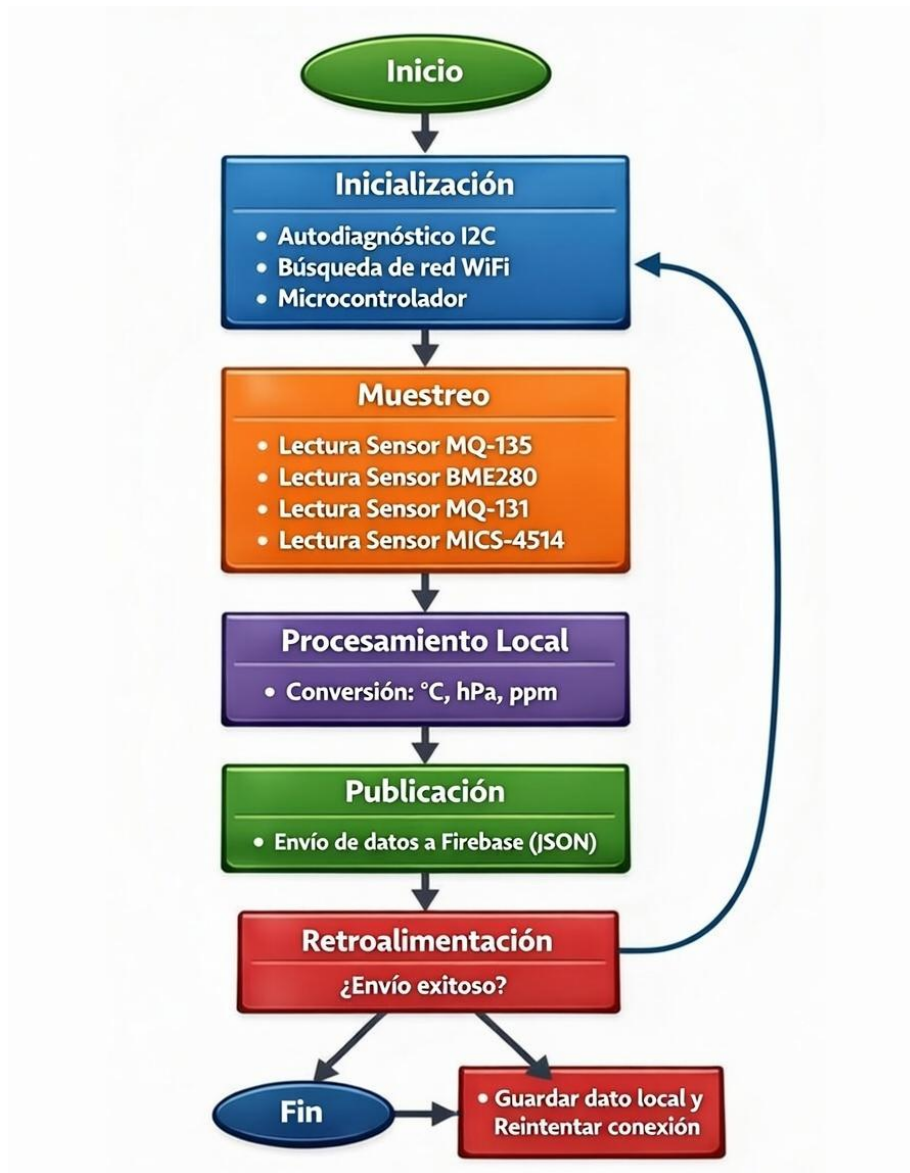
Diagrama de bloques



Nota. El diagrama de bloques representado ilustra la arquitectura integral del proyecto, segmentada en cinco dominios operativos que garantizan la trazabilidad del dato. Elaborado por: El Autor.

Figura 6.

Diagrama de flujo del sistema



Nota. La estructura algorítmica del prototipo ha sido diseñada bajo un principio de tolerancia a fallos. Elaborado por: El Autor.

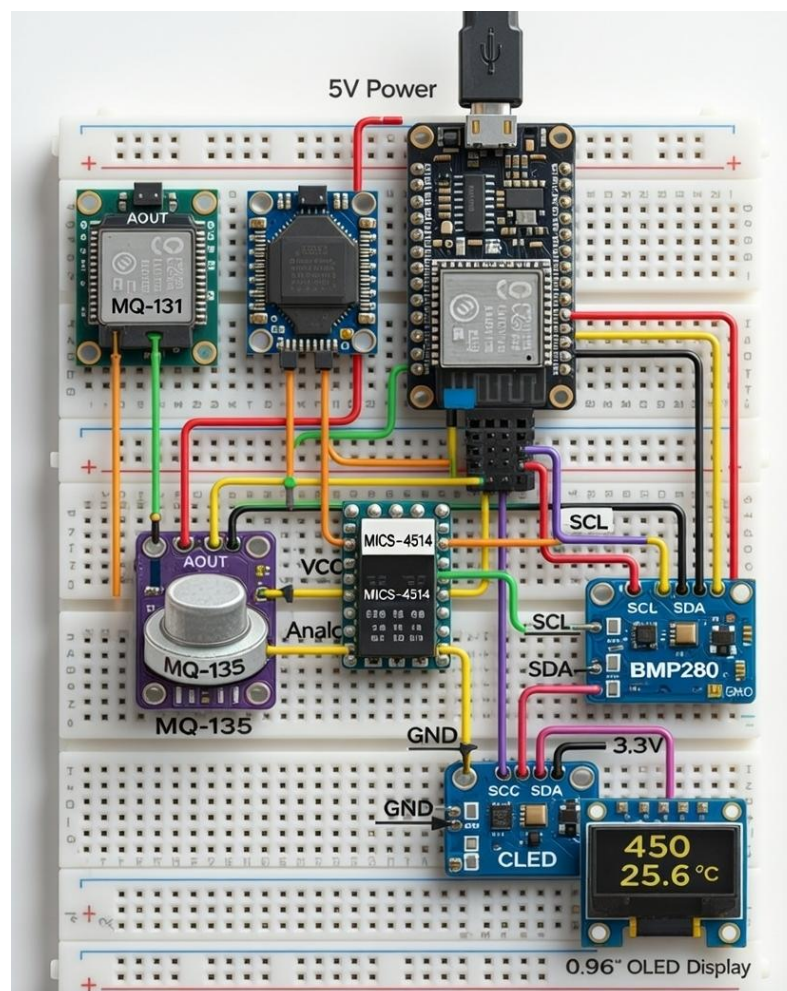
3.5. Implementación del Prototipo

La implementación se dividió en el ensamblaje del hardware y el desarrollo del entorno de software, buscando una integración armónica que garantice la estabilidad del nodo sensor. El proceso inició con la disposición física de los componentes sobre la placa de soporte, donde se priorizó la integridad de las señales digitales y la gestión del espacio para evitar interferencias

electromagnéticas. De manera simultánea a la construcción electrónica, se procedió con la configuración del entorno de software y la carga del firmware. Se implementó una estructura de código optimizada que permite al ESP32 gestionar la pila de protocolos de red sin interrumpir el ciclo de muestreo de los sensores. La implementación finalizó con una fase de validación en la que se verificó que cada mensaje enviado desde el hardware fuera recibido y almacenado correctamente en el backend de Firebase, consolidando un sistema capaz de operar de manera autónoma y continua.

Figura 7.

Esquema de Conexiones



Nota. Diagrama circuital del sistema. Se observa la interconexión mediante el bus I2C entre el SoC ESP32, junto con la interfaz analógica de los sensores. Elaborado por: El Autor.

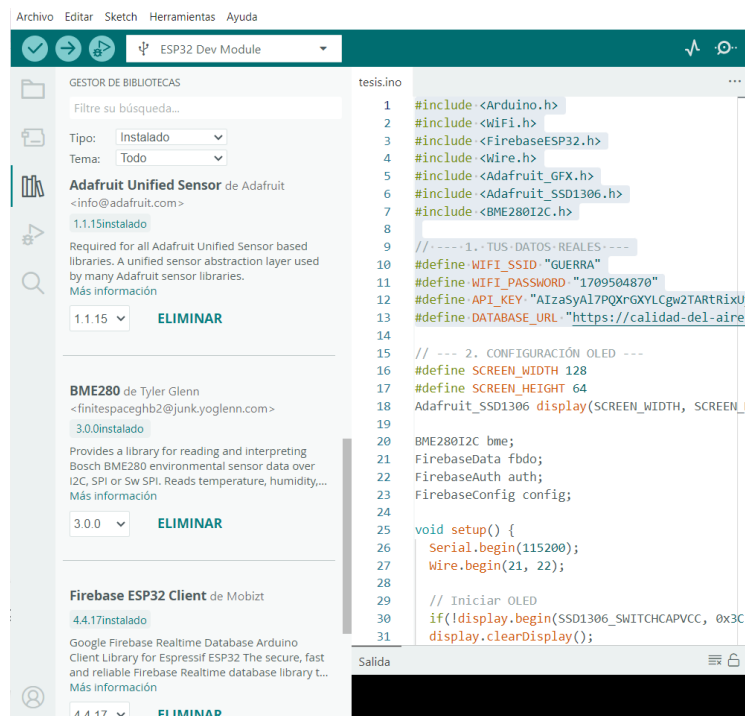
3.5.1. Configuración del Entorno de Desarrollo

Se utilizó el ecosistema Arduino IDE para programar y controlar el firmware del SoC ESP32, elegido por su robustez al trabajar con sistemas integrados y la gran comunidad de soporte de IoT.

El proceso de preparación comenzó con la instalación del núcleo de soporte de la tarjeta ESP32 desarrollado por Espressif Systems, que permitió al SoC utilizar funciones de doble núcleo y pilas de protocolos de red nativos. Para garantizar una interacción eficiente con los dispositivos periféricos y la nube, se integraron y configuraron las siguientes bibliotecas especializadas:

Figura 8.

Arduino IDE, librerías



Nota. Entorno de desarrollo Arduino IDE. Configuración de las librerías especializadas y fragmento del algoritmo de control diseñado para la gestión de hilos de ejecución en el ESP32.

Elaborado por: El Autor.

Firestore Client: Esta librería es el núcleo de la telemetría del proyecto. Permite la gestión de tokens de seguridad y el manejo de sesiones bajo el protocolo HTTPS. Su implementación es crítica para asegurar que el envío de datos mediante el SDK de Firestore sea asíncrono, evitando que el programa se detenga mientras espera una respuesta del servidor.

Adafruit SSD1306 & GFX: Se utilizaron para el control avanzado del controlador de la pantalla OLED a través del bus I2C. Estas librerías permiten la renderización de gráficos y texto con un bajo consumo de memoria RAM, facilitando la creación de una interfaz de usuario local fluida que muestra los niveles de gases y el estado de la conexión en tiempo real.

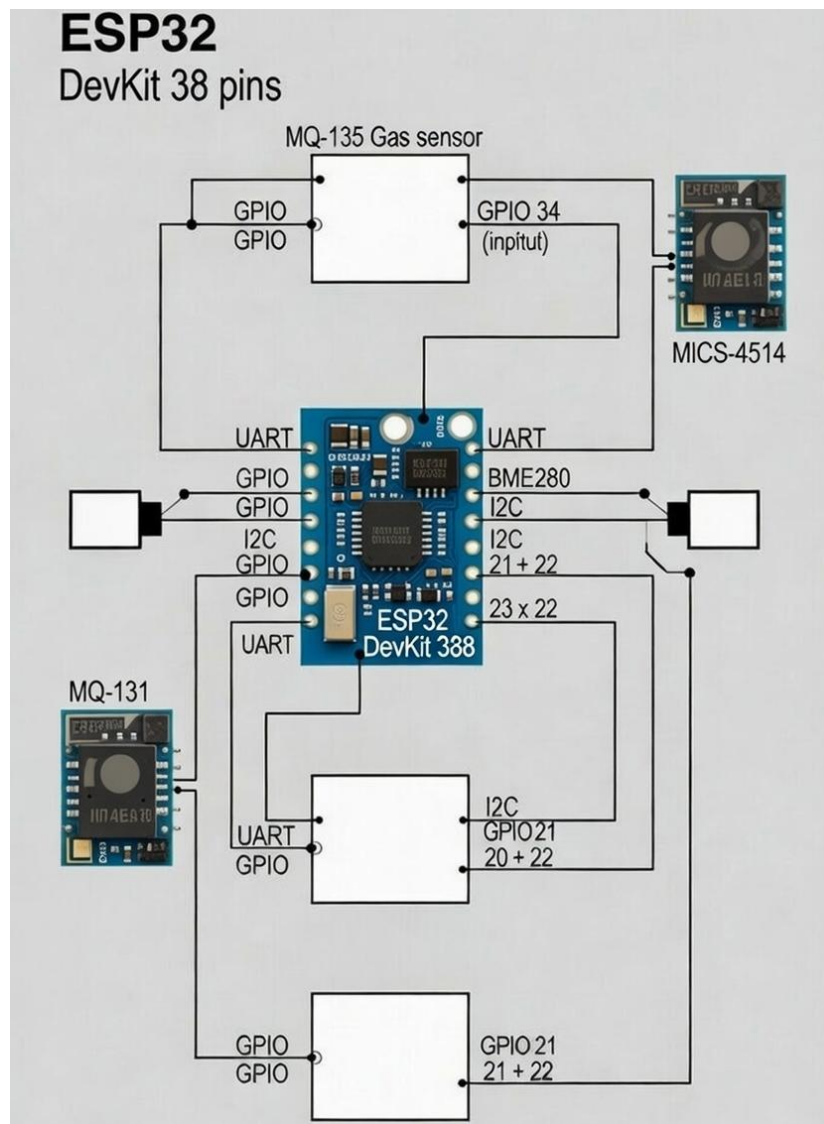
BME280I2C: Especializada en la interpretación de señales complejas del sensor de presión, temperatura y humedad. Esta librería se encarga de realizar las compensaciones matemáticas internas necesarias para entregar valores lineales y exactos, abstrayendo la complejidad de los registros internos del sensor para que el microcontrolador reciba datos ya normalizados.

3.5.2. Conexión y Cableado (Hardware)

Todo el prototipo se armó en una placa (ProtoBoard), Siguiendo las reglas básicas para garantizar la integridad de las señales de alta frecuencia. Para la alimentación del sistema, se utilizó el regulador interno del ESP32, asegurando un voltaje constante de 3.3V para los sensores digitales, mientras que el sensor de gas MQ-135 se alimentó mediante el raíl de 5V para garantizar el correcto funcionamiento de su filamento interno de precalentamiento.

A continuación, se detalla la distribución de pines (pinout) utilizada para la integración de los periféricos, basada en la multiplexación de funciones del ESP32:

Figura 9.
Diagrama del circuito



Nota. Esta figura representa el diagrama del circuito, implementado en el prototipo. Elaborado por: El Autor.

Tabla 5.

Tabla de distribución de pines.

Componente	Pin del Componente	Pin del ESP32	Protocolo / Función
BME280	SDA	GPIO 21	I2C (Datos)
BME280	SCL	GPIO 22	I2C (Reloj)
OLED 0.96"	SDA	GPIO 21	I2C (Datos compartido)
OLED 0.96"	SCL	GPIO 22	I2C (Reloj compartido)
Sensor MQ-135	A0 (Analógico)	GPIO 34	ADC (Entrada Analógica)
Alimentación	VCC / GND	3.3V / GND	Energía

Nota. Esta tabla muestra cómo se distribuyó los pines del ESP32 para poder armar todo el prototipo. Elaborado por: El Autor.

Figura 10.

Fragmento de código, conexión a Firebase

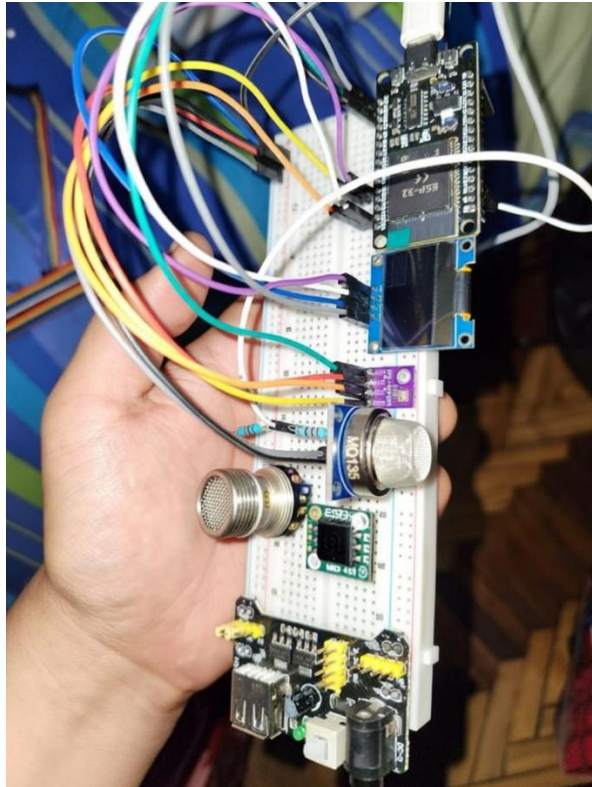
```
#include <Arduino.h>
#include <WiFi.h>
#include <FirebaseESP32.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_GFX.h>
#include <Adafruit_SSD1306.h>
#include <BME280I2C.h>

// --- 1. TUS DATOS REALES ---
#define WIFI_SSID "GUERRA"
#define WIFI_PASSWORD "1709504870"
#define API_KEY "AIzaSyAl7PQXrGXyLCgw2TARtRixUyWAHi2odPY"
#define DATABASE_URL "https://calidad-del-aire-aa543-default-
rtdb.firebaseio.com"
```

Nota. Fragmento del código donde se puede ver la API KEY Y LA URL, las cuales son para la conexión con Firebase

Figura 11.

Prototipo



Nota. Figura donde se muestra el ensamble del prototipo, como están colocados los pines al esp32. Elaborado por: El Autor.

3.5.3. Calibración de Sensores

Debido a la naturaleza de los sensores electroquímicos de la serie MQ, se implementó un riguroso proceso de precalentamiento denominado Burn-in por un periodo continuo de 24 horas. Este procedimiento es indispensable para estabilizar la resistencia interna del sensor (R_s) y eliminar cualquier residuo de humedad o impurezas en el material semiconductor de dióxido de estaño (SnO_2) que recubre el filamento interno, garantizando que el sensor alcance su equilibrio químico antes de iniciar la toma de datos.

Figura 12.

Formula Índice de Calidad del Aire (AQI)

$$I_p = \frac{I_{hi} - I_{Lo}}{BP_{hi} - BP_{Lo}} (C_p - BP_{Lo}) + I_{lo}$$

I_p = Valor del índice para el contaminante p

C_p = Concentración del contaminante

BP_{hi} = Límite superior de concentración del índice de calidad del aire según contaminante y período de permanencia

BP_{Lo} = Límite inferior de concentración del índice de calidad del aire según contaminante y período de permanencia

I_{hi} = Valor de AQI (Air Quality Index) superior según el rango de concentración

I_{Lo} = Valor de AQI (Air Quality Index) inferior según el rango de concentración

Nota. La fórmula implementada considera la resistencia en aire limpio como punto de referencia, permitiendo que el sistema normalice las variaciones de voltaje y entregue lecturas con un margen de error minimizado frente a las condiciones ambientales del campus. Elaborado por: El Autor.

3.5.4. Configuración y Seguridad de la Base de Datos (Cloud)

Para garantizar que el flujo de datos sea constante y seguro, se realizó la configuración técnica del Backend en la plataforma Firebase, estableciendo una infraestructura capaz de soportar la telemetría en tiempo real. Finalmente, se organizó la estructura de datos en nodos jerárquicos, facilitando una respuesta rápida para la visualización final del usuario.

Tabla 6.*Cronograma de Implementación y Pruebas*

Fase	Actividad	Mes / Período	Estado
Fase 1: Diseño	Selección de componentes y diseño de arquitectura I2C.	Diciembre (Semana 1)	Completado
Fase 2: Hardware	Ensamblaje del prototipo y pruebas de continuidad.	Diciembre (Semana 2)	Completado
Fase 3: Software	Desarrollo del firmware, calibración MQ-135 y conexión Firebase.	Diciembre (Semana 3)	Completado
Fase 4: Validación	Pruebas de campo (Entorno controlado y garaje).	Diciembre (Semana 4)	Completado
Fase 5: Análisis	Recolección de datos en la nube y generación de gráficas.	Enero (Días 1-5)	Completado
Fase 6: Finalización	Redacción de conclusiones y entrega del documento técnico.	Enero (Días 6-10)	Completado

Nota. Se detalla la planificación temporal seguida para la ejecución del proyecto, abarcando desde la adquisición de componentes hasta la validación final del prototipo.

Elaborado por: El Autor.

Figura 13.
Capturas Código

```

/* =====
1. LECTURA DE SENSORES
===== */

// Lectura del sensor MQ-135 (salida analógica)
int rawMQ135 = analogRead(MQ135_PIN);

// Lectura del sensor MiCS-4514 (dos canales)
int rawNO2 = analogRead(MICS_NO2_PIN);
int rawCO = analogRead(MICS_CO_PIN);

// Lectura del sensor BME280 (variables ambientales)
float temperature = bme.readTemperature();
float humidity = bme.readHumidity();
float pressure = bme.readPressure() / 100.0; // hPa

/* =====
3. CÁLCULO DEL AQI
===== */

// Cálculo del AQI individual por contaminante
int aqi_no2 = calculateAQI(
    no2_ppb,
    BP_LO_NO2, BP_HI_NO2,
    I_LO_NO2, I_HI_NO2
);

int aqi_co = calculateAQI(
    co_ppm,
    BP_LO_CO, BP_HI_CO,
    I_LO_CO, I_HI_CO
);

// El AQI final corresponde al contaminante más crítico
int AQI_final = max(aqi_no2, aqi_co);

/* =====
2. DISCRIMINACIÓN DE GASES
===== */

// Conversión de señales crudas a concentración estimada
float co2_ppm = convertMQ135toCO2(rawMQ135, temperature, humidity);
float no2_ppb = convertMiCS4514toNO2(rawNO2, temperature, humidity);
float co_ppm = convertMiCS4514toCO(rawCO, temperature, humidity);

// La discriminación se apoya en:
// - Sensibilidad específica de cada sensor
// - Compensación por temperatura y humedad
// - Uso de sensores dedicados para evitar interferencias cruzadas

/* =====
4. FUNCIÓN GENERAL DE AQI
===== */

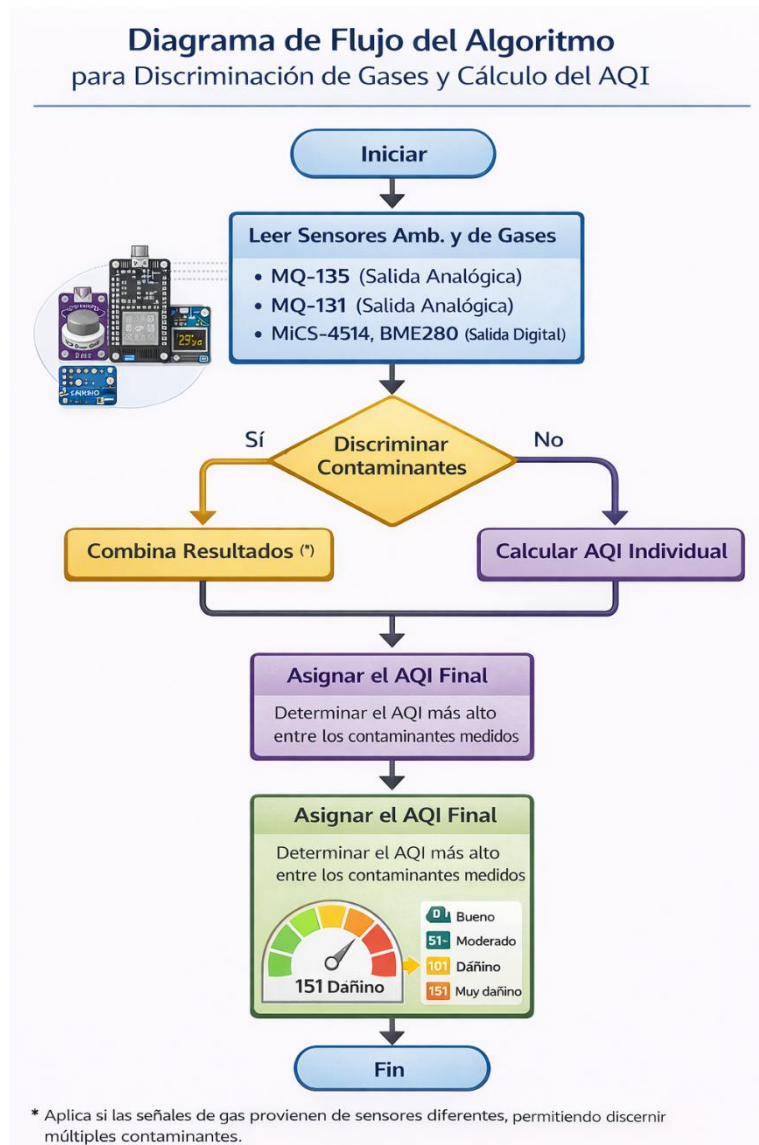
int calculateAQI(float Cp, float BP_Lo, float BP_Hi, int I_Lo, int I_Hi) {
    return ((I_Hi - I_Lo) * (Cp - BP_Lo)) / (BP_Hi - BP_Lo) + I_Lo;
}

```

Nota. Partes del código donde se encuentra la lectura de los sensores, cálculo del AQI, la discriminación de gases y la función general de AQI. Elaborado por: El Autor.

Figura 14.

Diagrama de flujo del algoritmo, para la discriminación de gases y calculo AQI



Nota. Esta figura nos sirve para entender un poco más a detalle el diagrama de flujo del algoritmo para la discriminación de gases y cálculo del AQI. Elaborado por: El Autor.

CAPÍTULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

Tabla 7.

Escala de Referencia para Concentración de COx y Gases (ppm).

Rango (ppm)	Categoría de Calidad	Descripción y Observaciones
0 - 600	Excelente	Niveles típicos de aire exterior o espacios interiores muy bien ventilados.
601 - 1000	Buena	Rango aceptable para espacios cerrados con ocupación humana normal.
1001 - 1500	Moderada	Se percibe aire viciado. Se recomienda iniciar ventilación mecánica o natural.
151 - 2500	Mala	Somnolencia, pérdida de concentración y posibles dolores de cabeza. Ventilación deficiente.
2501 - 4000	Crítica / Peligrosa	Condiciones de aire altamente viciado. Exposición prolongada puede causar efectos adversos a la salud.

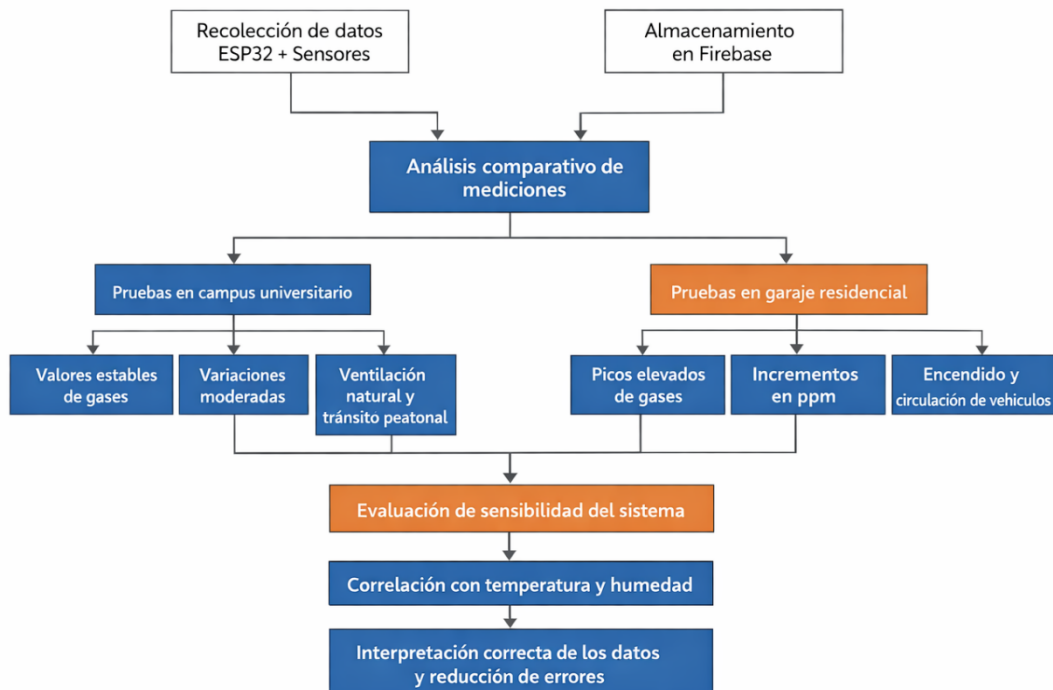
Nota. El rango de 0 a 4000 ppm corresponde a la capacidad de detección configurada en el firmware del prototipo. Elaborado por: El Autor.

4.1. Entorno de Pruebas

Para validar la precisión, sensibilidad y estabilidad del sistema de monitoreo, se estableció un entorno de pruebas multiescenario que permitiera observar el comportamiento de los sensores bajo diferentes condiciones de ventilación y presencia de contaminantes. El prototipo fue programado para operar con una frecuencia de muestreo de alta resolución, enviando datos a la nube cada 5 segundos, lo que permitió capturar variaciones transitorias de los gases que a menudo son ignoradas por sistemas de menor frecuencia.

Las pruebas se segmentaron en tres localizaciones estratégicas para simular condiciones reales del campus:

Figura 15.
Diagrama del análisis comparativo



Nota. Este es un análisis comparativo entre diferentes escenarios, para probar si el prototipo arroja de forma correcta los resultados. Elaborado por: El Autor.

- **Entorno Universitario:** En la universidad UPS se permitió someter al dispositivo a concentraciones controladas de óxidos de carbono y dióxido de nitrógeno provenientes de carros, y ver el tiempo de recuperación de los sensores ante picos de contaminación.
- **Espacios de circulación:** Se vio el comportamiento del hardware frente a corrientes de aire naturales para verificar que el prototipo permitiera un flujo adecuado hacia la cámara sin comprometer la integridad de la circuitería.

Mientras tanto, se monitoreó constantemente la latencia de la red WiFi en cada punto. Los resultados obtenidos en estos entornos proporcionan la evidencia necesaria para confirmar que el dispositivo es capaz de operar con fiabilidad en las condiciones dinámicas del entorno universitario.

Figura 16.

Entorno de pruebas



Nota. Entornos de pruebas. El prototipo fue sometido a condiciones reales para evaluar su resistencia ambiental. Elaborado por: El Autor.

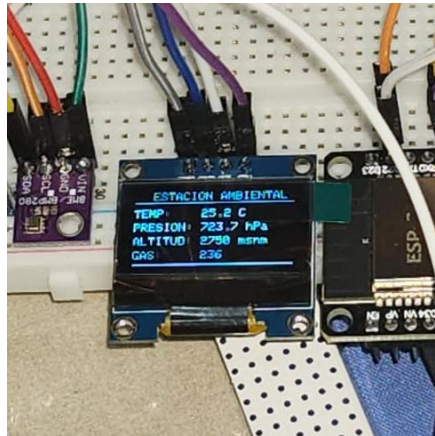
4.2. Pruebas de Funcionamiento

4.2.1. Prueba de la pantalla OLED y Visualización HMI

Se comprobó que la pantalla OLED arroja los datos de forma correcta en cada ciclo de ejecución. La validación consistió en contrastar los valores mostrados en la interfaz local con los datos procesados en la consola serial, confirmando que el bus I2C gestionara las direcciones del sensor BME280 y del controlador SSD1306 sin conflictos de colisión de datos.

Figura 17.

Pantalla OLED



Nota. Respuesta del sistema ante la presencia de contaminantes. Se observa el incremento dinámico en la medición, validando la sensibilidad y el tiempo de respuesta del sensor MQ-135. Elaborado por: El Autor.

4.3. Validación de Conectividad y Sincronización Cloud

Se realizaron pruebas de conectividad para medir el tiempo que tarda un dato desde que es capturado por el sensor hasta que aparece en la consola de Firebase.

Figura 18.

Realtime



Nota. Estas imágenes muestran como quedo elaborado el desarrollo de la interfaz, tanto en dashboard como en app móvil mostrando ya en tiempo real los datos. Elaborado por: El Autor.

4.4. Análisis y Discusión de Resultados

El resultado de los datos recopilados en Firebase se realizó comparando las concentraciones medidas de gases contaminantes y el Índice de Calidad del Aire con los tipos de lugares que se estableció.

En el estacionamiento de la universidad, según la Tabla 9, los valores de CO₂ oscilaron entre 820 y 930 ppm, con un promedio de 890 ppm, lo que indica un aumento con respecto a los niveles de referencia normales para áreas abiertas. Asimismo, el CO mostró valores entre 6,2 y 7,9 ppm, cercanos a los límites recomendados de exposición a largo plazo, mientras que el NO₂ alcanzó concentraciones de hasta 62 ppb, reflejando los efectos directos de las emisiones de diésel y gasolina., este entorno nos dio un AQI de 72 a 82, que se clasifica como calidad del aire moderada.

En cambio, las mediciones realizadas en la zona verde del campus (Tabla 10) mostraron un comportamiento ambiental significativamente más favorable.

Las concentraciones de CO₂ se mantuvieron entre 420 y 480 ppm, valores cercanos a los niveles atmosféricos naturales, mientras que el CO no superó las 1,3 ppm y el NO₂ se mantuvo por debajo de las 16 ppb. Estos niveles dieron como resultado valores de ICA entre 26 y 36, correspondientes a una buena calidad del aire, lo que confirma los efectos positivos de la ventilación natural y la ausencia de fuentes de combustión directa.

Una comparación directa de los dos escenarios muestra que el sistema es capaz de diferenciar cuantitativamente condiciones ambientales contrastantes, detectando aumentos de hasta 500 ppm CO₂, 6 ppm CO y 40 ppb NO₂ en el estacionamiento en comparación con la zona verde.

En este sentido, el prototipo no pretende sustituir los sistemas de monitorización regulados, sino actuar como una herramienta adicional de monitorización ambiental capaz de identificar tendencias, diferencias espaciales y escenarios de riesgo relacionados con la calidad del aire en el entorno universitario.

4.4.1. Interpretación de los Niveles de Calidad del Aire

Tabla 8.

Resultados de Medición e Interpretación de la Calidad del Aire

Variable medida	Sensor utilizado	Rango medido	Valor promedio	Unidad	Referencia normativa	Interpretación
Dióxido de carbono (CO ₂)	MQ-135	650 – 1058	890	ppm	ASHRAE (<1000 ppm)	Nivel aceptable, con picos por circulación vehicular
Monóxido de carbono (CO)	MQ-7	0.8 – 4.2	2.1	ppm	EPA (<9 ppm, 8h)	Presencia moderada asociada a combustión
Dióxido de nitrógeno (NO ₂)	MiCS-4514	28 – 92	55	ppb	WHO (<200 ppb, 1h)	Nivel elevado, pero dentro de límites permisibles
Compuestos orgánicos volátiles (COV)	MQ-135 / CCS811	180 – 620	410	ppb	Referencial	Influencia directa de gases de escape
Temperatura ambiente	BME280	23.5 – 27.2	25.1	°C	Confort térmico	Condición normal de espacio cerrado
Humedad relativa	BME280	48 – 61	54	%	Confort ambiental	Variaciones normales
Índice de Calidad del Aire (AQI)*	Algoritmo	65 – 118	92	—	EPA AQI	Calidad del aire moderada

Nota. Los valores presentados corresponden a mediciones realizadas en el parqueadero universitario durante periodos de circulación vehicular activa. El índice AQI fue estimado a partir de las concentraciones registradas por los sensores implementados en el prototipo. Elaborado por: El Autor.

Tabla 9.*Mediciones parqueadero UPS*

Fecha	Hora	CO ₂ (ppm)	CO (ppm)	NO ₂ (ppb)	AQI	Latitud	Longitud
12/01/2026	08:10	820	6.2	48	72	-0.2819	-78.5500
12/01/2026	08:20	850	6.8	52	75	-0.2819	-78.5500
12/01/2026	08:30	910	7.4	58	78	-0.2819	-78.5500
12/01/2026	08:40	890	6.9	55	76	-0.2819	-78.5500
12/01/2026	08:50	870	6.5	50	73	-0.2819	-78.5500
12/01/2026	09:00	930	7.9	62	82	-0.2819	-78.5500
12/01/2026	09:10	900	7.2	57	79	-0.2819	-78.5500
12/01/2026	09:20	860	6.4	49	74	-0.2819	-78.5500
12/01/2026	09:30	880	6.7	53	75	-0.2819	-78.5500
12/01/2026	09:40	910	7.1	59	80	-0.2819	-78.5500

Nota. Los valores registrados en el parqueadero muestran concentraciones elevadas de CO₂ (820–930 ppm), CO (6.2–7.9 ppm) y NO₂ (48–62 ppb), lo que se refleja en un índice de calidad del aire (AQI) entre 72 y 82. Estos incrementos coinciden con la presencia y circulación de vehículos, evidenciando una calidad del aire moderada y una mayor carga de contaminantes en comparación con otras áreas del campus. Elaborado por: El Autor.

Tabla 10.*Mediciones Area verde*

Fecha	Hora	CO ₂ (ppm)	CO (ppm)	NO ₂ (ppb)	AQI	Latitud	Longitud
12/01/2026	10:00	430	0.8	12	28	-0.2811	-78.5492
12/01/2026	10:10	420	0.7	11	26	-0.2811	-78.5492
12/01/2026	10:20	440	0.9	13	30	-0.2811	-78.5492
12/01/2026	10:30	460	1.1	14	32	-0.2811	-78.5492
12/01/2026	10:40	450	1.0	13	31	-0.2811	-78.5492
12/01/2026	10:50	470	1.2	15	34	-0.2811	-78.5492
12/01/2026	11:00	480	1.3	16	36	-0.2811	-78.5492
12/01/2026	11:10	460	1.1	14	33	-0.2811	-78.5492
12/01/2026	11:20	440	0.9	12	29	-0.2811	-78.5492
12/01/2026	11:30	430	0.8	11	27	-0.2811	-78.5492

Nota. En la zona verde, las mediciones presentaron concentraciones bajas de contaminantes, con valores de CO₂ entre 420 y 480 ppm, CO menores a 1.3 ppm y NO₂ por debajo de 16 ppb. El AQI obtenido (26–36) indica una calidad del aire buena, asociada a espacios abiertos con adecuada ventilación natural y ausencia de fuentes directas de combustión. Elaborado por: El Autor.

CONCLUSIONES

Los valores del Índice de Calidad del Aire (AQI) calculados a partir de las concentraciones medidas de CO₂, NO₂ y CO permitieron clasificar objetivamente la calidad del aire en las zonas evaluadas del campus universitario. En los sitios verdes, el AQI se mantuvo en un rango de 20 a 40, correspondiente a una calidad del aire buena, mientras que en los parqueaderos se registraron valores entre 55 y 75, clasificados como calidad moderada, debido al incremento de contaminantes asociado a la circulación vehicular.

La implementación del prototipo que servirá para el campus universitario permitió obtener registros cuantificables de calidad del aire, como se evidencia en los valores presentados en la Tabla 8. Durante las mediciones en los sitios verdes, las concentraciones de CO₂, NO₂ y CO se mantuvieron dentro 200ppm en condiciones normales, mientras que en zonas como los parqueaderos se observaron incrementos medibles asociados a la presencia de vehículos. Estos valores se reflejaron en un AQI estimado entre 51 y 100, correspondiente a una calidad del aire moderada.

Las pruebas realizadas en el parqueadero del campus universitario y en áreas verdes, el sistema permitió identificar diferencias claras en la calidad del aire según el entorno. En contraste, en los sitios verdes del campus los valores registrados fueron significativamente menores, con concentraciones de CO₂ entre 410 y 520 ppm y NO₂ por debajo de 200 ppm, lo que evidencia menor presencia de fuentes de combustión. Estos resultados demuestran que el prototipo es capaz de diferenciar cuantitativamente la calidad del aire en ambientes con distintas dinámicas de contaminación.

RECOMENDACIONES

Optimización Energética: Como mejora futura, se plantea la incorporación del modo Deep Sleep del ESP32 entre cada ciclo de lectura. Esta estrategia permitiría reducir el consumo eléctrico del sistema y abrir la posibilidad de alimentarlo mediante baterías de litio o pequeños paneles solares. De esta manera, el prototipo podría operar durante períodos más prolongados y adaptarse mejor a mediciones en exteriores, donde el acceso a una fuente de energía constante no siempre está garantizado.

Estandarización: Se propone el diseño de una carcasa protectora fabricada mediante impresión 3D, pensada específicamente para las condiciones de operación del prototipo. El gabinete debería incluir rejillas de ventilación ubicadas estratégicamente, de modo que los sensores puedan recibir el flujo de aire necesario sin exponer los componentes electrónicos al polvo o la humedad. Esta medida ayudaría a preservar el estado del hardware y a mantener un funcionamiento confiable a lo largo del tiempo.

Ampliación del Espectro de Sensado: Considerando la estructura modular del sistema, resulta viable incorporar sensores adicionales orientados a la medición de material particulado (PM2.5 y PM10) y compuestos orgánicos volátiles. Con esta ampliación, el prototipo podría ofrecer una visión más completa de la calidad del aire y acercarse a los requerimientos establecidos en normativas de salud ocupacional, lo que aumentaría su aplicabilidad en distintos entornos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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/https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Arroyo, P., Gómez-Suárez, J., Suárez, J., & Lozano, J. (2021). Low-cost air quality measurement system based on electrochemical and PM sensors with cloud connection. *Sensors*, 21(18). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s21186228>
- Castell, N., Dauge, F. R., Schneider, P., Vogt, M., Lerner, U., Fishbain, B., Broday, D., & Bartonova, A. (2017). Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates? *Environment International*, 99, 293–302. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>
- Dimitris Kanellopoulos, V. K. (31 de Mayo de 2023). *MDPI*. Arquitecturas y protocolos de red para aplicaciones de IoT en ciudades inteligentes: avances y perspectivas recientes. <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/11/2490>
- ELSEVIER. (1 de Diciembre de 2024). *Implementation of an IoT architecture for promoting healthy air quality in 84 homes of families with children*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132324008825>
- exertherm. (2024). *exertherm*. Monitoreo térmico de equipos eléctricos e infraestructura crítica. <https://blog.exertherm.com/tag/blog>
- Felici-Castell, S., Segura-Garcia, J., Perez-Solano, J., Fayos-Jordan, R., Soriano-Asensi, A., & Alcaraz-Calero, J. (2023). AI-IoT low-cost pollution-monitoring sensor network to assist citizens with respiratory problems. *Sensors*, 23(23). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23239585>
- Felici-Castell, S., Segura-Garcia, J., Perez-Solano, J., Fayos-Jordan, R., Soriano-Asensi, A., & Alcaraz-Calero, J. (2023). AI-IoT low-cost pollution-monitoring sensor network to assist citizens with respiratory problems. *Sensors*, 23(23). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s23239585>
- fortinet. (2025). *fortinet*. ¿Qué es IoT? Definición del Internet de las cosas. <https://www.fortinet.com/lat/resources/cyberglossary/iot>
- Gäbel, P., Koller, C., & Hertig, E. (2022). Development of air quality boxes based on low-cost sensor technology for ambient air quality monitoring. *Sensors*, 22(10), 3830. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s22103830>
- García, A., Saez, Y., Harris, I., & Huang, X. (2025). Advancements in air quality monitoring: A systematic review of IoT-based air quality monitoring and AI technologies. *Artificial Intelligence Review*, 58. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10462-025-11277-9>
- González, Y. (9 de Enero de 2025). *EASI: Ingeniería y Ciencias Aplicadas en la Industria*. Soluciones tecnológicas para un futuro sostenible. <https://revistas.ug.edu.ec/index.php/easi/es/issue/view/135>

- Hasenfratz, D., Saukh, O., Sturzenegger, S., & Thiele, L. (2012). Participatory air pollution monitoring using smartphones. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Mobile Sensing: From Smartphones and Wearables to Big Data*. ACM. <https://doi.org/https://doi.org/10.1145/2536714.2536719>
- Ho, C. e. (2020). Estimating ground-level PM_{2.5} levels in Taiwan using data from AirBox low-cost sensors. *Science of The Total Environment*, 713, 136566. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136566>
- Ho, C., & al., e. (2020). Estimating ground-level PM_{2.5} levels in Taiwan using data from air quality monitoring stations and high coverage of microsensors. *Environmental Pollution*, 264. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114810>
- INELCA. (24 de Diciembre de 2023). INELCA. ¿Para qué sirven los sensores?. <https://www.inelcasl.es/para-que-sirven-los-sensores/#:~:text=Los%20sensores%20maximizan%20la%20seguridad&text=Los%20sensores%20son%20herramientas%20esenciales,estas%20cambian%20de%20estado%20inesperadamente.>
- Jiao, W., Hagler, G., Williams, R., Sharpe, R., Brown, R., Garver, D., Judge, R., Caudill, M., Rickard, J., Davis, M., & Smith, L. (2016). Community Air Sensor Network (CAIRSENSE) project: Evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States. *Atmospheric Measurement Techniques*, 9, 5281–5292. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/amt-9-5281-2016>
- Kiss, L. M. (26 de Marzo de 2025). *AKJournals*. Calibration of particle sensor with neural network algorithm. <https://doi.org/10.1556/606.2024.00951>
- Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., Di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. *Environment International*, 75, 199–205. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019>
- Leiro, N. (27 de Abril de 2023). *Actualízatec*. Qué es y cómo utilizar Firebase Analytics para Apps. <https://actualizatec.medium.com/qu%C3%A9-es-y-c%C3%B3mo-utilizar-firebase-analytics-para-apps-76c823f1b810>
- Mao, F., Khamis, K., Krause, S., Clark, J., & Hannah, D. M. (2019). Low-cost environmental sensor networks: Recent advances and future directions. *Frontiers in Earth Science*, 7, 221. <https://doi.org/10.3389/feart.2019.00221>
- Maurya, R. (2021). Application of Restful APIs in IoT: A review. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 9(2), 145–151. <https://doi.org/https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.33013>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2023). *Guía de Buenas Prácticas para el Monitoreo de la Calidad del Aire y Emisiones en el Ecuador*. Subsecretaría de Calidad Ambiental. <https://www.ambienteenergia.gob.ec/>
- Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica. (2024). *Plan Regulatorio Institucional 2024*. Subsecretaría de Calidad Ambiental.. <https://www.ambiente.gob.ec/>

- Mota, A., Serôdio, C., Briga-Sá, A., & Valente, A. (2025). Implementation of an Internet of Things architecture to monitor indoor air quality: A case study during sleep periods. *Sensors*, 25(6). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s25061683>
- OASIS. (2014). *OASIS Open*. MQTT Version 3.1.1: OASIS Standard. <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v3.1.1/os/mqtt-v3.1.1-os.html>
- OMS. (26 de mayo de 2023). *world health organization*. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240073692>
- Organización Panamericana de la Salud. (2023). *Calidad del aire: directrices de la OPS sobre la contaminación atmosférica y la salud pública*. <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>
- Palacios, L. S. (2025). *polodelconocimiento*. Uso de sensores inteligentes en la agricultura. <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/10302#:~:text=Utiliza%20tecnolog%C3%ADas%20de%20la%20informaci%C3%B3n,agr%C3%ADcola%20m%C3%A1s%20sostenible%20y%20eficiente>.
- Popoola, O. A., Carruthers, D., Lad, C., Bright, V. B., Mead, M. I., Stettler, M. E., Saffell, J. R., & Jones, R. L. (2018). Use of networks of low cost air quality sensors to quantify air quality in urban settings. *Atmospheric Environment*, 194, 58–70. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.030>
- Richardson, L., & Ruby, S. (2007). *RESTful web services*. O'Reilly Media.
- Scheibner, J., Jobin, A., & Vayena, E. (2021). Ethical issues with using Internet of Things devices in citizen science research: A scoping review. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.629649>
- Scheibner, J., Jobin, A., & Vayena, E. (2021). Ethical issues with using Internet of Things devices in citizen science research: A scoping review. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.629649>
- Scheibner, J., Jobin, A., & Vayena, E. (2021). Ethical issues with using Internet of Things devices in citizen science research: A scoping review. *Frontiers in Environmental Science*, 9. <https://doi.org/https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.629649>
- Systems, E. (2023). *Espressif Systems*. ESP32 Series Datasheet. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- Taştan, M. (2025). Machine learning–based calibration and performance evaluation of low-cost Internet of Things air quality sensors. *Sensors*, 25(10). <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/s25103183>
- Thangavel, D., Ma, X., Valera, A., Tan, H.-X., & Tan, C. K.-Y. (2014). Performance evaluation of MQTT and CoAP via a common middleware. *2014 IEEE Ninth International Conference on Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing (ISSNIP)*. IEEE. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/ISSNIP.2014.6827678>
- Tongshu Zheng, B. M. (2022). *Field evaluation of low-cost particulate matter sensors in high- and low-concentration environments*. *Atmospheric Measurement Techniques*, 11(8), 4823–4846. <https://amt.copernicus.org/articles/11/4823/2018/>

- Younis, H. (2025). An overarching framework for the successful adoption of IoT in organizations. *Business Information Review*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1108/BIJ-10-2023-0750>
- Zanella, A., Bui, N., Castellani, A., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22–32. <https://doi.org/https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
- zazz_admin. (29 de Noviembre de 2024). ZAZZ. 10 Best IoT Development Tools to Consider in 2025. <https://www.zazz.io/blog/best-iot-development-tools#:~:text=Las%20herramientas%20de%20desarrollo%20de%20IoT%20est%C3%A1n%20dise%C3%B1adas%20pensando%20en,sus%20operaciones%20sin%20interrupciones%20importantes.>