Application of IoT technologies in a prototype sensor for air quality monitoring in the city of Cartagena with a focus on identifying improvement strategies

Aplicación de tecnologías IoT en prototipo de sensor para monitoreo de calidad del aire en la ciudad de Cartagena con enfoque en identificación de estrategias de mejora

Juan David Alemán Herrera[1], Keyner De Jesús Crespo Rodríguez[2], Yordis Daniel Gómez Bastidas[2], Jorge Manuel Barrios Sanchez[1]

[1] programa de especialidad en analítica de datos, corporación universitaria Rafael Núñez. jalemanh21@campusuninunez.edu.co, jorge.barrios@campusuninunez.edu.co

[2] programa de ingeniería de sistemas de la corporación universitaria Rafael Núñez. kcrespor21@campusuninunez.edu.co, yomezb21@campusuninunez.edu.co

Resumen

Este estudio presenta el desarrollo y aplicación de un prototipo IoT de bajo costo para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Cartagena, Colombia. El sistema integra un microcontrolador ESP32, un Arduino UNO, sensores de gases de la serie MQ y un sensor DHT de temperatura y humedad para la adquisición, procesamiento y transmisión de datos hacia la plataforma ThingSpeak. Las mediciones fueron realizadas en cuatro puntos urbanos que representan diferentes condiciones ambientales y de movilidad: Mamonal, el Centro Histórico, la Terminal de Transporte y Crespo. Los datos registrados fueron analizados mediante estadística descriptiva y comparados de acuerdo con el índice de calidad del aire estimado por el prototipo. Los resultados mostraron mayores valores registrados del índice de calidad del aire en Mamonal y la Terminal de Transporte, zonas caracterizadas por actividad industrial y alto flujo vehicular, respectivamente, mientras que en el Centro Histórico y Crespo se observaron valores inferiores y más estables. No obstante, estos resultados se interpretan como mediciones generadas por el prototipo desarrollado y no como equivalentes directos a las mediciones obtenidas mediante estaciones de referencia certificadas, debido a la sensibilidad de los sensores MQ de bajo costo frente a las condiciones ambientales y a la necesidad de realizar procesos de calibración y validación más amplios. El estudio demuestra la viabilidad del uso de tecnologías IoT como herramienta exploratoria de bajo costo para obtener información distribuida espacialmente sobre la calidad del aire y establece una base para futuras mejoras relacionadas con la calibración de sensores, períodos de monitoreo más prolongados y comparación con estaciones de referencia.

Palabras clave: Contaminación atmosférica; Sensores ambientales; Tecnologías IoT; Vigilancia ambiental.

Abstract

This study presents the development and application of a low-cost IoT prototype for air quality monitoring in the city of Cartagena, Colombia. The system integrates an ESP32 microcontroller, an Arduino UNO, MQ-series gas sensors, and a DHT temperature and humidity sensor for data acquisition, processing, and transmission to the ThingSpeak platform. Measurements were collected at four urban locations representing different environmental and mobility conditions: Mamonal, the Historic Center, the Transportation Terminal, and Crespo. The recorded data were analyzed using descriptive statistics and compared according to the air-quality index estimated by the prototype. The results showed higher recorded air-quality index values in Mamonal and the Transportation Terminal, areas characterized by industrial activity and high vehicular flow, respectively, while lower and more stable values were observed in the Historic Center and Crespo. However, these results are interpreted as measurements generated by the developed prototype rather than as direct equivalents of measurements obtained from certified reference stations, considering the sensitivity of low-cost MQ sensors to environmental conditions and the need for more extensive calibration and validation. The study demonstrates the feasibility of using IoT technologies as a low-cost exploratory tool for obtaining spatially distributed air-quality information and provides a basis for future improvements involving sensor calibration, longer monitoring periods, and comparison with reference monitoring stations.

Keywords: Air pollution; Environmental sensors; IoT technologies; Environmental monitoring.

Introducción

La contaminación atmosférica representa uno de los desafíos ambientales más apremiantes del siglo XXI, afectando directamente la salud pública y la calidad de vida de millones de personas alrededor del mundo (Guerra Catagña, 2026). Aproximadamente 7 millones de muertes prematuras ocurren anualmente debido a la exposición combinada a la contaminación del aire ambiente y doméstico, siendo el 99% de la población mundial expuesta a niveles de contaminación que exceden los límites recomendados (OMS, 2024). Cifras más recientes sitúan la contaminación del aire como responsable de 4.2 millones de muertes prematuras al año a nivel mundial, asociadas principalmente a enfermedades cardiovasculares, respiratorias y accidentes cerebrovasculares derivados de la exposición a material particulado fino (Gonzales, 2025.).

En Colombia, la problemática de la calidad del aire ha adquirido especial relevancia en los últimos años. Datos recientes indican que una persona muere cada 50 minutos por enfermedades relacionadas con la contaminación del aire en el país (Ochoa, 2017). Esta situación ha posicionado a Colombia como el país número 82 con la peor calidad del aire en 2024, según la empresa suiza IQAir, con un índice de Calidad del Aire (ICA) de 60 (IQAir España, s. f.). A nivel nacional, se han identificado ocho regiones —entre ellas Bogotá, Medellín, Cali, Barranquilla, Bucaramanga, Pereira y Cartagena— como responsables de generar el 41% del material contaminante emitido en el país, lo que evidencia que el problema no se limita a las grandes capitales sino que también compromete a ciudades intermedias con fuerte actividad industrial y vehicular (Ideam, 2026). Entre las principales fuentes identificadas se encuentran el parque automotor —particularmente las motocicletas, que representan más de la mitad de los vehículos en circulación— y el transporte de carga pesada que utiliza combustibles diésel de calidad aún inferior a los estándares internacionales.

Cartagena de Indias, ciudad histórica y turística del Caribe colombiano, no es ajena a esta problemática. La concentración de PM2.5 en Cartagena es actualmente 4.1 veces superior al valor de referencia anual de PM2.5 de la OMS (Gonzales, 2025.). Uno de los primeros estudios en caracterizar sistemáticamente la calidad del aire de la ciudad encontró que, si bien las concentraciones de gases como el dióxido de azufre y el monóxido de carbono se mantenían dentro de los límites normativos nacionales, las partículas finas permanecían en niveles elevados, especialmente en sectores cercanos a vías de alto tráfico vehicular (Gonzales, 2025.). Más de una década después, reportes recientes confirman que esta tendencia persiste: las altas concentraciones de material particulado en la ciudad continúan atribuyéndose a las operaciones industriales, portuarias y al tráfico vehicular constante, con registros que superan el límite máximo permisible anual (Gonzales, 2025.). Investigaciones previas han documentado, además, que los niveles de contaminantes en sectores de alto tráfico vehicular superan consistentemente las normativas nacionales, especialmente en lo referente a material particulado.

El Establecimiento Público Ambiental (EPA) de Cartagena mantiene actualmente cuatro estaciones de monitoreo ubicadas en Mamonal, Cardique, el cuartelillo de Olaya Herrera (Policía) y en La Bocana, sin embargo, la cobertura es insuficiente para obtener una caracterización detallada de la calidad del aire en toda la ciudad (Gonzales, 2025.). Esta limitación en la densidad espacial de las estaciones oficiales es, precisamente, uno de los vacíos que las tecnologías emergentes de monitoreo distribuido buscan atender.

En este contexto, el Internet de las Cosas (IoT) emerge como una solución tecnológica prometedora para ampliar las capacidades de monitoreo ambiental. El monitoreo en tiempo real mediante sensores IoT implica el uso de dispositivos interconectados que recopilan, procesan y transmiten datos sobre diferentes variables ambientales. Esta tecnología permite la implementación de redes de sensores de bajo costo que complementan las estaciones de monitoreo tradicionales, proporcionando datos georreferenciados con alta resolución espacial y temporal. Diversas revisiones de literatura coinciden en que las redes de sensores de bajo costo (Low-Cost Sensor Networks, LCSN) han demostrado un potencial considerable para el monitoreo hiperlocal y la evaluación de exposición ambiental, aunque su precisión depende en gran medida de procesos de calibración adecuados frente a instrumentos de referencia (Lopez-Restrepo *et al.,* 2021; Carotenuto, *et al., 2023*). En particular, se ha señalado que factores como la temperatura, la humedad y el envejecimiento de los sensores pueden afectar su desempeño, por lo que la validación experimental —como la contemplada en la metodología del presente estudio— resulta un paso indispensable antes del despliegue en campo.

Experiencias similares en otras ciudades respaldan la viabilidad de este enfoque. En India, por ejemplo, se ha implementado una red IoT de sensores de bajo costo dentro de un campus universitario para el monitoreo hiperlocal de la calidad del aire, encontrando una alta correlación entre sensores colocalizados y validando la posibilidad de escalar un mismo modelo de calibración a toda la red (*Investigating IoT-based low-cost sensor network for real-time hyper-local air quality monitoring and exposure assessment - ScienceDirect*, s. f.).

De manera similar, en Birmingham (Reino Unido) se desplegó durante doce meses una red anidada de sensores de material particulado que combinó unidades comerciales y desarrolladas académicamente, demostrando que este tipo de redes puede alcanzar niveles de monitoreo comparables a los de instrumentos de referencia y aportar información específica por ubicación que las estaciones tradicionales no capturan(*What can we learn from nested IoT low-cost sensor networks for air quality? A case study of PM2.5 in Birmingham, UK - Cowell - 2024 - Meteorological Applications - Wiley Online Library*, s. f.). En el ámbito de nodos de bajo costo específicamente orientados a gases y material particulado, se ha reportado el desarrollo de sensores capaces de medir monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno y partículas mediante sensores electroquímicos e infrarrojos, alimentados incluso por energía solar, lo que refuerza la pertinencia de arquitecturas como la propuesta en este trabajo.

El presente proyecto surge de la necesidad de desarrollar herramientas accesibles y efectivas para el monitoreo de la calidad del aire en Cartagena. A través de la integración de sensores ambientales con el microcontrolador ESP32 y la plataforma de visualización ThingSpeak, se propone un sistema IoT capaz de medir en tiempo real los principales contaminantes atmosféricos en diferentes zonas de la ciudad. En este contexto, las tecnologías IoT y las redes de sensores de bajo costo ofrecen una alternativa para complementar el monitoreo convencional mediante la adquisición y transmisión de variables relacionadas con la calidad del aire, permitiendo obtener información distribuida espacialmente en diferentes puntos de una ciudad. El estudio se focalizó en cuatro sectores estratégicos: Mamonal (zona industrial), Centro Histórico (área turística y comercial), Terminal de Transporte (alta congestión vehicular) y Crespo (zona residencial), permitiendo así obtener una caracterización diversa de las condiciones ambientales urbanas.

El valor agregado de esta iniciativa radica en su enfoque integral: no solo busca generar datos técnicos sobre la calidad del aire, sino que aspira a crear conciencia ciudadana y proporcionar información que sirva de base para la toma de decisiones en políticas públicas ambientales. La democratización del acceso a datos ambientales mediante tecnologías de bajo costo representa un paso fundamental hacia ciudades más inteligentes y sostenibles, una tendencia que ya se observa en experiencias internacionales donde redes de sensores comunitarias y académicas complementan la vigilancia gubernamental tradicional(*What can we learn from nested IoT low-cost sensor networks for air quality? A case study of PM2.5 in Birmingham, UK - Cowell - 2024 - Meteorological Applications - Wiley Online Library*, s. f.).

Metodología Propuesta

El proyecto se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con diseño experimental aplicado y paradigma empírico-analítico, orientado al diseño, construcción y validación de un prototipo IoT de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire (Calderón *et al.,* 2020). A continuación, se describe con detalle técnico la arquitectura, los componentes, el diseño esquemático, el algoritmo de adquisición/transmisión de datos y el procedimiento experimental de campo, con un nivel de detalle suficiente para que cualquier investigador pueda replicar el prototipo.

1. Arquitectura del Sistema

El sistema se organizó en cuatro capas funcionales: (1) capa de sensado, compuesta por los sensores MQ (gases) y DHT11/DHT22 (temperatura y humedad); (2) capa de adquisición, a cargo del Arduino UNO, que realiza el muestreo analógico/digital de los sensores; (3) capa de procesamiento y conectividad, a cargo del ESP32, que empaqueta las lecturas y gestiona la transmisión inalámbrica; y (4) capa de almacenamiento y visualización en la nube, mediante la plataforma ThingSpeak. La comunicación entre Arduino y ESP32 se realizó vía puerto serial (UART), mientras que el ESP32 transmite los datos a ThingSpeak mediante protocolo HTTP/MQTT sobre red Wi-Fi, en intervalos de muestreo definidos.

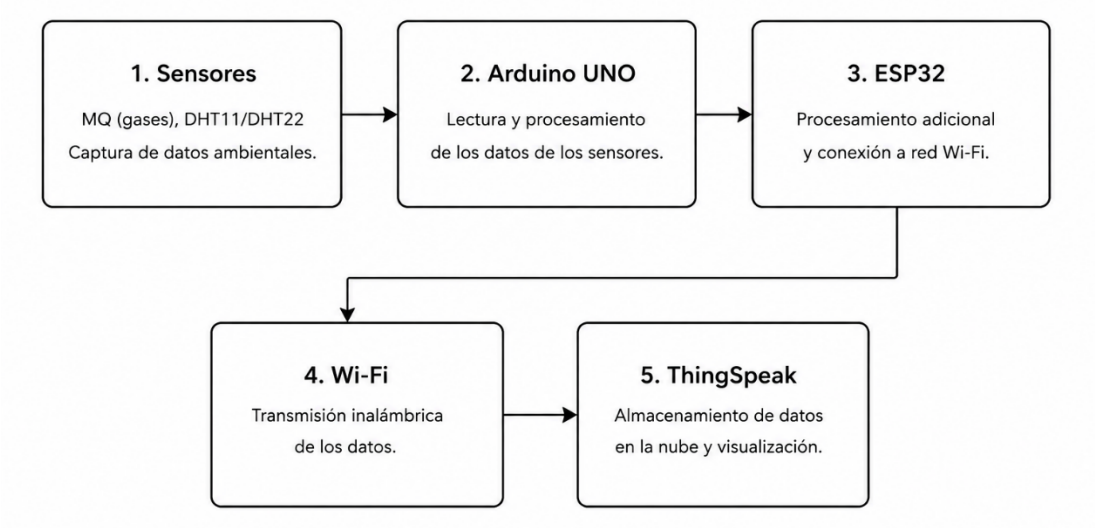


Figura 1. Arquitectura general del sistema de monitoreo IoT.
Fuente: Autoría propia.

2. Selección y Especificación de Componentes de Hardware

Para la construcción del prototipo se seleccionaron los siguientes componentes, elegidos por su relación costo-beneficio y su compatibilidad para proyectos educativos/experimentales de monitoreo ambiental:

Tabla 1. Componentes de hardware utilizados en el prototipo.

Componente	Función en el sistema	Especificación técnica relevante
ESP32	Procesamiento central y transmisión Wi-Fi de los datos hacia ThingSpeak	Microcontrolador de 32 bits, Wi-Fi 802.11 b/g/n
Arduino UNO	Adquisición de lecturas analógicas y digitales de los sensores	Microcontrolador ATmega328P
Sensor MQ-135	Detección de gases contaminantes (ej. CO, NOx, humo)	Salida analógica, requiere calibración Rs/Ro
DHT11	Medición de temperatura y humedad relativa	Salida digital, precisión
Protoboard y cableado	Montaje e interconexión de los componentes electrónicos	--
Batería externa / fuente USB	Alimentación del prototipo en campo	--

Cada componente fue fotografiado individualmente para documentar el prototipo real utilizado:

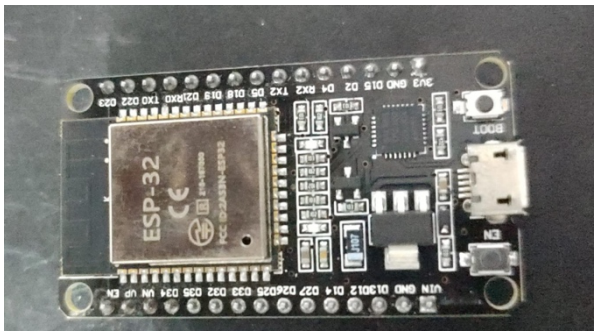


Figura 2. Microcontrolador ESP32 empleado en el prototipo.
Fuente: Autoría propia.

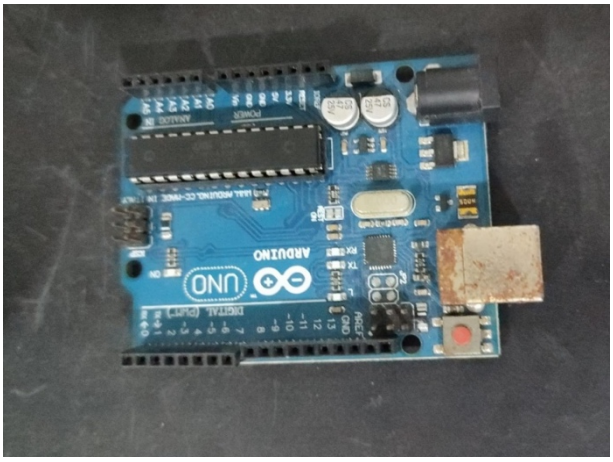


Figura 3. Arduino UNO utilizado para la adquisición de señales de los sensores.
Fuente: Autoría propia.

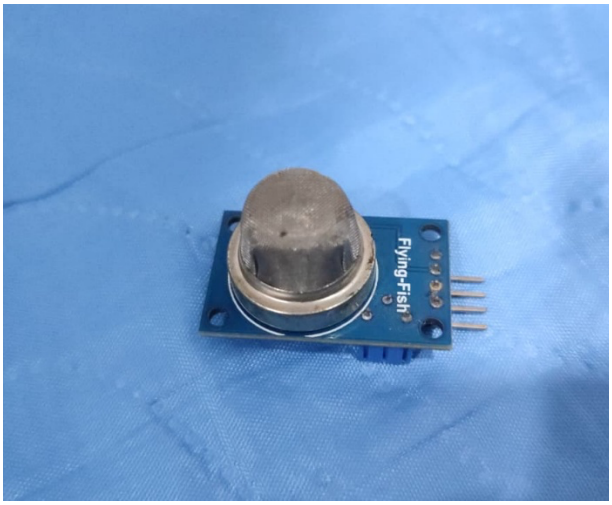


Figura 4. Sensor MQ empleado para la detección de gases contaminantes.
Fuente: Autoría propia.

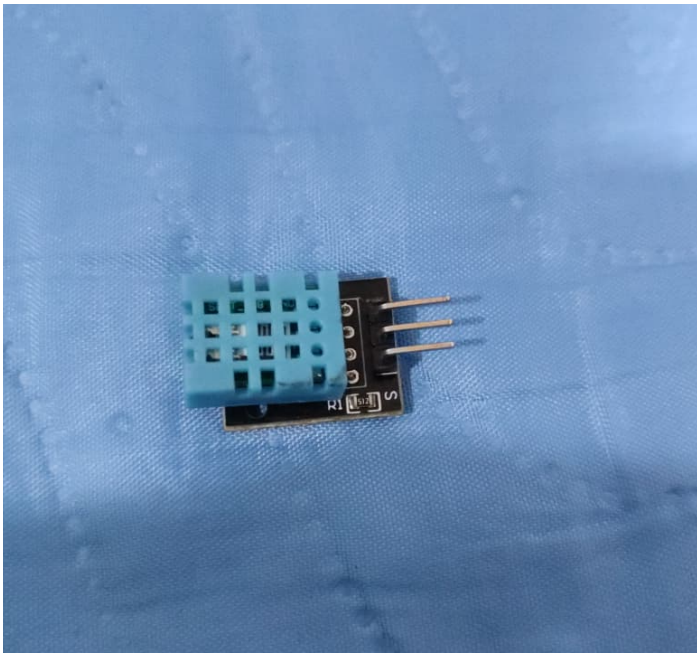


Figura 5. Sensor DHT utilizado para la medición de temperatura y humedad. Fuente: Autoría propia.

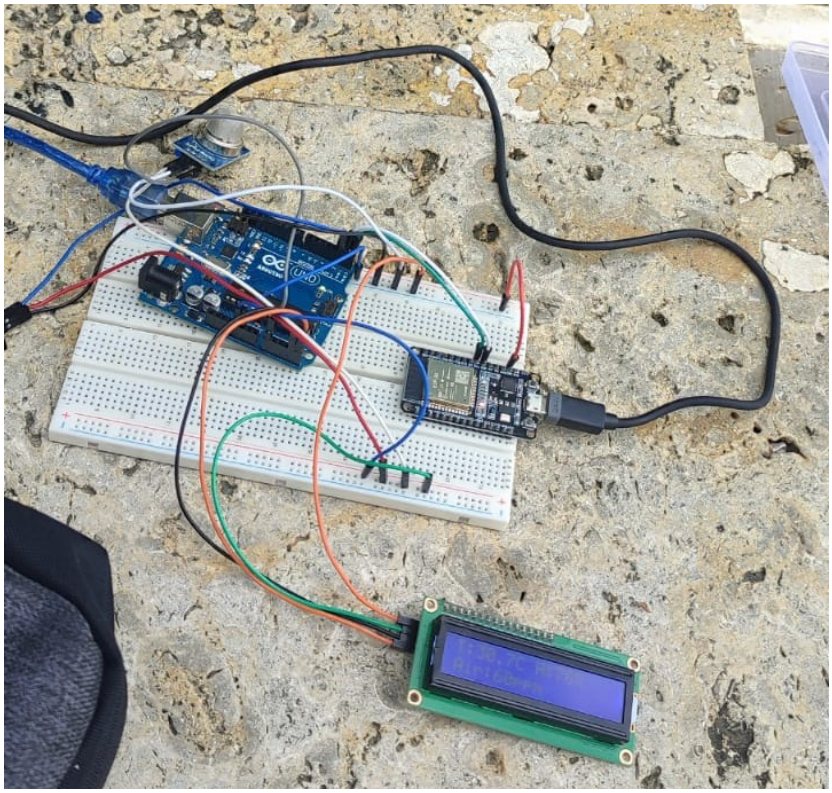


Figura 6. Prototipo IoT ensamblado (protoboard, microcontroladores y sensores integrados). Fuente: Autoría propia.

3. Diseño Esquemático y Montaje Electrónico

La integración de los componentes se realizó siguiendo el esquema de conexión descrito en la Tabla 2. Las salidas analógicas de los sensores MQ se conectaron a las entradas analógicas del Arduino UNO, mientras que el sensor DHT se conectó a un pin digital con resistencia pull-up de 10 kΩ. El Arduino transmite las lecturas procesadas al ESP32 mediante comunicación serial (pines TX/RX), y este último gestiona el envío hacia ThingSpeak.

***Tabla 2**. Esquema de conexiones del prototipo.*

Componente	Pin del componente	Pin del Arduino/ESP32
Sensor MQ	AOUT	A0 (Arduino)
DHT11/DHT22	DATA	D2 (Arduino) - con resistencia pull-up 10kΩ
Arduino UNO	TX/RX	RX/TX del ESP32
ESP32	Wi-Fi	Red inalámbrica local - ThingSpeak

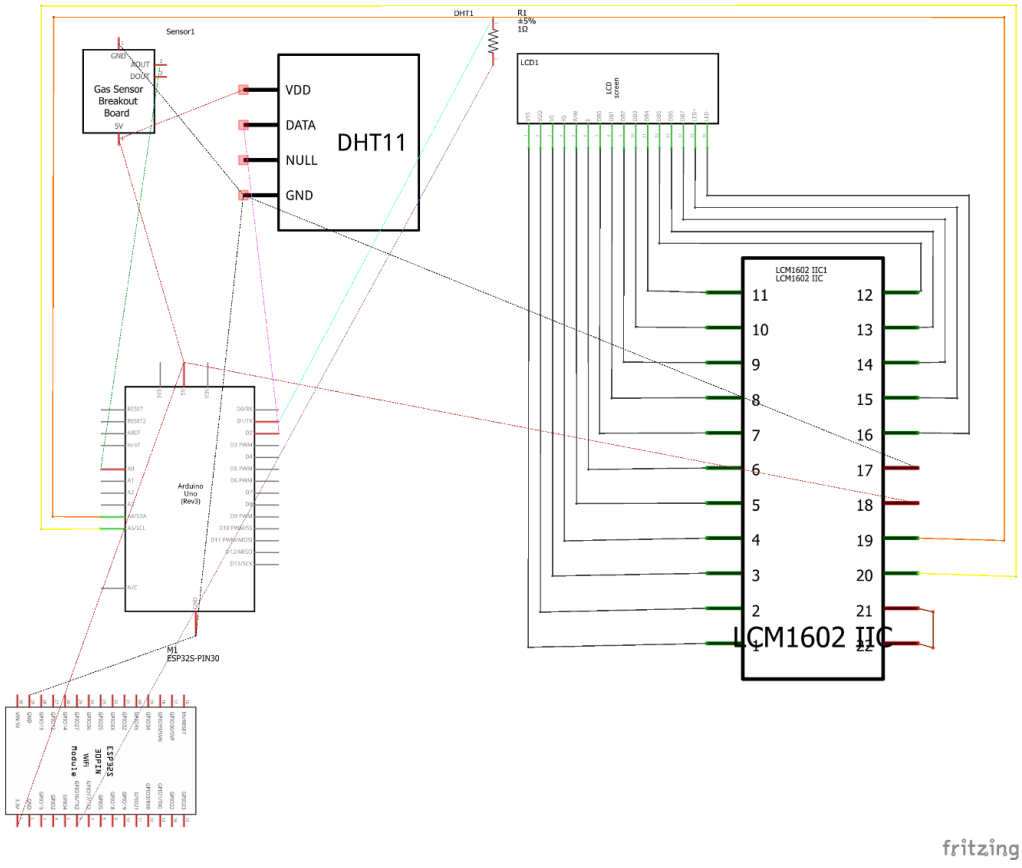


Figura 7. Diagrama esquemático de conexión de sensores, Arduino UNO y ESP32.
Fuente: Autoría propia.

4. Desarrollo del Firmware: Algoritmo de Adquisición y Transmisión de Datos

El firmware se desarrolló en Arduino IDE y contempla tres etapas lógicas: lectura de sensores, procesamiento/calibración de la señal y transmisión de datos. Para el sensor MQ, la concentración de gas (ppm) se estima a partir de la relación entre la resistencia del sensor en presencia de gas (Rs) y su resistencia en aire limpio (Ro), mediante una curva de calibración del tipo:

ppm = a · (Rs/Ro)^b

donde a y b son constantes obtenidas de la hoja de datos del sensor.

El algoritmo general de operación sigue la siguiente lógica:

```
INICIO
  Configurar pines de sensores y conexión Wi-Fi
  MIENTRAS (verdadero):
      Leer valor analógico del sensor MQ
      Calcular Rs/Ro y convertir a ppm
      Leer temperatura y humedad del sensor DHT
      SI conexión Wi-Fi activa:
          Enviar datos a ThingSpeak (canal, API key, campos)
      SINO:
          Reintentar conexión
      Esperar intervalo de muestreo (t segundos)
  FIN MIENTRAS
FIN
```

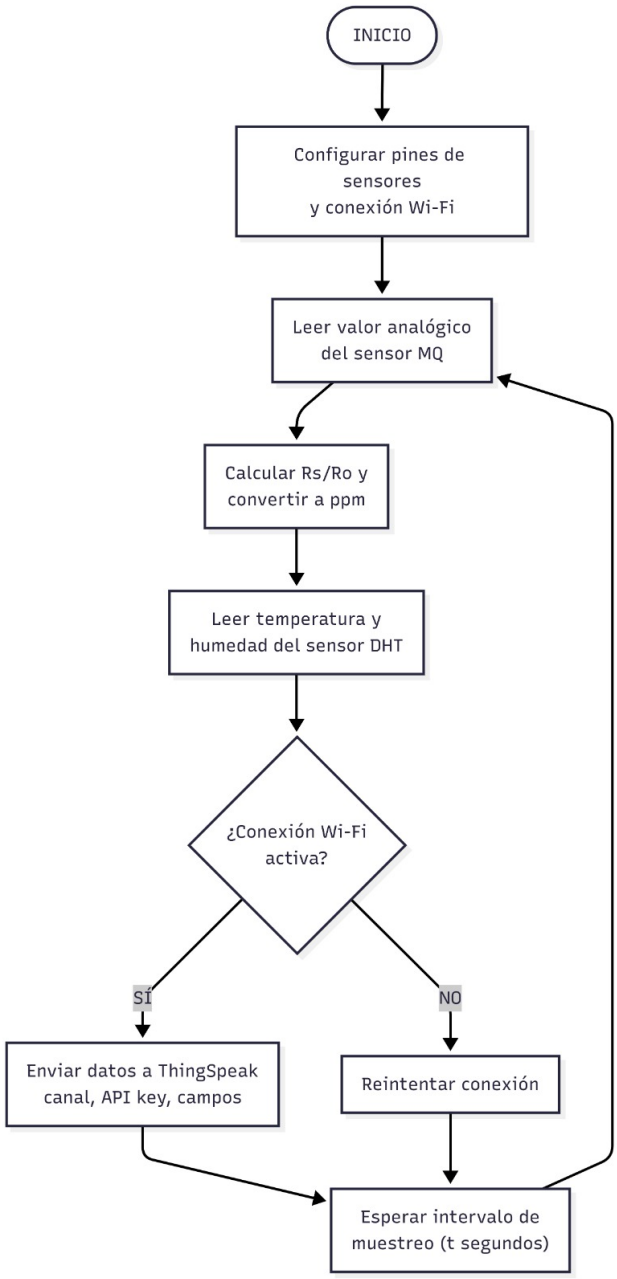


Figura 8. Diagrama de flujo del algoritmo de adquisición y transmisión de datos.
Fuente: Autoría propia.

5. Calibración y Pruebas de Validación

El proceso de calibración se realizó bajo condiciones controladas con el propósito de establecer la resistencia de referencia (Ro) del sensor de gases en aire relativamente limpio y verificar la estabilidad de las mediciones de temperatura y humedad. Se realizaron mediciones repetidas para reducir el efecto de fluctuaciones de corto plazo. Asimismo, se verificó la transmisión de los datos adquiridos hacia ThingSpeak con el fin de comprobar la consistencia del proceso de comunicación. Sin embargo, el estudio no incluyó una validación cuantitativa prolongada frente a una estación certificada de monitoreo. Por esta razón, las mediciones

obtenidas mediante el prototipo se consideran indicativas y adecuadas principalmente para análisis exploratorios y comparativos entre los puntos de muestreo seleccionados.

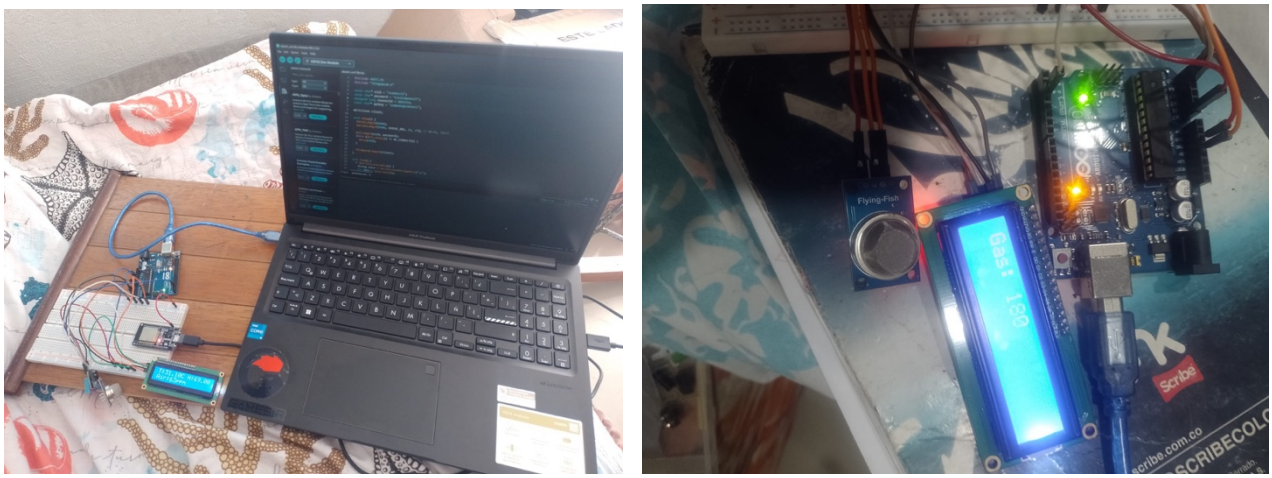


Figura 9. Pruebas de calibración del prototipo en entorno controlado.
Fuente: Autoría propia.

6. Selección de los Puntos de Muestreo

Se seleccionaron cuatro puntos de medición en la ciudad de Cartagena, escogidos por su contraste ambiental y relevancia urbana, cumpliendo los criterios de inclusión (zonas representativas, accesibles y seguras) y exclusión (zonas sin acceso, con interferencia de señal Wi-Fi o sin condiciones mínimas de seguridad) definidos para el estudio:

Tabla 3. Puntos de muestreo seleccionados.

Punto de muestreo	Tipo de zona	Justificación
Mamonal	Industrial	Alta actividad industrial, fuente potencial de gases contaminantes
Centro Histórico	Turística/comercial	Alta afluencia peatonal y comercial
Terminal de Transporte	Alto flujo vehicular	Emisiones vehiculares constantes
Crespo	Residencial	Zona de referencia con menor actividad industrial/vehicular



Figura 10. Ubicación geográfica de los puntos de muestreo en Cartagena.
Fuente: Autoría propia (elaborado a partir de Google Maps).

7. Procedimiento Experimental de Campo

El prototipo fue trasladado físicamente a cada uno de los cuatro puntos seleccionados, donde se instaló temporalmente para la recolección de datos ambientales durante intervalos de tiempo establecidos. Durante cada sesión de medición se verificó la conexión Wi-Fi y la correcta transmisión de datos al canal privado de ThingSpeak.





Figura 11. Prototipo instalado en el punto de muestreo de Mamonal (zona industrial).
Fuente: Autoría propia.



Figura 12. Prototipo instalado en el punto de muestreo del Centro Histórico.
Fuente: Autoría propia.



Figura 13. Prototipo instalado en el punto de muestreo de la Terminal de Transporte.
Fuente: Autoría propia.

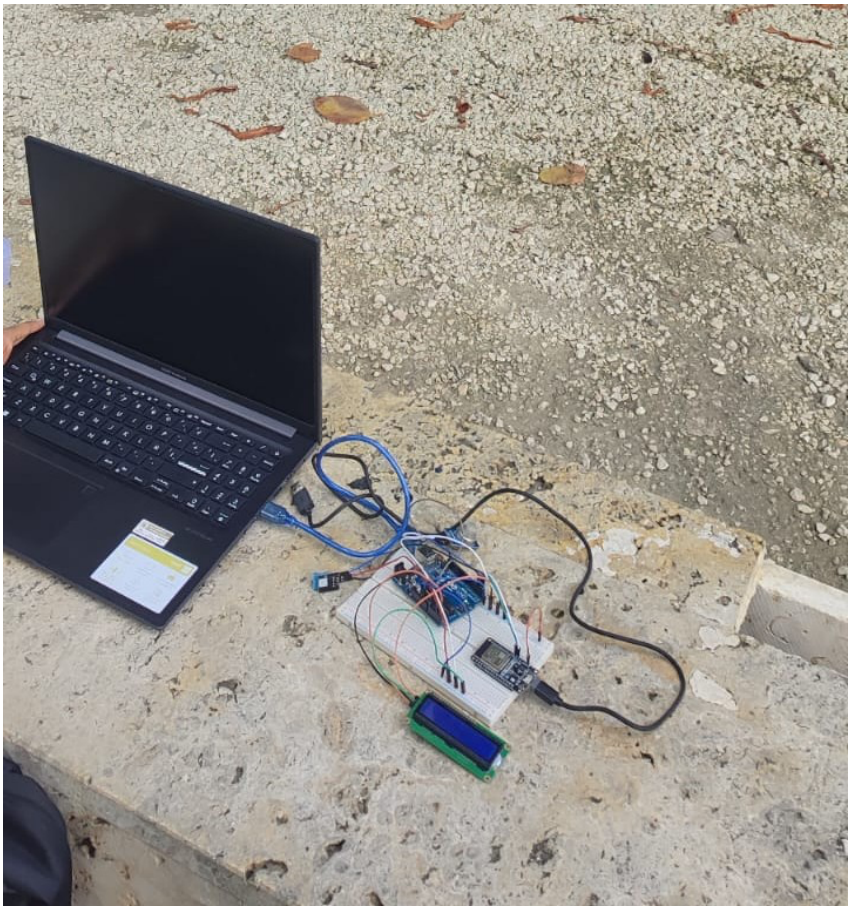


Figura 14. Prototipo instalado en el punto de muestreo de Crespo (zona residencial).
Fuente: Autoría propia.

8. Procesamiento y Análisis de Datos

Las lecturas almacenadas en ThingSpeak fueron procesadas mediante estadística descriptiva, calculando para cada zona el promedio ($\bar{x} = \Sigma xi / n$), el valor máximo y mínimo, y el comportamiento temporal de las variables medidas (gases, temperatura y humedad). Posteriormente se realizó una comparación entre zonas para identificar diferencias en los niveles de contaminación y una interpretación ambiental orientada a establecer qué sectores presentan mayor riesgo. La visualización de los resultados se apoyó en los paneles gráficos generados automáticamente por ThingSpeak (curvas de tendencia por canal).

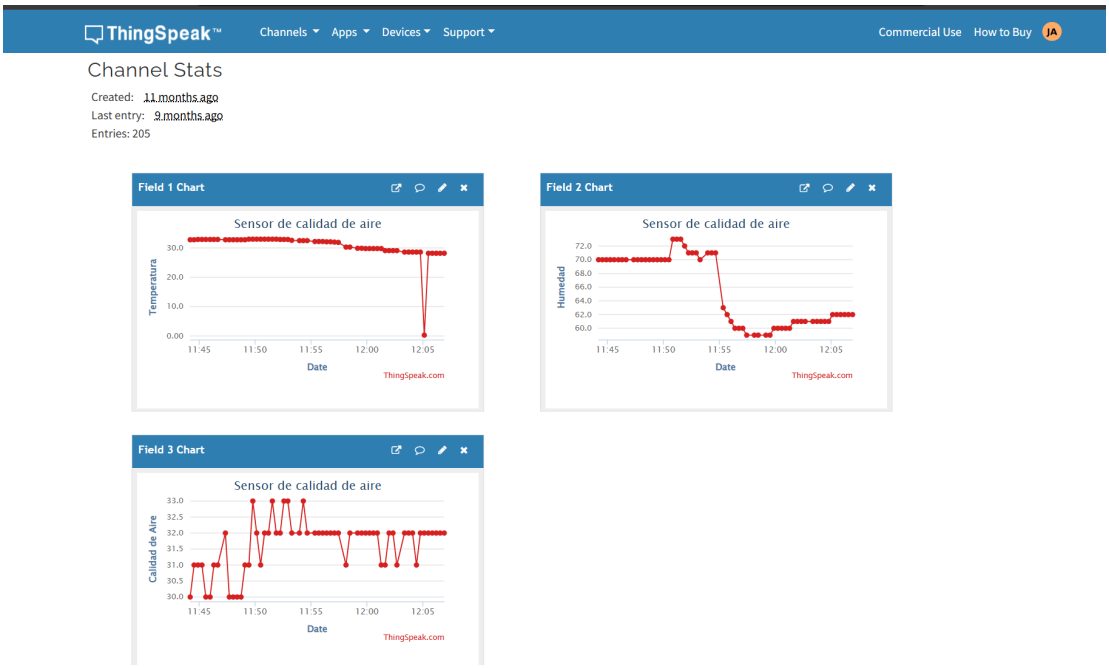


Figura 15. Panel de visualización de datos en ThingSpeak.
Fuente: Autoría propia.

Resultados

A continuación, se presentan de manera objetiva los datos obtenidos mediante la aplicación del prototipo IoT en los cuatro puntos de muestreo seleccionados (Mamonal, Centro Histórico, Terminal de Transporte y Crespo). Los datos fueron transmitidos automáticamente a ThingSpeak y posteriormente exportados y procesados en Power BI para su análisis estadístico y visualización comparativa.

1. Resumen General de los Datos Recolectados

Tabla 1. Resumen estadístico de las variables monitoreadas por zona.

Zona	N.º registros	Temp. promedio (°C)	Humedad promedio (%)	Índice estimado de calidad del aire (IECA)	Categoría ICA predominante
Mamonal	682	32.3	73.0	90.3	Moderada (483 de 682 registros - 70.8%)
Centro Histórico	720	29.7	82.1	64.2	Moderada (669 de 720 registros - 92.9%)

Terminal de Transporte	712	31.4	78.1	90.9	Moderada (479 de 712 registros - 67.3%)
Crespo	686	31.0	82.0	71.3	Moderada (628 de 686 registros - 91.5%)

Fuente: elaboración propia a partir de los registros exportados de ThingSpeak para cada zona.

Tabla 1b. Rango de valores (mínimo–máximo) por zona, como complemento del promedio.

Zona	**Temp. (°C)**	**Humedad (%)**	**Índice estimado de calidad del aire (IECA)**
Mamonal	27.6 – 35.3	64.2 – 84.5	65.0 – 145.0
Centro Histórico	26.0 – 32.5	74.3 – 91.4	43.2 – 95.4
Terminal de Transporte	27.1 – 34.2	68.5 – 89.2	60.0 – 143.6
Crespo	26.7 – 33.8	74.6 – 92.3	40.7 – 120.0

2. Comportamiento de Temperatura y Humedad por Zona

La temperatura promedio más alta se registró en Mamonal (32.3 °C) y la más baja en Centro Histórico (29.7 °C). En cuanto a humedad relativa, las cuatro zonas se mantuvieron en un rango alto (73%–82%), siendo Crespo y Centro Histórico las más húmedas (82.0% y 82.1% respectivamente) y Mamonal la de menor humedad relativa promedio (73.0%).

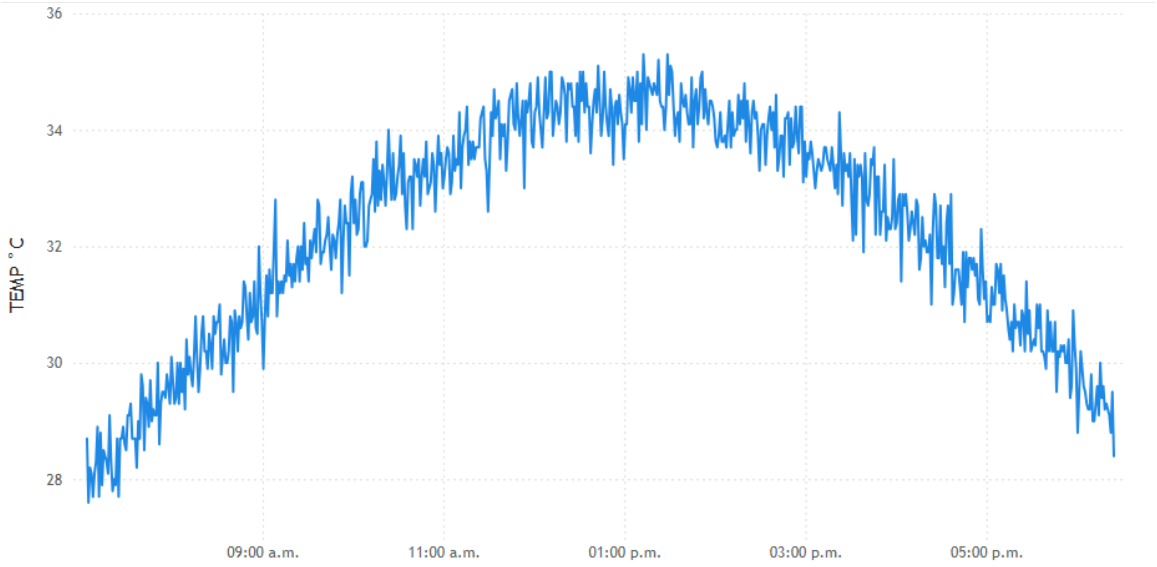


Figura 16. Comportamiento de la temperatura registrada en Mamonal.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

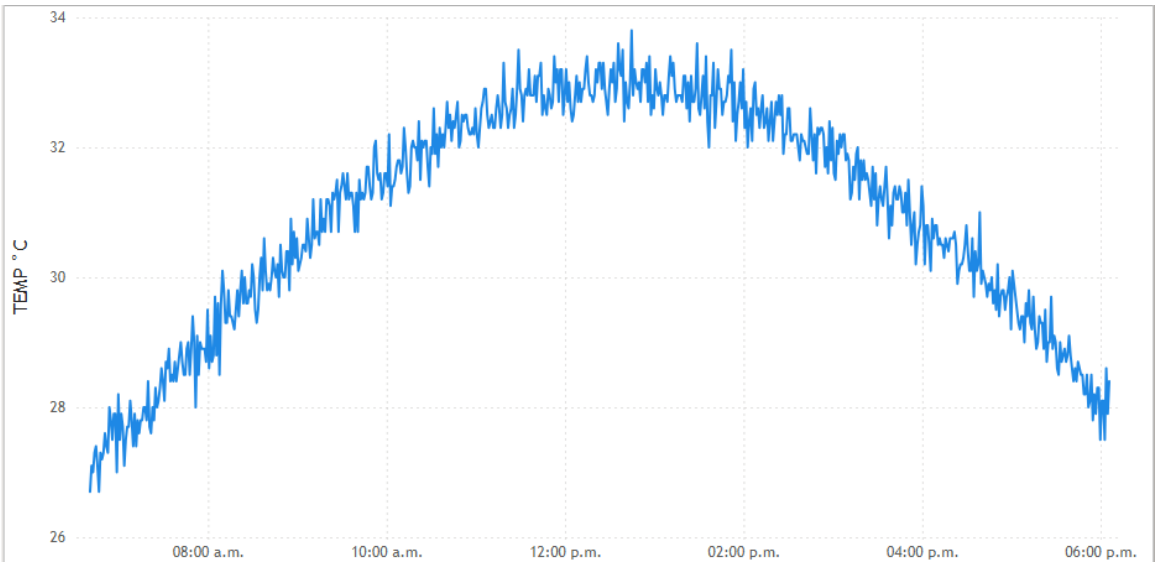


Figura 17. Comportamiento de la temperatura registrada en Crespo.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

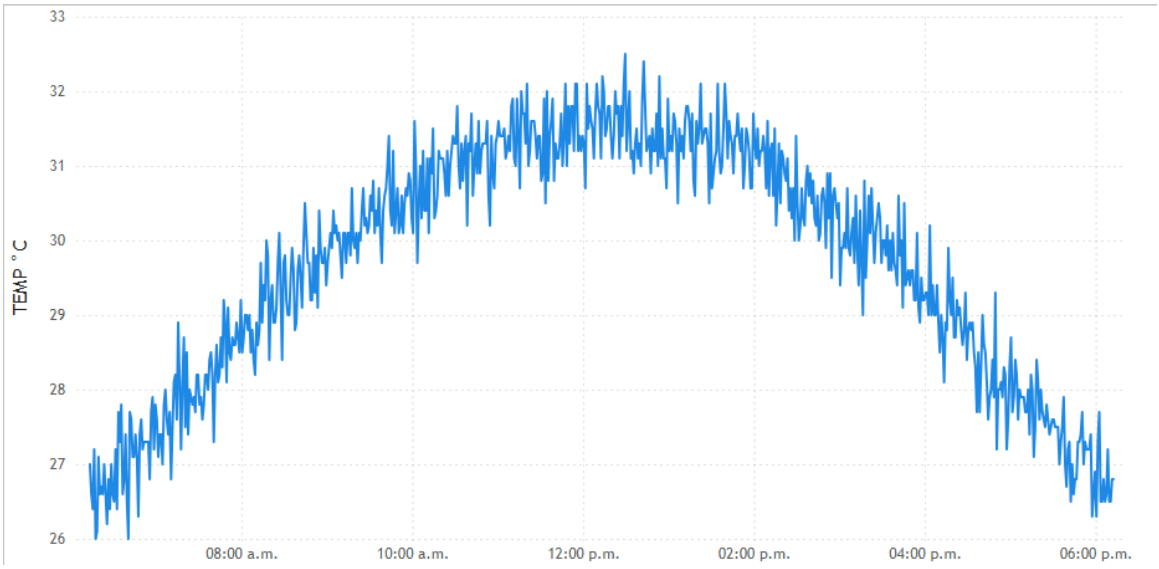


Figura 18. Comportamiento de la temperatura registrada en el centro histórico.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

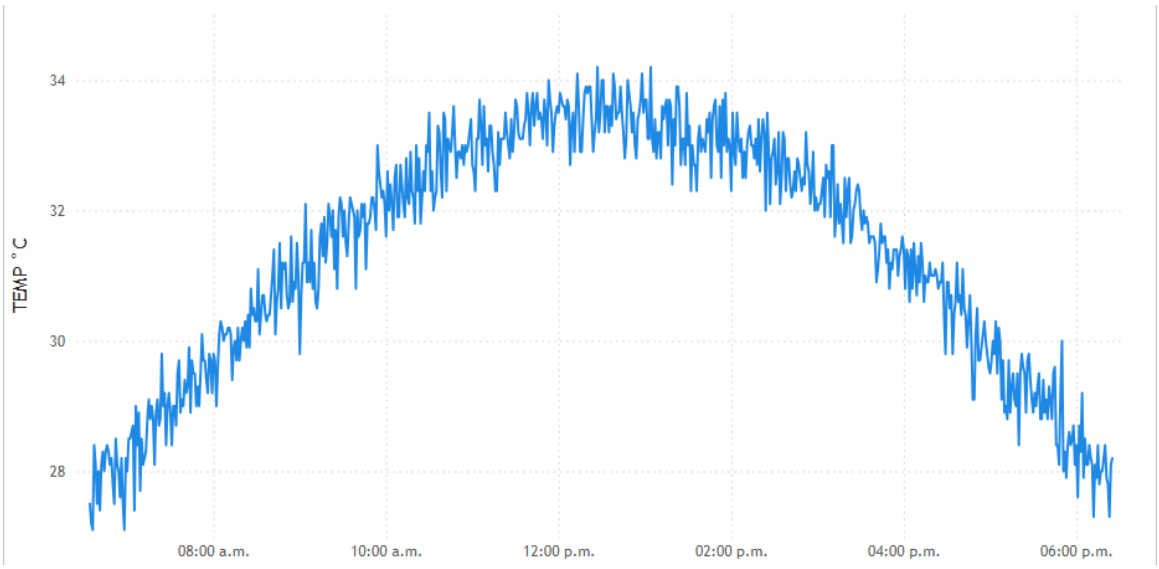


Figura 19. Comportamiento de la temperatura registrada en la terminal de transporte.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

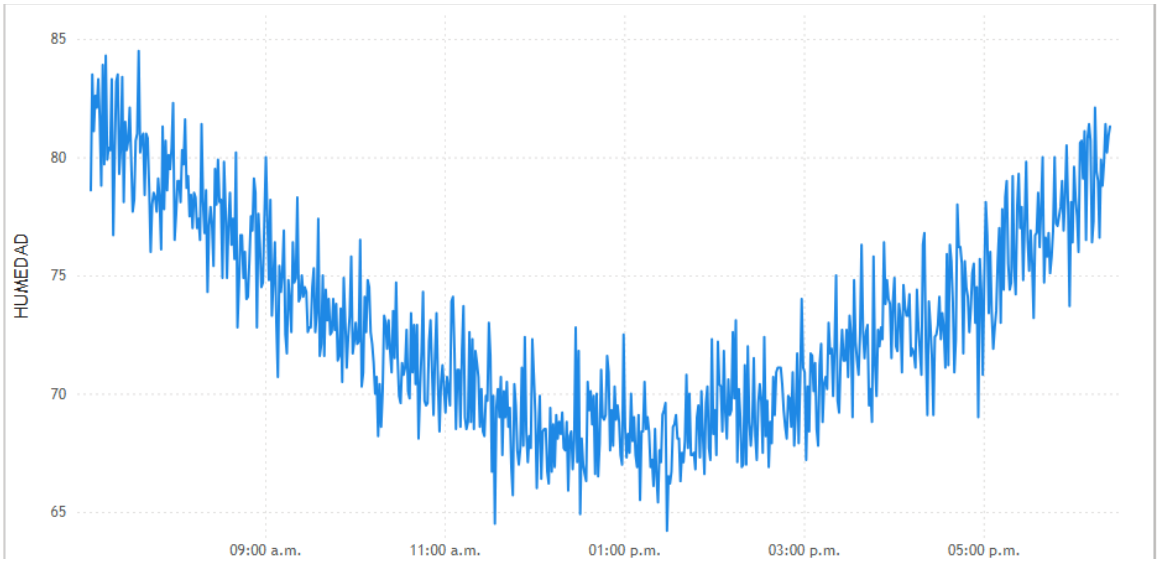


Figura 20. Comportamiento de la humedad relativa registrada en Mamonal.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

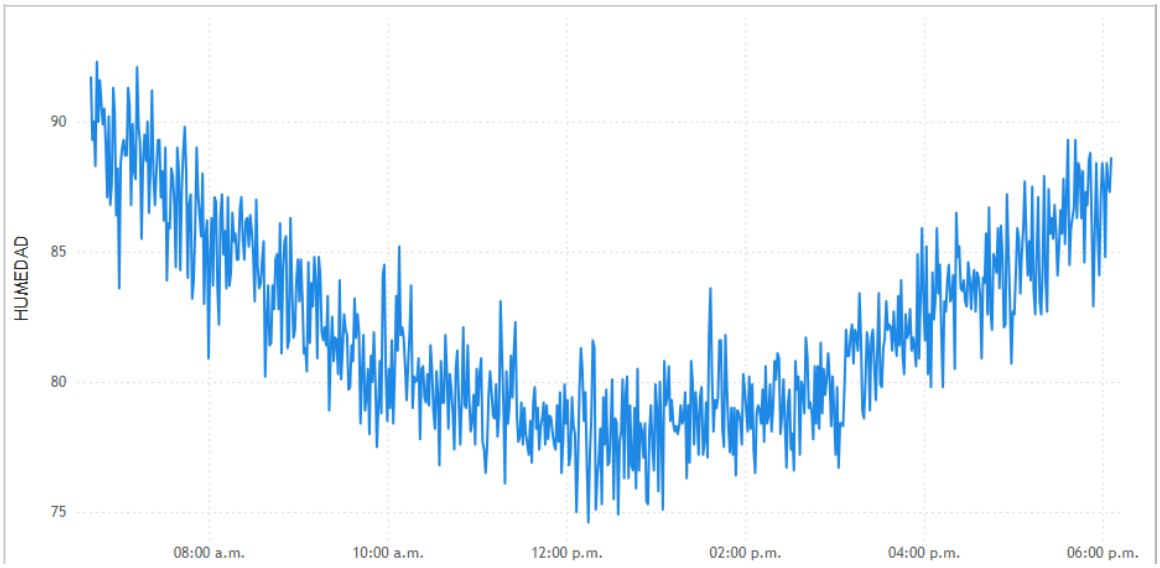


Figura 21. Comportamiento de la humedad relativa registrada en Crespo.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

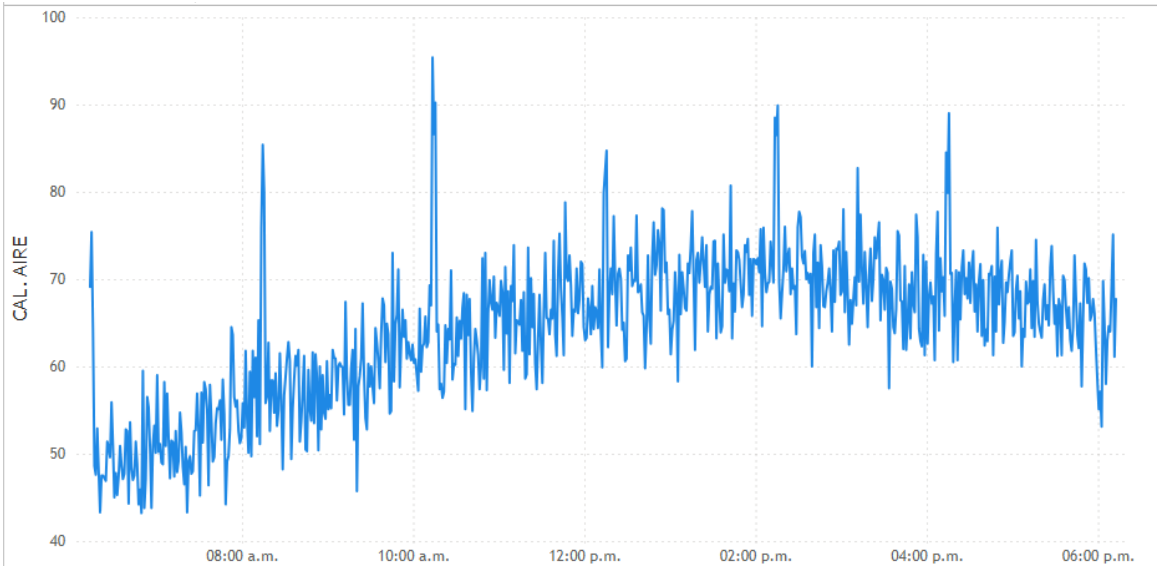


Figura 22. Comportamiento de la humedad relativa registrada en el Centro Histórico.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

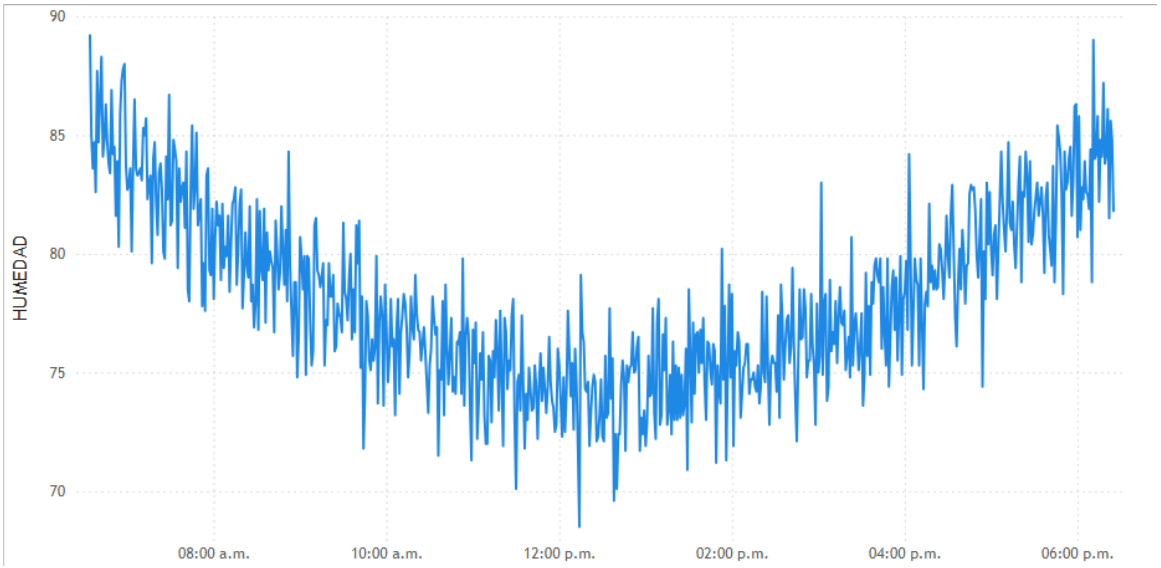


Figura 23. Comportamiento de la humedad relativa registrada en la terminal de transporte.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

Es importante señalar que las zonas con mayor humedad relativa (Crespo y Centro Histórico) fueron también las que presentaron los promedios de Índice estimado de calidad del aire (IECA) más bajos, mientras que Mamonal, con la menor humedad, presentó el promedio más alto. Dado que los sensores MQ son sensibles a la humedad ambiental, este comportamiento debe discutirse como un factor a considerar en la interpretación de los resultados, y no únicamente como evidencia de mejor o peor calidad del aire.

3. Concentración de Gases e Índice de Calidad del Aire (ICA)

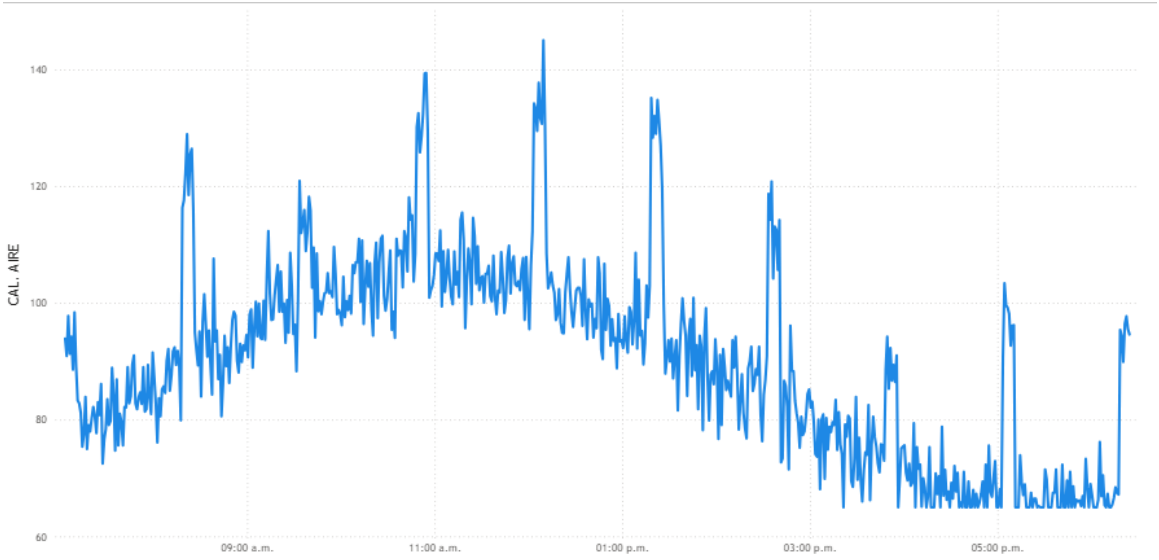


Figura 24. Concentración promedio de gases contaminantes (Índice estimado de calidad del aire) en Mamonal.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

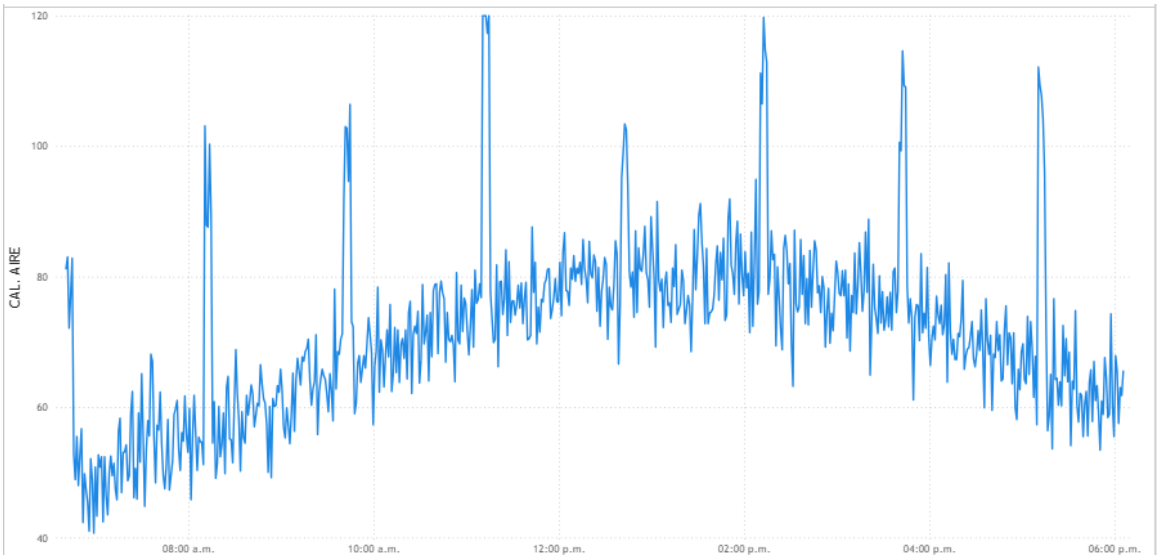


Figura 25. Concentración promedio de gases contaminantes (Índice estimado de calidad del aire) en crespo.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

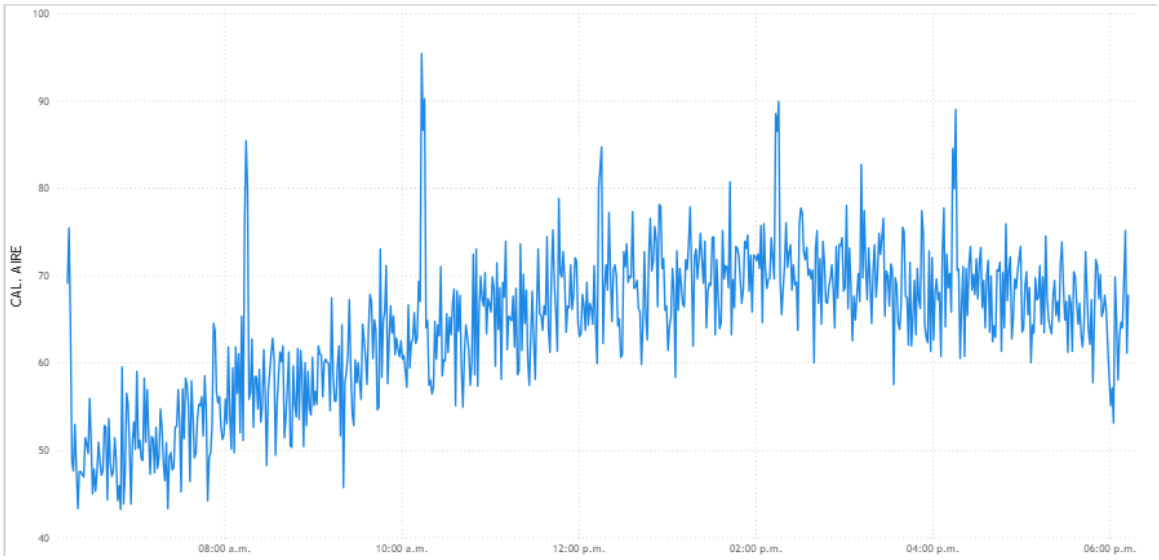


Figura 26. Concentración promedio de gases contaminantes (Índice estimado de calidad del aire) en el centro histórico.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

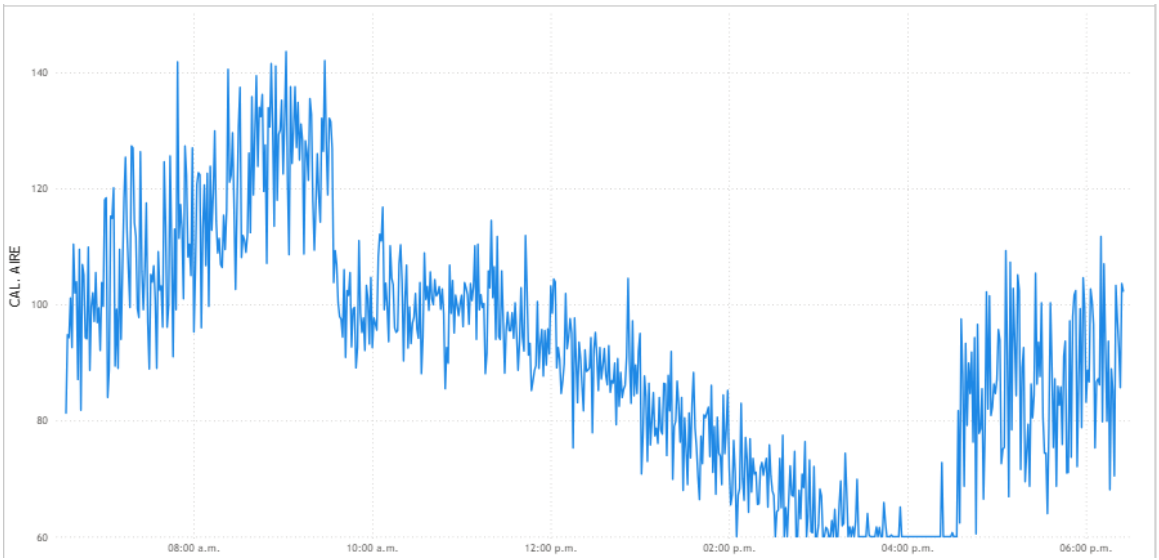


Figura 27. Concentración promedio de gases contaminantes (Índice estimado de calidad del aire) en la terminal de transporte.
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

Para el análisis comparativo, el índice estimado de calidad del aire generado por el prototipo se interpretó mediante los siguientes rangos: 00–50, Bueno; 51–100, Moderado; y 101–150, Dañina para grupos sensibles. Estos rangos se utilizaron únicamente como marco de clasificación comparativa para los valores registrados por el prototipo y no deben interpretarse como una aplicación directa de un índice oficial o regulatorio de calidad del aire.

4. Caracterización de la Calidad del Aire por Zona

Para cada zona se generó, en Power BI, una caracterización comparando la cantidad de registros por categoría ICA frente al promedio de Índice estimado de calidad del aire correspondiente a cada categoría. Los cuatro paneles fueron verificados uno a uno contra los datos crudos exportados de ThingSpeak, confirmando una coincidencia exacta en número de registros y promedios.

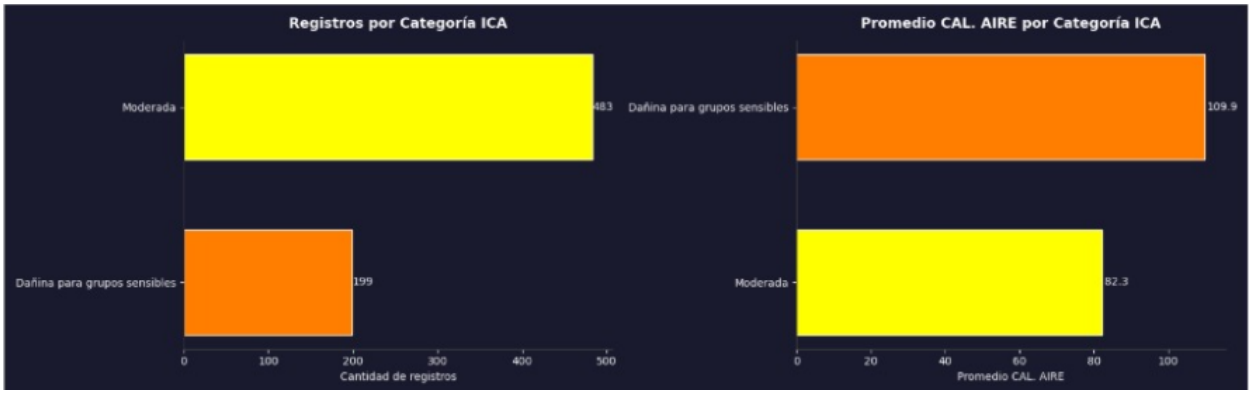


Figura 28. Registros por categoría ICA y promedio de Índice estimado de calidad del aire — Mamonal (Moderada: 483 registros, promedio 82.3; Dañina para grupos sensibles: 199 registros, promedio 109.9).
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

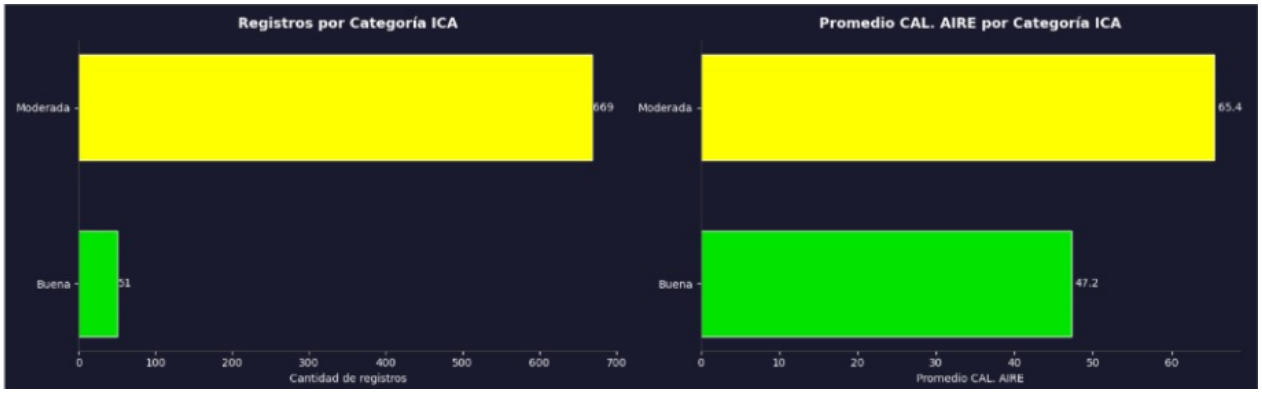


Figura 29. Registros por categoría ICA y promedio de Índice estimado de calidad del aire — Centro Histórico (Moderada: 669 registros, promedio 65.4; Buena: 51 registros, promedio 47.2).
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

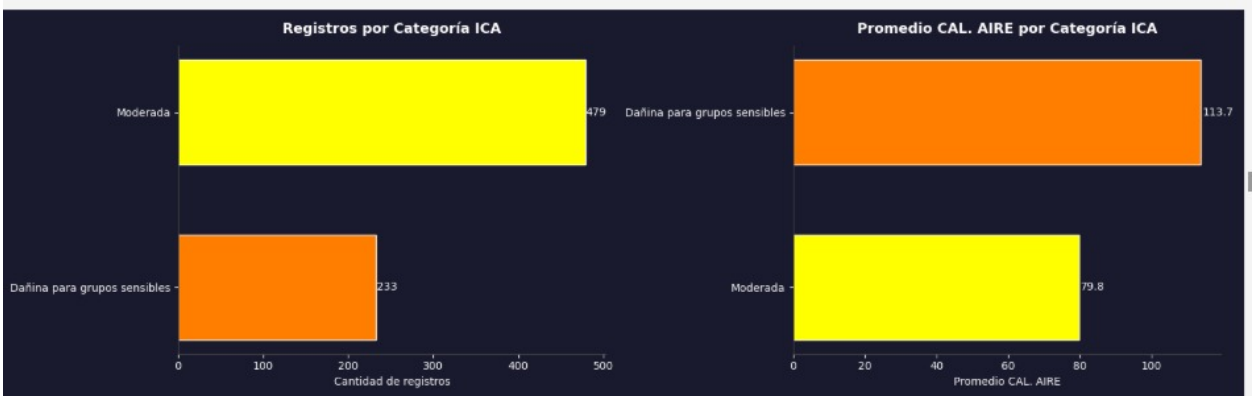


Figura 30. Registros por categoría ICA y promedio de Índice estimado de calidad del aire — Terminal de Transporte (Moderada: 479 registros, promedio 79.8; Dañina para grupos sensibles: 233 registros, promedio 113.7).
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

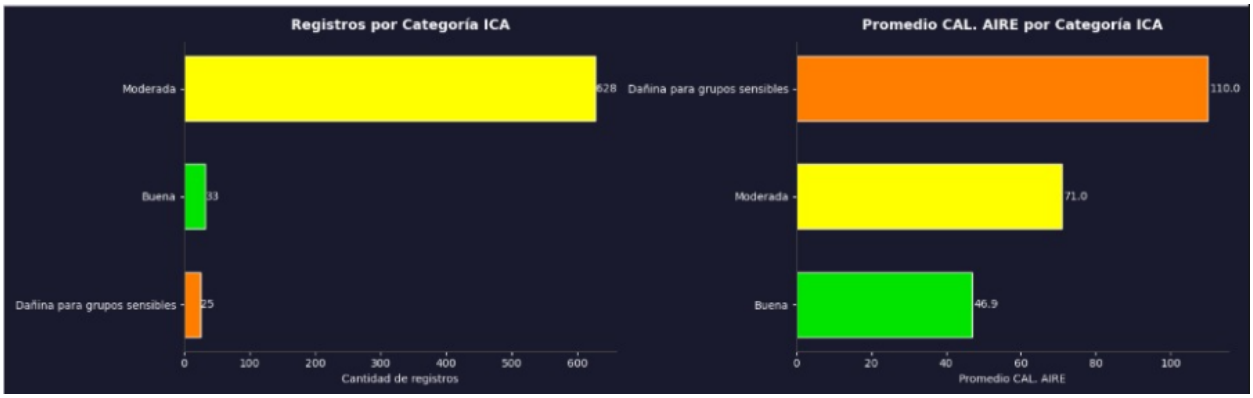


Figura 31. Registros por categoría ICA y promedio de Índice estimado de calidad del aire — Crespo (Moderada: 628 registros, promedio 71.0; Buena: 33 registros, promedio 46.9; Dañina para grupos sensibles: 25 registros, promedio 110.0).
Fuente: elaboración propia a partir de datos de ThingSpeak procesados en Power BI.

5. Análisis Comparativo entre Zonas

Tabla 2. Comparación de resultados entre las cuatro zonas de muestreo.

Zona	Registros totales	% Moderada	% Buena	% Dañina para grupos sensibles
Mamonal	682	70.8%	0%	29.2%
Centro Histórico	720	92.9%	7.1%	0%
Terminal de Transporte	712	67.3%	0%	32.7%
Crespo	686	91.5%	4.8%	3.6%

Las cuatro zonas comparten "Moderada" como categoría predominante, pero se observan diferencias claras en los extremos de la distribución. Mamonal (zona industrial) y Terminal de Transporte (alto flujo vehicular) son las únicas zonas con una proporción significativa de registros en la categoría "Dañina para grupos sensibles" (29.2% y 32.7% respectivamente) y en ninguna de las dos se registraron lecturas en categoría "Buena". En contraste, Centro Histórico (zona turística/comercial) y Crespo (zona residencial) concentran la gran mayoría de sus registros en "Moderada", con presencia de la categoría "Buena" (7.1% y 4.8%) y, en el caso de Crespo, solo un 3.6% en "Dañina para grupos sensibles". Este patrón es consistente con el tipo de actividad predominante definido para cada zona en la metodología.

6. Discusión y Contraste con la Literatura

6.1 Interpretación de las diferencias espaciales

Los resultados muestran que el prototipo permitió encontrar diferencias entre los cuatro sectores analizados. Aunque la categoría Moderada fue la más frecuente en todas las zonas, existen diferencias importantes en el IECA promedio, en la amplitud de los valores y en la cantidad de registros ubicados en las categorías extremas.

Los resultados permiten distinguir principalmente dos grupos. El primero está formado por Mamonal y la Terminal, cuyos promedios de IECA fueron cercanos a 90. El segundo corresponde a Crespo y el Centro Histórico, con promedios entre 64 y 71. Las dos zonas con mayor actividad industrial o vehicular, Mamonal y la Terminal, concentraron el 94.5 % de los registros clasificados como Dañina para grupos sensibles.

Terminal de Transporte. El comportamiento del IECA mostró valores altos durante la mañana y nuevamente hacia el final de la tarde. Este comportamiento puede estar relacionado con los periodos de mayor movimiento vehicular, aunque esta relación no puede comprobarse directamente porque durante el estudio no se realizaron conteos de tráfico.

La disminución observada durante las horas centrales de la tarde, cuando el índice alcanzó un mínimo de 60.0, coincide con un periodo en el que podría existir menor movimiento de buses. Sin embargo, esta interpretación debe tomarse con precaución, ya que también pueden intervenir otros factores ambientales.

Las emisiones producidas por vehículos, especialmente por aquellos utilizados para transporte de carga y pasajeros, son una fuente importante de contaminación atmosférica en Colombia, según la literatura y los informes utilizados en el trabajo (Ideam, 2026).

Mamonal. El IECA promedio de Mamonal fue muy similar al de la Terminal, aunque el comportamiento de las mediciones fue diferente. Durante la mañana y el mediodía se presentaron valores relativamente altos y también aparecieron varios picos entre 120 y 145.

Estos valores podrían estar relacionados con emisiones de procesos industriales, circulación de vehículos pesados o una combinación de ambos factores, debido a las características de la zona. Esta posibilidad coincide con las fuentes industriales, portuarias y vehiculares señaladas en los reportes locales sobre la calidad del aire en Cartagena (Gonzales, 2025.).

El descenso observado durante la tarde también podría estar relacionado con cambios en la actividad de la zona, con las condiciones de dispersión del aire o con el comportamiento del sensor. Como el viento no fue medido durante el estudio, no es posible determinar cuál de estas situaciones tuvo mayor influencia.

Crespo. Esta zona presentó un nivel base del IECA relativamente estable, acompañado por varios picos de corta duración. Algunos de estos valores llegaron a la categoría Dañina para grupos sensibles, aunque solo representaron el 3.6 % de los registros.

Los picos podrían estar relacionados con el paso de vehículos u otras fuentes locales que generan cambios momentáneos en las mediciones. Sin embargo, debido a la duración del estudio y a las variables que fueron registradas, no es posible determinar con exactitud el origen de cada uno de estos eventos.

Centro Histórico. Fue la zona con el IECA promedio más bajo, con 64.2, y también presentó la menor amplitud, con 52.2. Además, fue el único punto en el que no se registraron valores en la categoría Dañina para grupos sensibles.

También presentó la menor temperatura promedio y uno de los mayores niveles de humedad. Estas condiciones pueden estar relacionadas con las características del sector, como las calles estrechas, las zonas peatonales y las restricciones de circulación. Sin embargo, factores como el sombreado producido por las edificaciones o la cercanía al mar no fueron evaluados directamente durante el estudio.

El Centro Histórico también concentró el 60.7 % de todos los registros clasificados como Buena.

6.2 Influencia de las variables ambientales y confiabilidad de los sensores

La relación observada entre el IECA, la temperatura y la humedad debe analizarse con cuidado. Los sensores de la serie MQ utilizan un elemento calentado de óxido metálico cuya resistencia puede verse afectada por la temperatura y la humedad del aire. Además, estos sensores pueden presentar sensibilidad frente a diferentes gases al mismo tiempo.

Esta situación está documentada en estudios sobre sensores de bajo costo, en los que se señala la importancia de realizar una calibración utilizando instrumentos de referencia (Carotenuto *et al.,* 2023; Lopez-Restrepo *et al.,* 2021). Por esta razón, una parte de las diferencias encontradas entre las zonas podría estar relacionada con las condiciones ambientales y no únicamente con cambios en la contaminación.

A pesar de esto, los datos también muestran algunos comportamientos que no parecen depender solamente de la temperatura o la humedad:

En la Terminal, los valores más altos del IECA se registraron durante la mañana, cuando la temperatura era menor y la humedad era mayor, mientras que los valores más bajos aparecieron durante las horas de mayor temperatura.

En Mamonal, el IECA comenzó a disminuir desde las 2:00 p. m., cuando la temperatura todavía se encontraba cerca de su máximo.

Los picos de pocos minutos observados en el IECA no aparecen de la misma forma en las curvas de temperatura y humedad, que presentan cambios más graduales.

El Centro Histórico y Crespo presentaron promedios de temperatura y humedad bastante similares, pero sus promedios de IECA fueron diferentes, con una diferencia de 7.1 puntos.

Estos resultados indican que la señal puede estar relacionada, al menos en parte, con condiciones propias de cada zona. Sin embargo, con los datos disponibles no es posible establecer qué porcentaje de la variación corresponde realmente a contaminación y cuál puede estar asociado con el comportamiento de los sensores.

Por esta razón, el IECA debe entenderse como un indicador comparativo entre las zonas estudiadas y no como una medida equivalente a una concentración de contaminantes obtenida mediante un equipo certificado.

También se encontraron dos aspectos que deben tenerse en cuenta. En primer lugar, durante los primeros minutos de medición en Crespo y el Centro Histórico se presentaron valores relativamente altos que disminuyeron rápidamente. Este comportamiento puede estar relacionado con el tiempo que necesita el sensor MQ para calentarse y estabilizarse. Para futuros trabajos sería conveniente realizar un periodo de precalentamiento antes de comenzar a registrar los datos o descartar los primeros minutos.

En segundo lugar, algunos valores extremos fueron números redondos, como 65.0 y 60.0 para los mínimos y 145.0 y 120.0 para los máximos. Esto podría indicar que la función de conversión o los límites utilizados para la lectura están restringiendo parte de la señal. Por esta razón, sería conveniente revisar el firmware y los límites establecidos para la escala del IECA.

6.3 Contraste con la literatura

Los resultados obtenidos son compatibles con los estudios que plantean el uso de redes de sensores de bajo costo como complemento de los sistemas oficiales de monitoreo.

(Lopez-Restrepo *et al.,* 2021) mostraron en el Valle de Aburrá que este tipo de redes puede aportar información espacial adicional a la obtenida mediante las estaciones convencionales. Algo similar se observa en este proyecto, ya que el prototipo permitió comparar cuatro sectores diferentes de Cartagena.

De manera similar, el trabajo realizado con una red de sensores de PM2.5 en Birmingham (Cowell *et al.,* 2024) y la experiencia de una red IoT universitaria en India, que reportó una alta correlación entre sensores ubicados en el mismo lugar (Investigating IoT-based low-cost sensor network…, s. f.), muestran que este tipo de sistemas puede generar información específica de acuerdo con la ubicación.

Sin embargo, estos trabajos realizaron procesos de calibración utilizando instrumentos de referencia. En el presente proyecto todavía queda pendiente realizar una validación de este tipo, por lo que los resultados deben interpretarse con las limitaciones mencionadas.

Desde el punto de vista tecnológico, la arquitectura formada por ESP32, Arduino UNO, ThingSpeak y Power BI funcionó de manera estable. Se obtuvieron cerca de 700 registros por punto y no se observaron interrupciones importantes en las series. Además, los paneles elaborados en Power BI coincidieron con los datos exportados desde ThingSpeak tanto en el número de registros como en los promedios.

Esto demuestra que es posible utilizar componentes de bajo costo para construir un prototipo funcional de monitoreo y posteriormente visualizar los datos mediante herramientas de análisis como Power BI. Este resultado coincide con lo planteado por (Calderón *et al.,* 2020) sobre el uso de plataformas de bajo costo en prototipos IoT.

En el contexto local, el EPA Cartagena dispone de cuatro estaciones de monitoreo ubicadas en Mamonal, Cardique, Olaya Herrera y La Bocana. Los reportes consultados señalan que esta cobertura resulta insuficiente para representar completamente las condiciones de la ciudad (Gonzales, 2025.).

Los resultados del presente estudio muestran la utilidad de realizar mediciones en diferentes sectores. La Terminal de Transporte y el Centro Histórico, que no cuentan con una estación oficial dentro del esquema mencionado, presentaron comportamientos bastante diferentes. Esto permite observar que la información de las estaciones existentes no necesariamente representa las condiciones de todos los sectores de la ciudad.

6.4 Implicaciones y estrategias de mejora

Los resultados obtenidos permiten plantear algunas acciones para continuar el seguimiento de las zonas estudiadas. Estas propuestas no deben entenderse como medidas para establecer cumplimiento de normas ambientales, sino como posibles líneas de trabajo a partir de los resultados del prototipo.

Terminal de Transporte: prestar atención a los picos observados durante la mañana y la tarde. Algunas medidas podrían ser el control del tiempo de ralentí de los buses, una mejor organización de las salidas, mejoras en la ventilación de las zonas de parqueo y abordaje y revisiones del estado técnico y de las emisiones de los vehículos.

Mamonal: fortalecer el seguimiento de las fuentes industriales y del transporte de carga. También sería útil realizar mediciones continuas durante los horarios en los que se presentaron mayores valores y comparar los resultados con la estación oficial ubicada en la zona.

Crespo: realizar mediciones durante periodos más largos para identificar con mayor claridad el origen de los picos aislados y registrar los eventos que ocurren alrededor de cada medición. También podría evaluarse el comportamiento del tráfico en las vías cercanas.

Centro Histórico: mantener las condiciones favorables observadas mediante medidas relacionadas con el control de vehículos de combustión, la movilidad peatonal y el uso de medios de transporte menos contaminantes.

A nivel de ciudad: ampliar la red de medición mediante nodos de bajo costo ubicados en sectores que no cuentan con estaciones oficiales. La información obtenida también podría utilizarse para dar a conocer a la comunidad el comportamiento de la calidad del aire en diferentes zonas.

6.5 Limitaciones y trabajo futuro

Los resultados deben interpretarse teniendo en cuenta varias limitaciones. El prototipo fue trasladado de una zona a otra, por lo que las mediciones no se realizaron de manera simultánea. Debido a esto, las diferencias encontradas entre los sectores pueden estar relacionadas en parte con las condiciones meteorológicas de cada jornada, como el viento, la nubosidad o la lluvia, variables que no fueron registradas.

Además, cada zona fue monitoreada durante una sola jornada diurna. Por esta razón, los datos no permiten conocer el comportamiento durante la noche ni establecer diferencias entre distintos días de la semana o diferentes épocas del año.

Otra limitación corresponde al sensor MQ utilizado. Este tipo de sensor no es selectivo frente a gases específicos, no fue validado cuantitativamente frente a una estación certificada y puede verse afectado por la temperatura y la humedad. También debe tenerse en cuenta que el IECA utilizado corresponde a una estimación realizada por el prototipo y que la escala de categorías fue utilizada únicamente como referencia para comparar los resultados.

Como trabajo futuro se propone realizar las siguientes actividades:

Calibrar el sensor mediante una comparación directa con una estación de referencia, como la estación de Mamonal, y ajustar el modelo considerando la temperatura y la humedad.

Ampliar el periodo de medición a varios días, incluyendo horarios nocturnos y fines de semana.

Utilizar varios nodos de medición de manera simultánea para reducir el efecto de las diferencias meteorológicas entre jornadas.

Incorporar sensores para medir material particulado PM2.5 y PM10, debido a la importancia de estos contaminantes en el contexto de Cartagena.

Registrar variables como velocidad y dirección del viento, además de realizar conteos de tráfico, con el fin de tener más información para interpretar los cambios observados en el IECA.

Incorporar un periodo de precalentamiento de los sensores y revisar los límites utilizados para la conversión y la escala del IECA.

Referencias

IQAir España. (s. f.). *About IQAir.* https://www.iqair.com/es/about-iqair

Calderón, R. R., Izquierdo, R. B., y García, S. G. (2020). Low cost platform to implement IoT prototypes. *2020 IEEE World Conference on Engineering Education (EDUNINE)*, 1-6. https://doi.org/10.1109/EDUNINE48860.2020.9149540

Organización Mundial de la Salud (OMS). (2024). Calidad del aire ambiente (exterior) y salud. https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

*G*onzales, J. (02 de abril 2025).¿Cómo está la calidad del aire que se respira en Cartagena?. *El UNIVERSAL*. https://www.eluniversal.com.co/cartagena/2025/04/02/como-esta-la-calidad-del-aire-que-se-respira-en-cartagena/

Ochoa Duarte, A. (2017). Gestionando datos heterogéneos provenientes de sensores para medir la calidad del aire de Bogotá, Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia. https://repositorio.unal.edu.co/items/0ab50b70-2503-4493-b44e-a348e8ba6d4e

Guerra Catagña, A. O. (2026). *Diseño y desarrollo de un sistema embebido e IoT para la detección y monitorización de la calidad del aire* [bachelorThesis]. https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/32177

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2026). Informe Del Estado De La Calidad Del Aire En Colombia 2025. Ideam. https://storymaps.arcgis.com/stories/0635923e69e44f00a2d67f4024be5a66

Investigating IoT-based low-cost sensor network for real-time hyper-local air quality monitoring and exposure assessment—ScienceDirect. (s. f.). https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1309104225003514

Lopez-Restrepo, S., Yarce, A., Pinel, N., Quintero, O. L., Segers, A., y Heemink, A. W. (2021). Urban Air Quality Modeling Using Low-Cost Sensor Network and Data Assimilation in the Aburrá Valley, Colombia. *Atmosphere*, *12*(1), 91. https://doi.org/10.3390/atmos12010091

Carotenuto, F., Bisignano, A., Brilli, L., Gualtieri, G., y Giovannini, L. (2023). Low-cost air quality monitoring networks for long-term field campaigns: A review. *Meteorological Applications*, 30(6), e2161. https://doi.org/10.1002/met.2161

What can we learn from nested IoT low-cost sensor networks for air quality? A case study of PM2.5 in Birmingham, UK - Cowell—2024—Meteorological Applications—Wiley Online Library. (s.f.). https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/met.2220