

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA,

INFORMATICA Y MECÁNICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



TESIS

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO AUTÓNOMO
PARA MEDIR LA CONCENTRACIÓN DE MATERIAL
PARTICULADO DEL AIRE EN LA CIUDAD DEL CUSCO**

PRESENTADO POR:

Br. JULIO CESAR MAMANI CCAÑIHUA

**PARA OPTAR AL TÍTULO
PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

ASESOR:

Dr. JORGE LUIS ARIZACA CUSICUNA

FINANCIADA POR:

**PROGRAMA “YACHAYNINCHIS
WIÑARINANPAQ” UNSAAC**

CUSCO-PERÚ

2026



Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco

INFORME DE SIMILITUD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-321-2025-UNSAAC)

El que suscribe, el **Asesor** **Jorge Luis Arizaca Cusicuna**
..... quien aplica el software de detección de similitud al
trabajo de investigación/tesis titulada:
DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO AUTÓNOMO PARA MEDIR LA
CONCENTRACIÓN DE MATERIAL PARTICULADO DEL AIRE EN LA CIUDAD DEL CUSCO

Presentado por: **Julio Cesar Mamani Ccañihua** DNI N° **60201923**;
presentado por: DNI N°:
Para optar el título Profesional/Grado Académico de **Ingeniero Electrónico**

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por³ veces, mediante el
Software de Similitud, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso del Sistema Detección de**
Similitud en la UNSAAC y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de¹⁰ %.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No sobrepasa el porcentaje aceptado de similitud.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las subsanaciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, conforme al reglamento, quien a su vez eleva el informe al Vicerrectorado de Investigación para que tome las acciones correspondientes; Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de Asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y **adjunto**
las primeras páginas del reporte del Sistema de Detección de Similitud.

Cusco, **7** de **agosto** de 20**26**.....


Firma

Post firma.....
Jorge Luis Arizaca Cusicuna

Nro. de DNI.....
42348906

ORCID del Asesor.....
0000-0003-2658-5492

Se adjunta:

- Reporte generado por el Sistema Antiplagio.
- Enlace del Reporte Generado por el Sistema de Detección de Similitud: **oid:**
27259:611583979

Julio Cesar Mamani

TESIS JULIO CESAR MAMANI CCAÑIHUA_Ultimo.pdf



Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco

Detalles del documento

Identificador de la entrega

trn:oid:::27259:611583979

Fecha de entrega

31 jul 2026, 11:33 a.m. GMT-5

Fecha de descarga

31 jul 2026, 11:46 a.m. GMT-5

Nombre del archivo

TESIS JULIO CESAR MAMANI CCAÑIHUA_Ultimo.pdf

Tamaño del archivo

57.9 MB

205 páginas

43.237 palabras

231.315 caracteres

10% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 9 palabras)

Fuentes principales

- 7%  Fuentes de Internet
- 2%  Publicaciones
- 8%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

-  **Caracteres reemplazados**
53 caracteres sospechosos en N.º de páginas
Las letras son intercambiadas por caracteres similares de otro alfabeto.
-  **Texto oculto**
8 caracteres sospechosos en N.º de página
El texto es alterado para mezclarse con el fondo blanco del documento.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

RESUMEN

La contaminación del aire es uno de los problemas más críticos de la actualidad, debido a que constituye un elemento indispensable para la supervivencia humana y su deterioro afecta a toda la población; según la OMS, solo el 1 % de la población mundial respira aire que cumple con estándares saludables. Esta problemática se agrava por el alto costo de las estaciones de monitoreo, lo que limita una adecuada evaluación de la calidad del aire al no contar con una vigilancia ambiental continua. En este contexto, este proyecto propone desarrollar un sistema de monitoreo autónomo para medir la concentración de material particulado, específicamente $PM_{2.5}$, en la ciudad universitaria de Perayoc, basado en una red de seis estaciones interconectadas mediante el Internet de las Cosas (IoT) y con autonomía energética garantizada a través de paneles solares y baterías recargables. Para la calibración de las estaciones se utilizó como equipo de referencia el Dust Sentry, lo que permitió ajustar las mediciones y mejorar la exactitud y precisión de $PM_{2.5}$; la evaluación de desempeño, basada en las guías de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), mostró que las estaciones desarrolladas cuantifican adecuadamente las concentraciones de $PM_{2.5}$. Asimismo, la transmisión de datos se realiza vía la red LoRaWAN hacia una plataforma Node-Red, la cual permite almacenar la información, visualizar la variación temporal y generar reportes diarios según estándares nacionales e internacionales.

Palabras clave: Monitoreo de la calidad del aire, Material particulado ($PM_{2.5}$), Internet de las Cosas (IoT), LoRaWAN.

ABSTRACT

Air pollution has acquired significant relevance today, with air contamination being one of the most critical problems, given that air constitutes an indispensable element for human survival and its degradation affects the entire population without distinction; according to the World Health Organization (WHO), only around 1 % of the global population breathes air that meets healthy standards. This problem is aggravated by the high cost of monitoring stations, which limits an adequate assessment of air quality, since many cities lack a sufficient number of stations for continuous environmental surveillance. In this context, this project proposes the development of an autonomous monitoring system to measure the concentration of particulate matter, specifically $PM_{2.5}$, at the Perayoc university campus, based on a network of six stations interconnected through the Internet of Things (IoT) and with energy autonomy guaranteed via solar panels and rechargeable batteries, thereby enabling continuous operation. For the calibration of the stations, the Dust Sentry was used as reference equipment, allowing the adjustment of measurements and improving accuracy and precision in $PM_{2.5}$ monitoring; the performance indicators evaluation, based on the United States Environmental Protection Agency (EPA) guidelines, showed that the developed stations are capable of adequately quantifying $PM_{2.5}$ concentrations. Furthermore, data transmission is carried out via the LoRaWAN network to a central platform developed in Node-Red, which allows storing the information, visualizing the temporal variation of pollution, and generating daily reports that classify air quality according to national and international standards.

Keywords: Air quality monitoring, Particulate matter ($PM_{2.5}$), Internet of Things (IoT), LoRaWAN.

DEDICATORIA

Dedico este logro, de manera muy especial, a mi madre Ignacia, por su amor incondicional, su permanente motivación y la fuerza que me impulsó a perseverar hasta materializar este proyecto. A mi padre, Julián, por su constante apoyo y dedicación, cuyo esfuerzo hizo posible alcanzar una de mis metas. A mis hermanas, Nora y Maribel, por acompañarme en este trayecto con su aliento y comprensión. Y a mis amigos, por su respaldo y compañía en cada etapa de este desafío académico.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a quienes me apoyaron en el desarrollo de este proyecto. A mi asesor, Dr. Jorge Luis Arizaca Cusicuna, por su guía y respaldo en la culminación de este trabajo. Al Laboratorio de Investigación e Innovación en Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información (LIISTI), por brindarme la oportunidad de desarrollar mi proyecto en sus instalaciones. Al Dr. Julio Lucas Warton Azcarza, director del Centro de Investigación Cero Emisión, y a sus integrantes, por su valiosa contribución y apoyo en esta investigación.

Índice general

RESUMEN	II
ABSTRACT	III
DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
 Índice de figuras	 XIII
 Índice de tablas	 XIX
 CAPÍTULO I:	 1
 I. Generalidades	 1
1.1. Título	1
1.2. Responsable	1
1.3. Asesor	1
1.4. Ámbito geográfico	1
1.5. Problema de Investigación	2
1.6. Formulación del problema	4
1.6.1. Problema General	4
1.6.2. Problemas Específicos	4
1.7. Objetivos	5
1.7.1. Objetivo General	5
1.7.2. Objetivos Específicos	5

1.8. Justificación	5
1.9. Antecedentes	6
1.9.1. Antecedentes internacionales	6
1.9.2. Antecedentes nacionales	8
1.10. Alcances y Limitaciones	9
1.10.1. Alcances	9
1.10.2. Limitaciones	9
1.11. Variables e indicadores	10
1.11.1. Metodología	10
CAPÍTULO II:	10
II. Marco Teórico	11
2.1. Base teórica	11
2.2. Internet de las cosas	11
2.3. Redes de sensores inalámbricos	12
2.3.1. Redes IoT de amplio alcance y alta eficiencia energética.	12
2.3.2. Topologías de Red	15
2.3.3. Tipos Principales de Topologías	16
2.4. Protocolo MQTT	16
2.4.1. Calidad de servicio MQTT	18
2.5. Descripción general de LoRaWAN	19
2.5.1. Lora	19
2.5.2. Arquitectura red LoRaWAN	23

2.5.3. Modos de operación de dispositivos LoRaWAN	24
2.5.4. Clases de dispositivos	24
2.5.5. Métodos de activación	25
2.6. Material particulado	27
2.7. Clasificación del material particulado	28
2.7.1. Proceso de formación	28
2.7.2. Según el tipo de fuente generadora	28
2.7.3. El tamaño de partícula	28
2.8. Distribución del material particulado en el sistema respiratorio	30
2.9. Impacto a la salud a causa del material particulado	31
2.10. Clasificación de la calidad del aire	33
2.10.1. Índice de la calidad del aire según normativas peruanas	33
2.10.2. Calidad del aire según las directrices mundiales de la Organización Mundial de la Salud	33
2.11. Métodos de medición de material particulado	35
2.11.1. Método de referencia federal	35
2.11.2. Métodos equivalentes federales	40
2.12. Sensores de medición de calidad del aire de bajo costo	44
2.13. Tipología de las estaciones de monitoreo	45
2.13.1. Clasificación de estaciones por características del entorno	45
2.13.2. Clasificación según las fuentes de emisiones dominantes	46
2.13.3. Clasificación de estaciones según su escala	46
2.14. Determinación de contaminantes atmosféricos prioritarios	47

	IX
2.15. Criterio para la colocación de las estaciones de medición	48
2.16. Regresión	49
2.16.1. Regresión lineal simple	49
2.17. Indicadores de rendimiento	51
2.17.1. Precisión	52
2.18. Criterios de evaluación y métricas de desempeño para sensores de bajo costo	53
CAPÍTULO III:	53
III.Diseño de la red de medición de PM_{2.5}	54
3.1. Evaluación del área de estudio	54
3.1.1. Determinación de la cantidad de puntos de medición	55
3.2. Selección del sensor de medición de PM _{2.5}	58
3.3. Módulo de medición de temperatura y humedad relativa	60
3.4. Selección de la tecnología de comunicación inalámbrica	61
3.5. Elementos que conforman la red LoRaWAN	63
3.5.1. Puerta de enlace	63
3.5.2. Nodo final	65
3.5.3. Servidor de red	66
3.5.4. Servidor de aplicación	67
3.6. Diseño de las estaciones de medición de PM _{2.5}	68
3.6.1. Bloque de procesamiento y transmisión de datos	68
3.6.2. Bloque de sensado	69
3.6.3. Bloque de energía	69

	X
3.6.4. Diseño del sistema fotovoltaico	70
3.6.5. Cálculo de la batería	70
3.6.6. Dimensionamiento del panel solar	71
3.6.7. Dimensionamiento del regulador	73
3.6.8. Implementación de las estaciones de monitoreo	74
3.7. Configuración del Gateway	79
3.7.1. Asignación de canales de operación	79
3.7.2. Configuración operativa del Gateway WisGate Lite 2	80
3.7.3. Despliegue del servidor de red	82
3.7.4. Configuración de operación de las estaciones de medición	84
3.8. Diseño e implementación de la interfaz web de usuario	88
3.8.1. Configuración de Node Red	89
3.8.2. Base de datos	90
3.8.3. Instalación del servidor web Nginx	93
3.9. Esquema general del sistema a desplegar	97
CAPÍTULO IV:	98
IV.Pruebas y resultados	98
4.1. Calibración de los sensores de medición de PM _{2.5}	98
4.2. Recolección de datos	101
4.2.1. Muestreo y resolución temporal de las mediciones de PM _{2.5}	101
4.2.2. Obtención de datos del equipo de referencia Dust Sentry	102
4.2.3. Evaluación y limpieza de datos de calibración	102

4.3.	Evaluación de métricas EPA	105
4.3.1.	Coeficientes del modelo de regresión lineal empleado para la calibración de las mediciones de $PM_{2.5}$ de cada sensor respecto al equipo de referencia	107
4.4.	Evaluación de las mediciones calibradas de $PM_{2.5}$ respecto al equipo de referencia	109
4.4.1.	Métricas de evaluación EPA	109
4.4.2.	Evaluación de la precisión de las mediciones de las estaciones de medición de $PM_{2.5}$	112
4.5.	Despliegue de las estaciones de monitoreo de $PM_{2.5}$	114
4.6.	Evaluación de la red LoRaWAN	118
4.6.1.	Análisis de la tasa de recepción de paquetes	118
4.6.2.	Análisis de la potencia de señal (RSSI)	119
4.6.3.	Análisis de la relación señal-ruido (SNR)	121
4.7.	Análisis de resultados	122
4.7.1.	Análisis de los datos obtenidos de las estaciones de monitoreo desplegadas	122
4.7.2.	Evaluación horaria de las concentraciones de $PM_{2.5}$ en cada estación respecto al límite recomendado por la OMS ($5 \mu g/m^3$)	126
4.8.	Análisis de la calidad del aire de acuerdo con los estándares nacionales de contaminación	128
4.9.	Discusión	132
4.9.1.	Evaluación y calibración de los sensores	132
4.9.2.	Comportamiento de las concentraciones de $PM_{2.5}$ y posibles fuentes de contaminación	134

V. Análisis de costos y ventajas operativas	136
5.1. Costo asociado al uso del método gravimétrico	136
5.2. Costo asociado al sistema de monitoreo	138
5.2.1. Costos de hardware	138
5.2.2. Costos de desarrollo de software	139
5.2.3. Costos de licencias y suscripciones	139
5.2.4. Costos de implementación y puesta en marcha	139
5.2.5. Costos de evaluación de los sensores para la medición de $PM_{2.5}$.	140
5.2.6. Costos de personal para la gestion del sistema de monitoreo . .	140
5.2.7. Resumen General del Proyecto	141
5.3. Análisis de costos	142
5.3.1. Distribución de costos asociados a la operación del Impactador Harvard	142
5.3.2. Comparación de costos: Impactador Harvard vs. sistema de mo- nitoreo desarrollado	143
5.3.3. Comparación de costos: Aeroqual Dust Sentry vs Sistema de mo- nitoreo desarrollado	145
5.4. Ventajas operativas	147
CONCLUSIONES	149
RECOMENDACIONES	151
BIBLIOGRAFÍA	152
ANEXOS	159

Índice de figuras

1.1. Área de estudio.	1
2.1. Estructura de una red IoT.	11
2.2. Estructura de la red Sigfox.	13
2.3. Aplicaciones LoRaWAN.	14
2.4. Mikroe NB IoT 4 Click.	15
2.5. Tipos de topologías de red.	16
2.6. Arquitectura del protocolo MQTT.	18
2.7. Modelo OSI LoRaWAN.	19
2.8. Banda de frecuencias asignadas a regiones alrededor del mundo.	20
2.9. Ancho de banda LoRa.	21
2.10. Comparación de la variación del SF (7-12) en función de diferentes anchos de banda (125, 250 y 500 kHz) en el canal de 868.5 MHz.	22
2.11. Arquitectura LoRaWAN.	23
2.12. Clase A.	24
2.13. Clase B.	25
2.14. Clase C.	25
2.15. Comparación del tamaño relativo de las partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} respecto al grosor de un cabello humano.	27
2.16. Masa de partícula vs. diámetro para las dos clases de partículas ($PM_{2.5}$ (verde) y PM_{10} (rojo)) en una escala logarítmica.	29

2.17. Grado de infiltración de partículas.	31
2.18. Representación de la deposición del material particulado de acuerdo al diámetro aerodinámico en el sistema respiratorio.	32
2.19. Esquema general del Impactador Harvard.	36
2.20. Base del impactador Harvard.	37
2.21. Filtros de disco de membrana de PTFE.	37
2.22. Porta filtro.	37
2.23. Balanza analítica.	38
2.24. Ubicación del Impactador Harvard en la estación de medición.	38
2.25. Estación de medición de material particulado PM ₁₀	39
2.26. Interior del gabinete del muestreador de bajo volumen tipo Harvard, mostrando la bomba de vacío y conexiones internas.	39
2.27. Analizador de masa por radiación beta BAM-1022	40
2.28. Esquema operativo del instrumento de microbalanza de elemento osci- lante cónico.	41
2.29. Principio de medición contador óptico de partículas.	42
2.30. Partes del equipo Dust Sentry PCX.	43
2.31. Equipo Dust Sentry PCX.	44
2.32. Funcionamiento interno de los sensores Honeywell y Sensirion.	45
3.1. Mapa de delimitación del área de estudio.	54
3.2. Ubicación de las estaciones de medición en el campus universitario. Cada cuadrícula tiene dimensiones aproximadas de 169 m × 192 m.	57
3.3. Sensor PMS7003.	59
3.4. Sensor de medición de temperatura y humedad DHT22.	60

3.5. Área del campus universitario.	62
3.6. WisGate Edge Lite 2.	64
3.7. Esquema de pines y componentes de la placa TTGO T3_V1.6.1.	65
3.8. Servidor de aplicaciones.	67
3.9. Esquema de conexión de la estación de medición PM _{2.5}	68
3.10. Batería Ultralife 12v 7.5Ah.	71
3.11. Controlador solar.	74
3.12. Esquema general de conexión de una estación de monitoreo.	74
3.13. Esquema electrónico del bloque de procesamiento y transmisión de datos.	75
3.14. Diseño de la placa de circuito impreso.	75
3.15. Modelo 3D virtual de la placa electrónica.	76
3.16. Vista de componentes del módulo principal de la estación de monitoreo.	76
3.17. Vista inferior del módulo principal del prototipo.	77
3.18. Vista superior del módulo principal del prototipo.	77
3.19. Vista interna de la estación de medición.	77
3.20. Estación de medición de calidad del aire instalada.	78
3.21. Diseño final de las estaciones de PM _{2.5} . Vista del sensor PMS7003 y del sensor de temperatura DHT22.	78
3.22. Banda de operación asignada por LoRa Alliance para Perú.	79
3.23. Bandas de operación admitidas para Australia.	79
3.24. Plataforma de configuración Wis Gate Lite 2.	80
3.25. Configuración Channel plan.	81
3.26. Configuración acceso a internet.	81

3.27. Configuración de la puerta de enlace con el servidor red.	82
3.28. Configuración del servidor red.	83
3.29. Creación de la aplicación.	83
3.30. Registro del dispositivo final.	84
3.31. Diagrama de flujo de funcionamiento de la estación de medición	86
3.32. Función para decodificar la información recibida.	87
3.33. Visualización de los datos recibidos.	87
3.34. Creación de la maquina virtual en Google Cloud.	88
3.35. Plataforma de The Thing Network para la comunicación MQTT. . . .	89
3.36. Configuración del nodo mqtt in.	89
3.37. Tablas que contiene la base de datos.	90
3.38. Estructura de la tabla “datos”.	91
3.39. Diagrama de flujo para el almacenamiento de datos en la tabla “ datos” .	92
3.40. Estructura de la base de datos denominada “promedioidatos”.	92
3.41. Diagrama de flujo para el almacenamiento de datos en la tabla “ prome- dioidatos”.	92
3.42. Flujo de procesamiento y visualización de datos cada 5 minutos en Node- RED para las estaciones de monitoreo de calidad del aire.	94
3.43. Flujo de procesamiento y visualización de datos cada 24 horas en Node- RED para las estaciones de monitoreo de calidad del aire.	95
3.44. Flujo de procesamiento y visualización de la ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire.	95
3.45. Ubicación de las estaciones de monitorio.	96
3.46. Visualización de la data y clasificación de la calidad del aire.	96
3.47. Diagrama del sistema de medición de material particulado	97

4.1. Equipo Dust Sentry PCX.	99
4.2. Equipo de referencia y sensores PMS7003.	100
4.3. Parte interna de la estación de referencia.	100
4.4. Conformación matricial del conjunto de sensores PMS7003.	101
4.5. Gráfico de dispersión.	103
4.6. Gráfico de dispersión sin valores atípicos.	104
4.7. Gráfico de dispersión.	105
4.8. Diagrama de dispersión con resolución temporal de 24 h para evaluación de métricas EPA.	110
4.9. Serie temporal diaria de las concentraciones de PM _{2.5} registradas por la estación de referencia y los seis sensores de bajo costo calibrados. . . .	113
4.10. Ubicación de las estaciones de monitoreo PM _{2.5}	114
4.11. Estación 1.	114
4.12. Estación 2.	115
4.13. Estación 3.	115
4.14. Estación 4.	116
4.15. Estación 5.	116
4.16. Estación 6.	117
4.17. Ubicación del gateway.	118
4.18. Clasificación del desempeño de las estaciones según el PDR promedio. .	119
4.19. Clasificación del RSSI de LoRaWAN por estación.	120
4.20. Clasificación del SNR de LoRaWAN por estación.	121
4.21. Evolución diaria de PM _{2.5}	122
4.22. Evolución del comportamiento diario de la contaminación del aire. . . .	124

4.23. Evolución horaria de la contaminación en un día típico.	125
4.24. Variación horaria de $PM_{2.5}$ por estación y comparación con el límite de la OMS ($5 \mu g/m^3$) el 3 de marzo de 2026.	126
4.25. Variación horaria de $PM_{2.5}$ por estación y comparación con el límite de la OMS ($5 \mu g/m^3$) el 10 de marzo de 2026.	127
4.26. Variación horaria de $PM_{2.5}$ por estación y comparación con el límite de la OMS ($5 \mu g/m^3$) el 19 de marzo de 2026.	127
4.27. Variación horaria de $PM_{2.5}$ por estación y comparación con el límite de la OMS ($5 \mu g/m^3$) el 13 de marzo de 2026.	128
4.28. Variación horaria de $PM_{2.5}$ por estación y comparación con el límite de la OMS ($5 \mu g/m^3$) el 16 de marzo de 2026.	128
4.29. Promedio diario de concentración de $PM_{2.5}$	129
4.30. Comportamiento temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas por las estaciones de monitoreo durante el día 03 de marzo de 2026. . .	130
4.31. Comportamiento temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas por las estaciones de monitoreo durante el día 04 de marzo de 2026. . .	130
4.32. Comportamiento temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas por las estaciones de monitoreo durante el día 10 de marzo de 2026. . .	131
4.33. Comportamiento temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas por las estaciones de monitoreo durante el día 19 de marzo de 2026. . .	131
5.1. Distribución de costos detallada del método gravimétrico.	142
5.2. Costos anuales asociados a la implementación y operación del Impactador Harvard (método gravimétrico) y del sistema de monitoreo desarrollado.	144
5.3. Costo total según número de estaciones.	146

Índice de tablas

1.1. Relación de variables e indicadores.	10
1.2. Clasificación Metodológica de la Investigación.	10
2.1. Principales características de Sigfox	13
2.2. Parámetros de configuración de LoRa.	23
2.3. Clasificación del material particulado según su diámetro aerodinámico .	29
2.4. Clasificación de la concentración de material particulado $PM_{2.5}$	33
2.5. Desenlaces de salud asociados a la exposición a $PM_{2.5}$ por encima de $5 \mu g/m^3$	34
2.6. Niveles guía AQG para $PM_{2.5}$ y PM_{10}	34
2.7. Especificaciones del módulo Dust Sentry PCX.	44
2.8. Tipos de estaciones de medición de calidad del aire.	46
2.9. Escalas de monitoreo y áreas correspondientes.	47
2.10. Contaminantes a priorizar según las fuentes vinculadas.	47
2.11. Guía de instrucciones de colocación de sensor.	48
2.12. Métricas estadísticas para la evaluación del rendimiento de los sensores.	51
2.13. Métricas de evaluación del desempeño para sensores de $PM_{2.5}$	53
3.1. Clasificación del campus universitario.	55
3.2. Densidad de estaciones de monitoreo en un área determinada.	56
3.3. Ubicación de las estaciones de medición.	58

3.4. Comparación de características de sensores de material particulado. . .	59
3.5. Especificaciones técnicas de los sensores de calidad del aire.	59
3.6. Análisis comparativo de las especificaciones técnicas de los sensores DHT11 y DHT22.	61
3.7. Comparación de tecnologías LPWAN en función de criterios de selección.	62
3.8. Características y costo del gateway WisGate Edge Lite 2 (RAK7268). .	64
3.9. Comparación técnica entre placas de desarrollo LoRa.	66
3.10. Características del servidor de red LoRaWAN TTN.	67
3.11. Consumo de energía de los componentes para 24 horas de operación continua.	70
3.12. Parámetros de dimensionamiento de la batería.	71
3.13. Radiación solar promedio mensual y anual ($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2/\text{día}$) en Cusco, Perú (Lat. -13.5215, Long. -71.9587) del 2017 al 2022.	72
3.14. Dimensionamiento de paneles solares según horas solares pico, energía requerida y factor global de pérdidas.	73
3.15. Sub-bandas y canales de operación LoRa AU915-928.	80
3.16. Comparación entre ABP y OTAA en LoRaWAN.	84
3.17. Parámetros operativos de transmisión utilizados en la estación de medición.	85
3.18. Bibliotecas utilizadas en la programación de la estación.	85
3.19. Variables consideradas en el cálculo del promedio diario.	93
4.1. Certificación MCERTS y rangos de medición del Dust Sentry PCX. . .	98
4.2. Recomendaciones para la instalación de sensores.	99
4.3. Configuración del tiempo de muestreo y envío de datos.	102
4.4. Cantidad de datos válidos de $\text{PM}_{2.5}$ a resolución temporal original (cada 5 minutos).	103

4.5. Cantidad de promedios diarios (24 h) de PM _{2.5} procesados.	103
4.6. Desempeño de los sensores de PM _{2.5} respecto al equipo de referencia (promedios diarios de 24 h).	106
4.7. Indicadores estadísticos de precisión y sesgo obtenidos.	107
4.8. Valores mínimos y máximos de las concentraciones promedio diarias de PM _{2.5} registradas por los sensores y el equipo de referencia durante el mismo periodo de evaluación.	107
4.9. Coeficientes del modelo de regresión lineal para cada sensor de PM _{2.5}	108
4.10. Métricas de evaluación por sensor (promedios diarios de 24 h).	111
4.11. Métricas estadísticas de las estaciones calibradas y límites de desempeño recomendados.	112
4.12. Resumen de variabilidad diaria de PM _{2.5} para el conjunto de estaciones.	123
5.1. Costos estimados de equipos y materiales para una campaña anual me- diante el método gravimétrico.	136
5.2. Costos de personal asociado a la operación del método gravimétrico (campaña anual en Perú, dedicación parcial).	137
5.3. Resumen de costos estimados para la aplicación del método gravimétrico durante una campaña anual.	137
5.4. Componentes y costos por estación de monitoreo.	138
5.5. Resumen de inversión en hardware.	138
5.6. Desarrollo de software y configuración del sistema.	139
5.7. Licencias y servicios en la nube.	139
5.8. Implementación y pruebas del sistema.	139
5.9. Costos asociados a la evaluación del desempeño de los sensores en la medición de PM _{2.5} frente a un equipo de referencia certificado.	140

5.10. Costos de personal asociados a la operación anual de las estaciones de monitoreo (dedicación parcial).	141
5.11. Costo total del proyecto.	141
5.12. Distribución de costos del método gravimétrico.	142
5.13. Comparación de costos totales de los métodos de monitoreo.	143
5.14. Estimación de costos anuales para una estación de monitoreo desarrollada y comparación con el método gravimétrico.	144
5.15. Comparación entre el equipo de referencia Dust Sentry y una estación de monitoreo.	145
5.16. Comparación entre el sistema de referencia y el sistema de monitoreo para 6 estaciones.	145
5.17. Comparación práctica entre el método gravimétrico de referencia y las estaciones de bajo costo para $PM_{2.5}$	148

Capítulo I

Generalidades

1.1. Título

“Desarrollo de un sistema de monitoreo autónomo para medir la concentración de material particulado del aire en la ciudad del Cusco”

1.2. Responsable

Bach. Julio Cesar Mamani Ccañihua

1.3. Asesor

Dr. Jorge Luis Arizaca Cusicuna

1.4. Ámbito geográfico

El área de estudio del presente proyecto fue el campus universitario de Perayoc.

Figura 1.1
Área de estudio.



Nota: Fuente de la imagen: Google Maps.

1.5. Problema de Investigación

En la actualidad, la contaminación del aire se considera un peligro ambiental debido a los graves problemas que causa en la salud humana. El aumento en los niveles de contaminación, generado por diversas fuentes como el parque automotor, ha puesto en riesgo la calidad del ambiente y ha provocado un deterioro de la salud humana. La información recopilada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) reporta que solamente el 1 % de los habitantes a nivel mundial reside en ciudades que cumplen con las directrices internacionales que promueven un ambiente limpio y saludable, el cual recomienda evitar la exposición al aire contaminado. Este hecho ha provocado 4.2 millones de muertes relacionadas con la contaminación atmosférica al aire libre. (WHO, 2022)

La medición de partículas en suspensión de $PM_{2.5}$ y PM_{10} es un método reconocido por la OMS para evaluar la calidad del aire. Entre ellas, el $PM_{2.5}$ es especialmente dañino para la salud, ya que su diminuto tamaño le permite ingresar a los pulmones y llegar al torrente sanguíneo, provocando daños en los sistemas cardiovascular y cerebrovascular. (Who, 2021) El último informe sobre contaminación del aire del 2022, presentado por World Air Quality, una empresa suiza especializada en tecnología para la calidad del aire (IQAir), sitúa a Perú como el país con más concentración de material particulado de América Latina, alcanzando los $23,5 \mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$. (Iqair, 2023)

Las fuentes de contaminación que afectan a los habitantes de la ciudad del Cusco incluyen la incineración de combustibles fósiles, provenientes principalmente del parque automotriz. Numerosos estudios han demostrado una evaluación positiva entre el aumento del parque automotriz y el aumento de los niveles de contaminación del aire. Este problema se agrava aún más debido al constante incremento anual en la cantidad de vehículos, siendo esta la principal fuente del problema. Esta situación se origina por la falta de mantenimiento, la antigüedad y la baja calidad del combustible utilizado. La combustión incompleta de petróleo, gasolina y diésel genera partículas finas, perceptibles como humo negro expulsado por los vehículos. El tráfico vehicular no solo genera mayor cantidad de partículas a través del escape, sino que también levanta partículas del suelo debido al contacto de las ruedas con la superficie. Además, condiciones meteorológicas como el viento pueden mantener las partículas suspendidas en el aire. En el análisis de las fuentes que generan contaminantes atmosféricos en la cuenca del Cusco en el año 2004, se midieron contaminantes como PM_{10} , SO_2 , NO_2 , COV y Pb, analizando las fuentes generadoras. Se determinó que el PM_{10} constituía el 84.65 % de todas las emisiones, siendo el parque automotor responsable del 98.31 % de

estas emisiones, seguido por otras fuentes como residencias, fabricación de ladrillos y otras industrias.(Ramos, 2019)

La Gerencia Regional de Salud del Cusco (GERESA) es la entidad encargada de realizar mediciones de material particulado PM_{10} mediante un equipo fijo de bajo volumen de muestreo, denominado Impactador Harvard, el cual emplea el método gravimétrico. Actualmente, solo cuenta con un punto activo de monitoreo ubicado en el Hospital Regional del Cusco y otro punto en proceso de reparación en la Plaza de Limacpampa. Con el objetivo de ampliar la red de monitoreo, en julio de 2023 la GERESA Cusco solicitó, bajo términos de referencia, el servicio de “Monitoreo y vigilancia de la calidad sanitaria del aire en la cuenca atmosférica del Cusco”. De manera general, dicha solicitud contemplaba la adquisición de equipos automatizados para la obtención de datos de $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_2 , NO_2 , CO , NO_x y O_3 ; sin embargo, esta fue denegada debido al alto costo asociado y a la limitada disponibilidad presupuestal.

Por lo tanto, surge la necesidad del “ Desarrollo de un sistema de monitoreo autónomo para la medición de la concentración de material particulado del aire en la ciudad del Cusco”, el cual tiene como objetivo supervisar y monitorear la contaminación del aire de manera automatizada. Este proyecto permitirá generar datos de manera continua para la toma de decisiones informadas sobre políticas ambientales y de salud pública. De esta manera, se contribuirá a proteger la salud de la población y a aumentar la conciencia sobre la calidad del aire que respiramos.

1.6. Formulación del problema

1.6.1. Problema General

La medición de la concentración de material particulado en la ciudad del Cusco no es la más óptima debido al uso del método gravimétrico. Este procedimiento, mediante un equipo especializado, realiza la función de impulsar un flujo de aire constante a través de filtros, en los cuales se retienen las partículas en suspensión. Posteriormente, dichos filtros son pesados en un laboratorio para determinar la masa acumulada. Asimismo, el número limitado de puntos de monitoreo solo permite conocer la contaminación en áreas específicas y localizadas, lo que dificulta obtener una visión representativa de la calidad del aire.

1.6.2. Problemas Específicos

1. ¿Cómo se realizará la medición de partículas en suspensión en el área de estudio?
2. ¿Qué tecnología de comunicación inalámbrica se adapta mejor a una red de sensores para la medición de partículas en suspensión?
3. ¿Cómo puede una plataforma de visualización ayudar a la población a conocer los niveles de contaminación por material particulado y tomar medidas preventivas a favor de su salud?
4. ¿Cómo se puede evaluar de manera efectiva la confiabilidad de una red de monitoreo de concentración de partículas?
5. ¿Qué mejoras operativas se logran al usar sensores de bajo costo en vez del método gravimétrico tradicional para medir material particulado?

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de monitoreo autónomo, a nivel prototipo, para cuantificar la concentración de partículas en suspensión en la ciudad del Cusco.

1.7.2. Objetivos Específicos

1. Diseñar una red de sensores inalámbricos capaces de cuantificar la concentración de partículas.
2. Evaluar y seleccionar la tecnología de comunicación inalámbrica más adecuada para la red de sensores.
3. Diseñar una interfaz de usuario intuitiva y accesible que permita la visualización remota de los datos.
4. Validar el funcionamiento de la red propuesta para la medición de partículas.
5. Evaluar las mejoras y ventajas económicas de reemplazar el método gravimétrico tradicional con la utilización de sensores de bajo costo para la medición de partículas.

1.8. Justificación

En 2005, en Perú, la Dirección General de Salud (DIGESA) estableció directrices para regular y gestionar la contaminación del aire. Estas directrices tenían como objetivo principal desarrollar normativas que protegieran la salud pública y el medio ambiente a nivel nacional, garantizando medidas efectivas de control y supervisión de la calidad del aire.

La exposición a niveles altos de contaminación, en corto o largo plazo, trae consigo graves problemas a la salud afectando a niños y ancianos. El contaminante más perjudicial es el $PM_{2.5}$, el cual se relaciona con una mortalidad prematura excesiva. En el año 2019, la OMS desarrolló un informe sobre la polución del aire que registró 4.2 millones de muertes prematuras a escala global. El 89 % de estas muertes ocurrieron en países de bajos ingresos económicos y se atribuyeron a la contaminación del aire exterior. Ahora, el 37 % está atribuido a accidentes cerebrovasculares. Además, hay un

11 % relacionado con el cáncer en las vías respiratorias, un 23 % se asocia con infecciones agudas. Por último, se atribuye un 18 % a enfermedades pulmonares crónicas.(WHO, 2022)

La necesidad de desarrollar este proyecto surge a partir de las dificultades reportadas por la Gerencia de Salud Cusco, entre las que destacan la escasez de equipos de monitoreo, así como las limitaciones en su mantenimiento y renovación por tecnologías más modernas y eficientes para la medición de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} . Asimismo, el método tradicional empleado presenta diversos inconvenientes, como la falta de mediciones continuas en el tiempo. Además, requiere personal capacitado para realizar procedimientos como el cambio y pesaje de filtros, el etiquetado y la prevención de la contaminación de las muestras. A ello se suma la imposibilidad de evaluar múltiples ubicaciones, debido a que las estaciones implementadas son de tipo fijo, lo que representa una limitación significativa en la cobertura del monitoreo.

Considerando estos desafíos, se pretende desarrollar una red de sensores automatizados para medir material particulado. La OMS y el estándar de calidad del aire avalan la utilización de sensores de dispersión de luz para la medición de $PM_{2.5}$ como método alternativo. La supervisión continua del material particulado es fundamental para analizar la contaminación del aire. Esta iniciativa será de gran utilidad para las autoridades municipales de la ciudad del Cusco y otras entidades relevantes, ya que les proporcionará datos precisos para tomar decisiones clave. Además, permitirá que la población esté informada sobre la calidad del aire que respira.

1.9. Antecedentes

1.9.1. Antecedentes internacionales

En la tesis titulada **“Prototipo de monitoreo de calidad de condiciones ambientales a bajo costo con tecnologías IoT”**, presentada por Hernández en el año 2020, se señala que la presencia de gases tóxicos emitidos por fuentes fijas y móviles genera problemas de salud asociados a la contaminación del aire. Con el objetivo de realizar un monitoreo ambiental preventivo, se implementó un sistema capaz de medir diferentes parámetros ambientales, entre ellos material particulado $PM_{2.5}$, PM_{10} , CO_2 , CO, además de temperatura y humedad. Para la medición de $PM_{2.5}$ y PM_{10} se empleó el sensor HPM115S0, mientras que para la comunicación inalámbrica se utilizó el módulo transceptor E32-TTL-100 de 100 mW basado en tecnología LoRa. Asimismo, se implementó una topología en estrella integrada con la plataforma Ubidots, desarrollán-

dose una interfaz que permite visualizar la ubicación GPS de cada dispositivo, junto con las variables monitoreadas y sus respectivos gráficos. En relación con el alcance de comunicación, se logró una transmisión de datos en línea de vista de hasta 600 metros.

En el artículo **“Determinación y Análisis de las Concentraciones de Material Particulado Medido por una Red de Monitoreo Continuo para la Ciudad de Asunción”**, presentado por Recalde et al., en el año 2021, este estudio tuvo lugar en el país de Paraguay. Se recolectaron datos de $PM_{2.5}$ y PM_{10} en diferentes zonas, así como la temperatura, humedad y presión atmosférica. Para obtener datos de material particulado se usó láser de marca Libelium - Modelo Smart Environment Pro. Los datos se adquieren automáticamente y se transmiten cada 5 minutos. Se hace uso de un servidor configurado en Linux que almacena los datos en MySQL y PHP. Los resultados indican que durante 33 días de monitoreo se han excedido umbrales fijados por la OMS para $PM_{2.5}$, y en 5 días se han excedido los límites para PM_{10} .

En la tesis titulada **“Diseño e implementación de una red con sensores inalámbricos (WSN) utilizando protocolos open source basados en tecnología LoRaWAN, para medir la contaminación del aire y los niveles de ruido en las extensiones de la Universidad de Guayaquil”**, presentada por Gómez, en el año 2021, este proyecto nace con el propósito de generar conciencia en la comunidad universitaria acerca de la calidad del aire que respiran. Para ello, se hace uso de una red de sensores y protocolos de código abierto, cumpliendo la finalidad de medir la contaminación del aire. El hardware utilizado para su implementación incluyó la placa TTgo Lora32 v2.0 915MHz, el Gateway Draguino LG308, sensores de CO y sensor de ruido. Se implementó un servidor que fue The Thing Network, la aplicación web ThingSpeak y el protocolo LoRaWAN. Las pruebas se desarrollaron en un periodo de tres días, ubicando los sensores en lugares de alto tráfico. En las conclusiones se indica que el prototipo tiene una alta eficiencia en la recopilación de datos.

En la tesis titulada **“Implementación de red de sensores inalámbricos de bajo costo utilizando el protocolo LoRaWAN aplicado al monitoreo de material particulado, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno como indicadores de calidad de aire en exteriores”**, presentada por Ruiz et al., en el año 2020, se empleó el protocolo LoRaWAN como método de comunicación para la transmisión de datos sobre los contaminantes del aire, según las normativas colombianas. Esto incluye sustancias como el CO, material particulado y NO_2 , lo que permitió conocer las concentraciones de contaminantes y tomar acciones preventivas. El sistema está compuesto por dos nodos finales, cada uno equipado con un microcontrolador, un sensor de material particulado

DSM501A, un módulo LORABEE con transceptor RM95W y baterías de alimentación. También incluye un Gateway que se comunica con los nodos finales. Para el registro del Gateway, se implementó un servidor en red, que fue The Things Network (TTN), y un servidor de aplicación, como ThingSpeak, para la visualización de datos. Se llevó a cabo el despliegue de los nodos sensores alcanzando una distancia de 324 metros sin pérdida de datos.

En la tesis titulada “ **Diseño y desarrollo de un prototipo de red de sensores IoT utilizando tecnología LoRaWan para el monitoreo de parámetros ambientales en interiores y exteriores** ”, presentada por Narváez, en el año 2020. La finalidad de este estudio fue adquirir datos para permitir su visualización en tiempo real por parte de los usuarios. Para llevar a cabo esto, se utilizó como puerta de enlace el Raspberry Pi 3 y el módulo Gateway LoRa-RAK 811. Además, se eligió la tarjeta de desarrollo Arduino MKR 1300 para conectar el sensor PMS3003 y llevar a cabo la medición de partículas finas. Durante el análisis, se observó que el aumento del tráfico vehicular se relaciona con un aumento de partículas $PM_{2.5}$ y PM_{10} .

1.9.2. Antecedentes nacionales

En la tesis “**Monitoreo de Material Particulado (PM_{10}) y Variaciones Climáticas en Santiago de Surco y San Juan de Miraflores, Lima-Perú, 2019**”, este proyecto fue desarrollado por Estela, en el año 2021. La información analizada fue adquirida a través del programa de mediciones del programa de vigilancia de calidad ambiental. Su propósito era analizar la relación entre las variaciones medioambientales, como la temperatura y la humedad, con la cantidad de partículas finas PM_{10} . Para este análisis estadístico, se empleó el software SPSS, realizando mediciones cada mes y evaluando las tendencias de cada parámetro. El análisis desarrollado podría ser útil para predecir la contaminación del aire en las ubicaciones donde se encuentran las estaciones de monitoreo. Los datos obtenidos sobre las partículas PM_{10} superaron los niveles permitidos para un ambiente saludable. Esto se debió a los gases contaminantes de los vehículos y a las partículas finas, incluyendo el polvo de la atmósfera natural.

1.10. Alcances y Limitaciones

1.10.1. Alcances

El trabajo de tesis contemplará los siguientes alcances:

- Se desarrollará una base de datos para almacenar y gestionar toda la información recolectada.
- Se analizará detalladamente la ubicación óptima de los nodos sensores.
- Se medirá la concentración de partículas finas de diámetro menor a 2.5 μm .
- Se evaluará la contaminación del aire según normativas nacionales e internacionales que establecen límites para partículas PM2.5.
- Se analizará la tecnología inalámbrica de comunicación para la transferencia de datos sin pérdidas.
- Se determinará el nivel de contaminación basado en los índices de calidad del aire.
- Se diseñará una plataforma de visualización de los nodos sensores con sus mediciones respectivas.

1.10.2. Limitaciones

- No se evaluarán los problemas de salud que puedan generarse en las personas debido a la exposición a material particulado en las zonas de monitoreo.
- Se pretende implementar 6 nodos de monitoreo.
- El área de estudio no cubrirá toda la ciudad del Cusco, ya que dependerá del número de nodos desplegados.
- Se evaluará la calidad del aire del campus universitario.
- Se evaluará la contaminación de PM_{2.5}, debido a que es el contaminante más peligroso según la OMS.

1.11. Variables e indicadores

Tabla 1.1

Relación de variables e indicadores.

Variables	Dimensiones	Indicadores
Variable independiente		
Desempeño del sistema de monitoreo	Cobertura geográfica	Porcentaje de área cubierta
	Precisión de la medición	Desviación estándar (SD), coeficiente de variación (CV)
	Exactitud de la medición	Raíz del error cuadrático medio (RMSE), error absoluto medio (MAE)
	Fiabilidad del sistema	Tiempo de funcionamiento
Variable dependiente		
Concentración de material particulado	Niveles de concentración de PM _{2.5}	Buena: 0–12.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		Moderada: 12.6–25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		Mala: 25.1–125 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
		Umbral de cuidado: $\geq 125 \mu\text{g}/\text{m}^3$
	Tamaño de partículas	$\leq 2,5 \mu\text{m}$

Nota. Elaboración propia.

1.11.1. Metodología

Tabla 1.2

Clasificación Metodológica de la Investigación.

Componente	Metodológico	Descripción y Justificación
Tipo de investigación		Este estudio adopta un enfoque cuantitativo, utilizando una red de monitoreo especializada en la medición de partículas atmosféricas. La recopilación y almacenamiento sistemático de estos datos numéricos permitirá un análisis detallado de la polución del aire en la zona de estudio (Sampieri, 2020).
Alcance de la investigación		El estudio es de alcance descriptivo que consiste en recolectar datos para comprender la calidad del aire en el área de estudio. El objetivo es analizar los niveles de contaminación por partículas y su distribución espacial.
Diseño de investigación		No experimental y transversal. Las mediciones de material particulado se realizan en su entorno natural sin control ni manipulación de variables, recolectando los datos en un periodo de tiempo determinado.

Nota. Elaboración propia.

Capítulo II

Marco Teórico

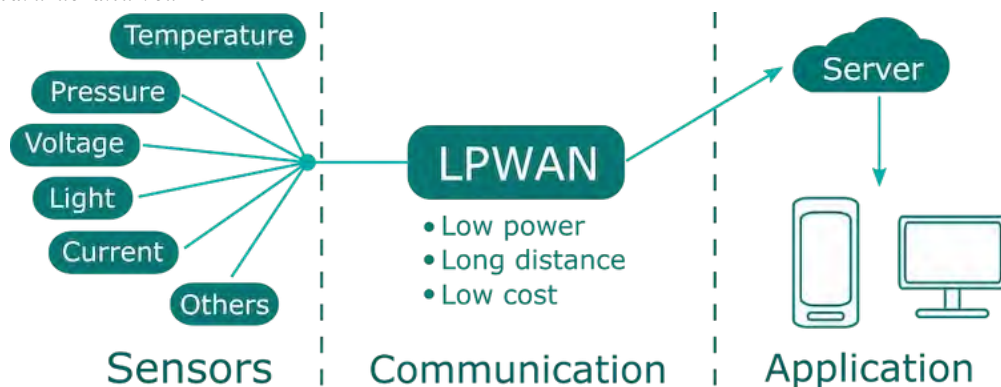
2.1. Base teórica

2.2. Internet de las cosas

La esencia del Internet de las cosas (IoT) radica en establecer una conexión inteligente entre individuos, procesos, datos y objetos, lo que conlleva a mejorar la conectividad de las redes y presentar mayores ventajas y oportunidades para las personas, empresas y países, gracias a la integración de nuevas funcionalidades. La palabra IoT al inicio solo era usado para mostrar los equipos conectados con la tecnología de identificación de radiofrecuencia (RFID). Posteriormente, la palabra IoT fue relacionada con más tecnologías como actuadores, sensores, dispositivos GPS y dispositivos móviles siendo de uso de la comunidad científica. Al día de hoy, una definición aceptada de IoT es la interconexión global y dinámica de red con protocolos de comunicación auto configurables, donde los objetos están perfectamente integrados en una red con información, utilizando interfaces, características físicas y cosas virtuales.

Figura 2.1

Estructura de una red IoT.



Nota. Adaptado de (MokoLora, 2023).

2.3. Redes de sensores inalámbricos

En el ámbito del desarrollo de una infraestructura IoT, la WSN (Red de Sensores Inalámbricos) es una tecnología clave que se emplea para recopilar y almacenar información en tiempo real y permitir la transmisión de datos sin cables. Se emplea en la conexión de dispositivos inalámbricos a una misma red, intercambiando información y compartiendo recursos, haciendo uso de protocolos de comunicación como TCP/IP, UDP y otros. Una red WSN consta de una estación central y nodos sensores, estos últimos están conformados por cuatro elementos esenciales: una unidad de procesamiento, un sensor de detección, capacidades de comunicación y un sistema de alimentación. Estos nodos se despliegan estratégicamente para abarcar un área de interés, con el propósito de recopilar datos sobre diversas variables, tales como temperatura, humedad u otras que sean relevantes. Existen diferentes tipos de estructura de red empleados en WSN, por ejemplo, la Mesh Network, Star Network, Bus Network y Tree Network. Ahora, la comunicación entre los nodos depende en gran medida de cómo se diseñe la estructura de la red, debido a que su impacto recae en diferentes factores donde el ancho de banda, velocidad de red, latencia y la escalabilidad se ven afectados.

2.3.1. Redes IoT de amplio alcance y alta eficiencia energética.

Las redes LPWAN (Low Power Wide Area Network) son tecnologías de comunicación que combinan bajo consumo de energía con gran cobertura geográfica, características esenciales en los proyectos de IoT. Estas propiedades hacen que su uso sea cada vez más común en aplicaciones donde se requiere conectar múltiples dispositivos distribuidos a larga distancia. A continuación, se describen las principales redes que conforman este tipo de tecnologías.

2.3.1.1. Sigfox

Sigfox es una tecnología que se caracteriza por brindar una cobertura amplia con bajo consumo energético. Utiliza modulación BPSK y opera en frecuencias de libre licencia, empleando una banda ultraestrecha para transmitir datos de manera eficiente.

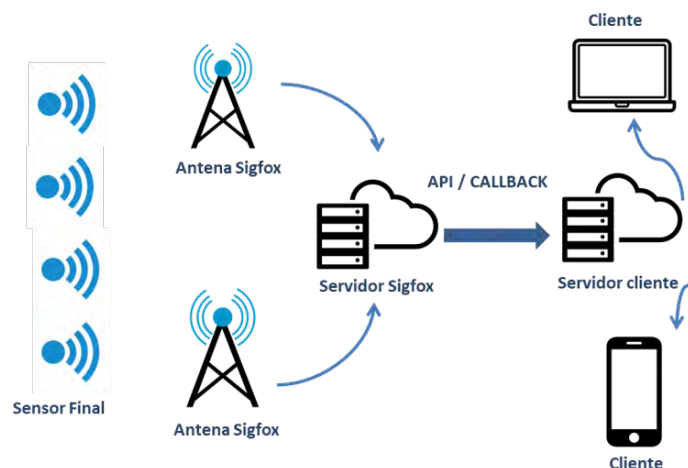
La infraestructura de Sigfox se asemeja a la de las redes de telefonía móvil, con antenas y estaciones base distribuidas estratégicamente. Su cobertura típica alcanza varios kilómetros en áreas urbanas y puede extenderse hasta 30–50 km en zonas rurales o abiertas, lo que permite la comunicación eficiente de dispositivos IoT distribuidos a

gran escala.

Sigfox ofrece a los desarrolladores acceso a su hardware, pero el uso de la red requiere una suscripción. En el desarrollo del hardware, Sigfox colabora con fabricantes como Atmel, Silicon Labs y Wisol, entre otros.

Figura 2.2

Estructura de la red Sigfox.



Nota. Adaptado de (WooCommerce, 2020).

Tabla 2.1

Principales características de Sigfox

Característica	Valor
Velocidad de transmisión	100 bps
Mensajes <i>uplink</i> (dispositivo → nube)	Máx. 140 por día
Tamaño de mensaje <i>uplink</i>	Hasta 12 bytes
Mensajes <i>downlink</i> (nube → dispositivo)	Máx. 4 por día
Tamaño de mensaje <i>downlink</i>	Hasta 8 bytes
Cobertura	10–50 km (rural) / 3–10 km (urbano)
Consumo energético	Muy bajo (años de batería)
Frecuencia de operación	868 MHz (Europa), 902 MHz (América)

Nota. Elaboración propia.

2.3.1.2. LoRaWAN

LoRaWAN es un protocolo de comunicación estándar que se encarga de la gestión y seguridad de la red. Fue desarrollado por la LoRa Alliance, brindando bajo consumo de energía y alcance local y regional. La estructura está compuesta por dispositivos finales (nodos), gateways o puertas de enlace, servidores de red y por último

un servidor de aplicación. En el caso de los nodos finales, se clasifican de acuerdo a cómo pueden recibir los mensajes de enlaces descendentes (downlink), a continuación se mencionan los tres tipos que son A, B y C. En el caso de la interconexión del gateway con los nodos finales, se emplea una topología típica en estrella, donde los gateways actúan como puente entre los dispositivos finales y los servidores de red.

Dentro del estándar LoRaWAN, es necesaria una capa física para la transmisión de información. LoRa se considera la capa física que se encarga del tipo de modulación, que es Chirp Spread Spectrum (CSS). Opera en las frecuencias ISM (Industrial, Científica y Médica), lo que representa una ventaja, ya que no requiere licencia. También depende de parámetros como el Spreading Factor (SF), que indica la duración del símbolo chirp, tomando valores de 7 a 12. Otros parámetros importantes son el ancho de banda (BW), usualmente de 125 kHz, 250 kHz o 500 kHz, y el Coding Rate (CR), que proporciona protección contra errores. Los mensajes de enlace ascendente habitualmente utilizan anchos de banda de 125 kHz o 250 kHz, mientras que los de enlace descendente pueden usar 500 kHz en algunas regiones.

Las aplicaciones de esta tecnología van desde el monitoreo de parámetros ambientales, seguridad y control de accesos, agricultura inteligente, ciudades inteligentes, seguimiento de activos, hasta el mantenimiento predictivo.

Figura 2.3

Aplicaciones LoRaWAN.



Nota. Adaptado de (Kuan, 2024).

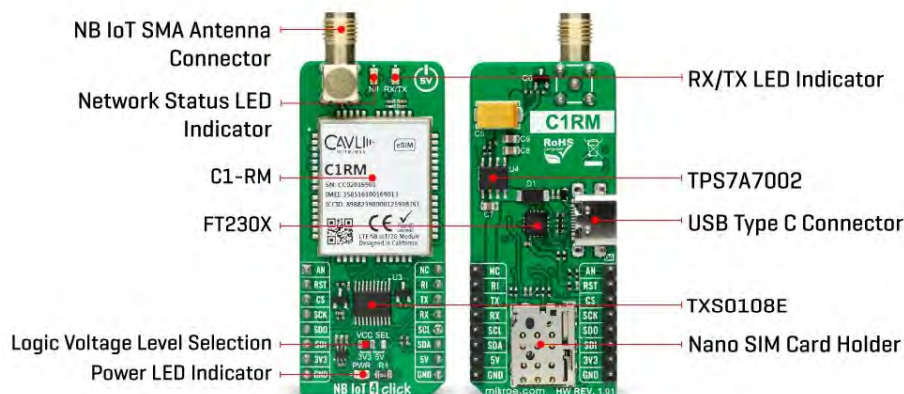
2.3.1.3. NB-IoT

NB-IoT (Narrowband-IoT) se basa en la infraestructura ya existente de las redes celulares para su funcionamiento, lo que permite un despliegue rápido y eficiente. La arquitectura de NB-IoT está diseñada para aprovechar las bandas de frecuencia licenciadas, operando en una banda estrecha de 200 kHz. Esto permite a los operadores de telecomunicaciones reutilizar las bandas LTE existentes, ya sea dentro de una portadora LTE, en los espacios entre portadoras o en bandas de espectro completamente independientes.

El tipo de comunicación utilizado es half-duplex, lo que significa que el intercambio de información se realiza de manera alterna mediante canales de uplink o downlink, sin la posibilidad de operar ambos canales simultáneamente. Sin embargo, esta limitación simplifica notablemente la arquitectura del hardware, reduciendo su complejidad y costo. De este modo, la estructura queda optimizada para ofrecer una conectividad eficiente y confiable, especialmente en entornos que demandan una cobertura profunda, como zonas rurales o el interior de edificios.

Figura 2.4

Mikroe NB IoT 4 Click.



Nota. Adaptado de (Mikroe, 2024).

2.3.2. Topologías de Red

La topología de red constituye la estructura organizativa fundamental de los elementos en una red de comunicaciones. Esta organización puede manifestarse tanto en el plano físico como en el lógico. En el contexto lógico, los dispositivos de comunicación se conceptualizan como nodos, mientras que las conexiones entre estos se represen-

tan como enlaces. Por otro lado, la topología física describe la disposición tangible de la infraestructura de red, incluyendo aspectos como distancias físicas, conexiones, materiales y características de transmisión.

2.3.3. Tipos Principales de Topologías

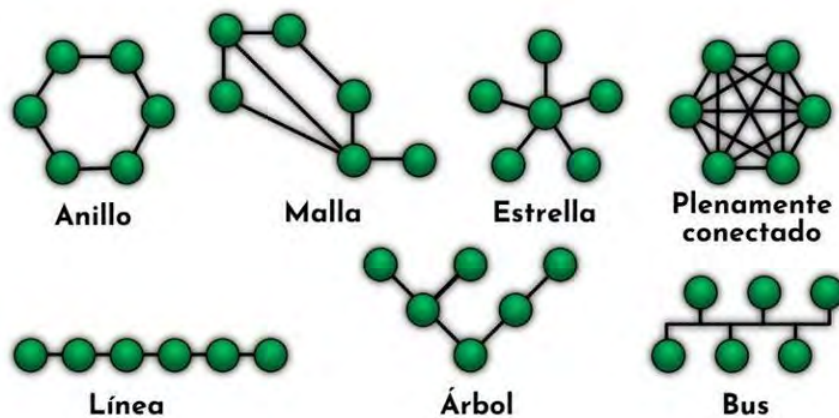
En la Figura 2.5 se describen las distintas topologías de red, en las cuales cada esfera verde podría representar un dispositivo o nodo de comunicación. Cada topología se define por la forma en que estos nodos se interconectan, lo cual está representado mediante líneas negras.

Por ejemplo, en la topología en estrella, existe un nodo central desde el cual se establecen conexiones directas hacia los nodos finales. En el contexto de una red IoT, estas topologías se implementan en el plano lógico, es decir, representan cómo se intercambia la información y qué rutas siguen los datos dentro de la red.

Entre las diversas topologías existentes, la más comúnmente utilizada en redes de sensores dentro del Internet de las Cosas (IoT) es la topología en estrella, debido a su simplicidad, facilidad de gestión y desempeño en el envío de datos hacia un nodo central.

Figura 2.5

Tipos de topologías de red.



Nota. Adaptado de (Sy Corvo, 2024).

2.4. Protocolo MQTT

El auge del Internet de las Cosas (IoT) ha generado la necesidad de interconectar dispositivos mediante Internet de forma eficiente, especialmente considerando

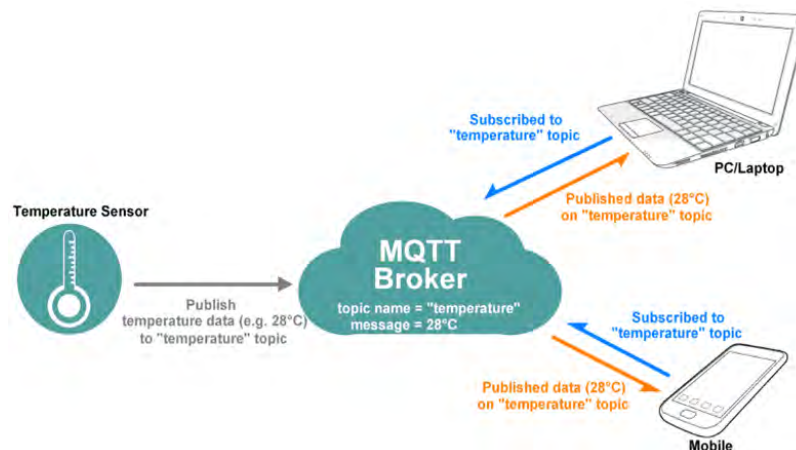
que muchos de estos dispositivos transmiten pequeñas cantidades de datos y operan en redes con recursos limitados. En este contexto, MQTT es un protocolo de comunicación liviano que resulta ideal para tecnologías con ancho de banda limitado, además de permitir la gestión eficiente de una gran cantidad de dispositivos simultáneamente. Este protocolo emplea una topología de tipo estrella, en la que todos los dispositivos se comunican a través de un broker central que actúa como intermediario entre los publicadores y los suscriptores. Una de sus características más destacadas es la implementación de distintos niveles de calidad de servicio (QoS), que hacen referencia a la confiabilidad en la entrega de los datos, permitiendo adaptarse a diferentes necesidades de robustez en la comunicación.

MQTT como modelo de comunicación utiliza el concepto publish-subscribe conformado por los siguientes elementos:

- Broker
- Clientes
- Topics
- Mensajes

La Figura 2.6 muestra el funcionamiento de la arquitectura MQTT, en la cual el componente central es el *broker*. Este se encarga de gestionar el intercambio de mensajes entre los publicadores y los suscriptores. El proceso ocurre de la siguiente manera: cuando un *subscriber* se suscribe a un *topic*, en este caso “temperatura”, el *broker* registra dicha solicitud. Posteriormente, cuando un *publisher* envía datos al mismo *topic*, el *broker* reenvía automáticamente la información al *subscriber* correspondiente.

Figura 2.6
Arquitectura del protocolo MQTT.



Nota. Adaptado de (Firtec, 2023).

2.4.1. Calidad de servicio MQTT

En la arquitectura de mensajes de MQTT, se define la Calidad de Servicio (*Quality of Service, QoS*), cuyo objetivo es garantizar la fiabilidad en la entrega de mensajes y gestionar el tráfico de datos en la red.

MQTT ofrece tres niveles de QoS:

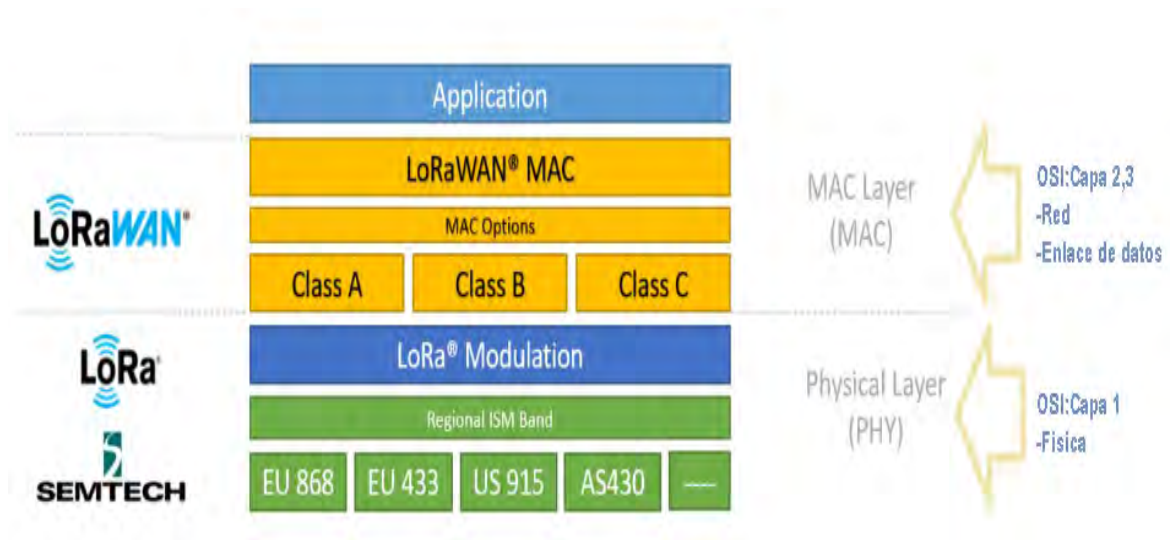
- **QoS 0** : El mensaje es enviado solo una vez, sin mecanismos de verificación o reintento, lo que implica que no se asegura su recepción por parte del suscriptor.
- **QoS 1** : En este caso, el mensaje es enviado por el publicador y se espera que el suscriptor confirme su recepción. Si no se recibe dicha confirmación, el mensaje es reenviado hasta que se obtenga una respuesta. Este mecanismo puede provocar que el suscriptor reciba mensajes duplicados debido a los reintentos realizados por el publicador.
- **QoS 2** : Este nivel asegura que el mensaje será recibido una única vez y sin duplicaciones. Se utiliza un proceso de intercambio de confirmaciones entre el emisor y el receptor, asegurando una entrega fiable. Es el nivel más seguro, pero también el que introduce mayor latencia y consumo de recursos.

2.5. Descripción general de LoRaWAN

Respaldo por la LoRa Alliance, LoRaWAN es un protocolo de red de código abierto que establece una estructura estandarizada para comunicaciones seguras y bidireccionales, ofreciendo soporte para movilidad y funciones de localización. Esta tecnología opera en la capa de red y emplea la modulación LoRa como capa física, lo que permite establecer conexiones de largo alcance entre los dispositivos.

Figura 2.7

Modelo OSI LoRaWAN.



Nota. Adaptado de (Semtech, 2020).

2.5.1. Lora

Originada bajo el desarrollo de la empresa francesa Cycleo y posteriormente integrada al portafolio de Semtech en el año 2012, la tecnología inalámbrica *LoRa* (*Long Range*) se clasifica dentro de las arquitecturas de red tipo *LPWAN*. Su diseño destaca por un sobresaliente rango de cobertura, logrando establecer enlaces de comunicación que alcanzan los 15 km en entornos rurales despejados y cubren hasta 4 km en áreas urbanas densas.

Su funcionamiento se basa en una técnica de modulación de espectro ensanchado que deriva de la Chirp Spread Spectrum (CSS), lo que le permite mantener un consumo energético reducido. LoRa constituye una tecnología patentada por Semtech y actúa en la capa física del modelo OSI, como se representa en la Figura 2.7.

Esta tecnología se caracteriza por su extenso rango de cobertura y su habilidad

para conjugar una óptima sensibilidad en la recepción con flujos de datos moderados. Para lograrlo, el sistema gestiona el canal de subida (*uplink*) mediante anchos de banda de 125 kHz o 500 kHz, mientras que el canal de bajada (*downlink*) opera de manera fija con un ancho de banda de 500 kHz.

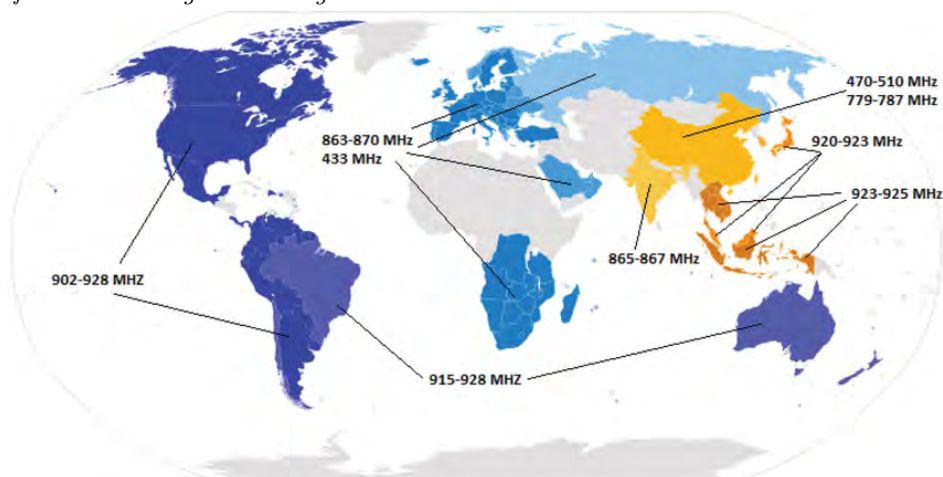
Por su naturaleza robusta frente a interferencias y su capacidad para cubrir grandes áreas, LoRa resulta especialmente valiosa en aplicaciones críticas, como aquellas del ámbito militar o aeroespacial. (Semtech, 2020)

■ Frecuencias

LoRa tiene como ventaja el uso de frecuencias disponibles alrededor del mundo, utilizando bandas ISM (Industrial, Scientific and Medical) de libre licencia.

Figura 2.8

Banda de frecuencias asignadas a regiones alrededor del mundo.



Nota. Adaptado de (Moheddine et al., 2022)

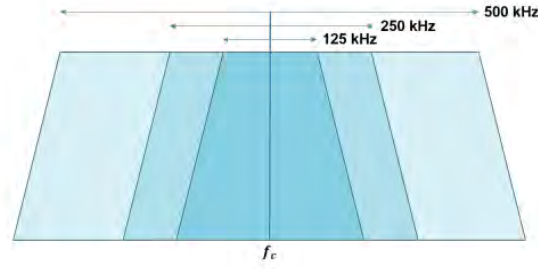
2.5.1.1. Parámetros de red LoRa

■ Ancho de banda (BW)

Se define como el rango de frecuencias que utiliza un canal de comunicación para transmitir datos. Se define por una frecuencia central y las frecuencias donde se concentra la energía de la señal.

LoRa utiliza anchos de banda de 125 kHz, 250 kHz y 500 kHz. En América opera en la banda ISM entre 915 y 928 MHz, que es de uso libre.

Figura 2.9
Ancho de banda LoRa.



Nota. Adaptado de (Noreen et al., 2017).

- Spreading Factor:

El Spreading Factor (SF) es un parámetro fundamental de la capa física de LoRa que determina el equilibrio entre la velocidad de transmisión de datos y el alcance de la comunicación. Este parámetro puede configurarse entre los valores 7 y 12, estableciendo una relación inversa entre la tasa de datos y la robustez de la señal.

Un SF elevado incrementa significativamente la resistencia frente al ruido y las interferencias, mejorando la capacidad de comunicación a largas distancias, pero a costa de reducir la velocidad de transmisión. Por el contrario, un SF bajo permite alcanzar mayores tasas de transmisión de datos, aunque con menor robustez y alcance limitado.

En la modulación LoRa, cada símbolo se construye mediante una serie de chirps, que consisten en rampas de frecuencia lineales distribuidas cíclicamente dentro del ancho de banda del canal. La duración de cada símbolo está directamente relacionada con el SF seleccionado y se calcula mediante la ecuación:

$$T_s = \frac{2^{\text{SF}}}{\text{BW}} \quad (\text{II.1})$$

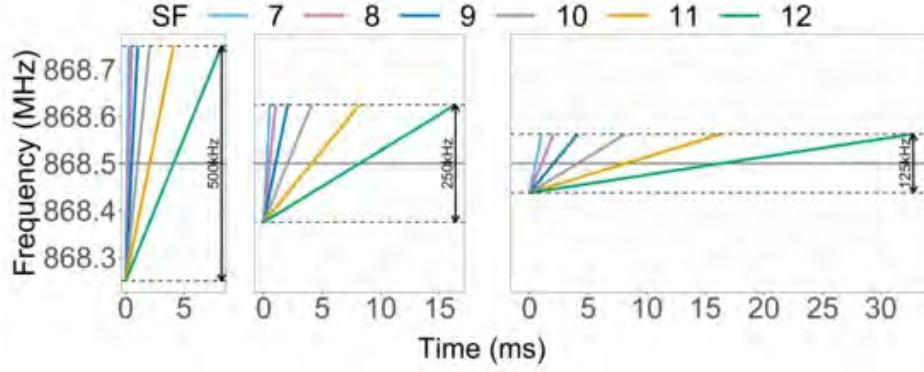
donde BW representa el ancho de banda disponible, que puede ser de 125, 250 o 500 kHz. Esta ecuación demuestra que a mayor SF, mayor será la duración del símbolo, lo que implica un tiempo de transmisión más prolongado para cada unidad de información.

El SF influye directamente en la tasa de transmisión de datos, como se observa en la ecuación II.2. Para aplicaciones que requieren alta velocidad de datos, se debe seleccionar un SF bajo, mientras que para aplicaciones que priorizan el alcance y la

confiabilidad se recomienda un SF alto. En la práctica, el ancho de banda generalmente se mantiene constante, por lo que la selección del SF se convierte en el factor determinante según los requisitos específicos de cada implementación IoT.

Figura 2.10

Comparación de la variación del SF (7-12) en función de diferentes anchos de banda (125, 250 y 500 kHz) en el canal de 868.5 MHz.



Nota. Adaptado de (Coutaud et al., 2021).

- Coding Rate(CR)

El Coding Rate (CR) es un parámetro clave dentro del protocolo Forward Error Correction (FEC), que se utiliza para mejorar la fiabilidad de las transmisiones de datos en entornos ruidosos o con interferencias. Su función principal es añadir bits de corrección de errores a los datos transmitidos, lo que permite al receptor detectar y corregir posibles errores sin la necesidad de solicitar retransmisiones.

- Data Rate (Rb)

La tasa de datos hace referencia a la cantidad de información efectiva que puede transmitirse mediante un canal de comunicación durante un tiempo específico. En tecnologías como LoRa, este parámetro es determinante, pues condiciona tanto la velocidad de transmisión como la solidez del enlace, siendo especialmente relevante en escenarios de largo alcance o en ambientes con interferencias.

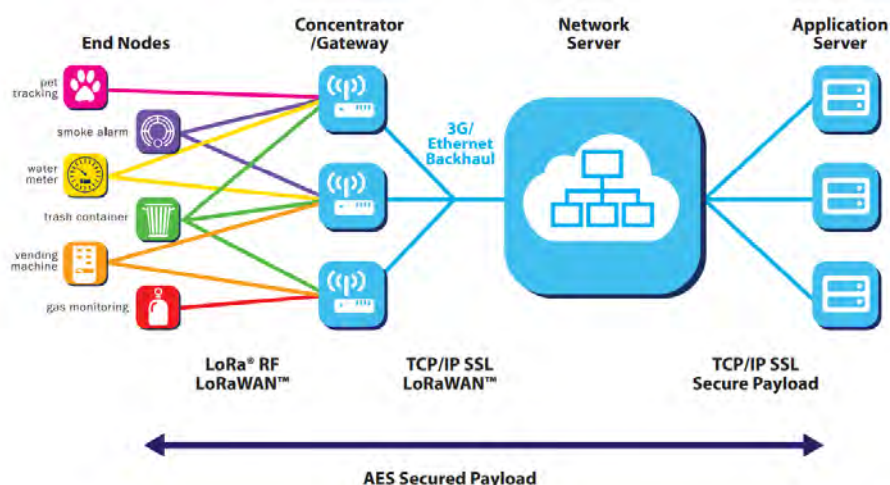
$$R_b = SF \times \left[\frac{4}{\frac{4+CR}{2^{SF}} \frac{BW}{BW}} \right] \times 1000 \quad (\text{II.2})$$

Tabla 2.2*Parámetros de configuración de LoRa.*

Símbolo	Descripción	Valores posibles
SF	Spreading Factor	7, 8, 9, 10, 11, 12
CR	Code Rate	1, 2, 3, 4
BW	Ancho de banda [kHz]	125, 250, 500
Rb	Tasa de datos	–

Nota. Elaboración propia.

2.5.2. Arquitectura red LoRaWAN

Figura 2.11*Arquitectura LoRaWAN.**Nota. Adaptado de (LoRa Alliance, 2015).*

La arquitectura LoRaWAN está compuesta por los siguientes elementos, como se muestra en la Figura 2.11, los cuales se describen a continuación:

- **Nodos:** Dispositivos que reciben y envían información con la ayuda de la red LoRaWAN.
- **Gateway:** Opera como intermediario entre los nodos y el servidor red.
- **Servidor red:** Procesa la información de los nodos. Además, se encarga de configurar la red y nodos.
- **Servidor de aplicación:** Su función es facilitar la interpretación de los datos mediante la visualización de la información procesada por la red.

2.5.3. Modos de operación de dispositivos LoRaWAN

2.5.4. Clases de dispositivos

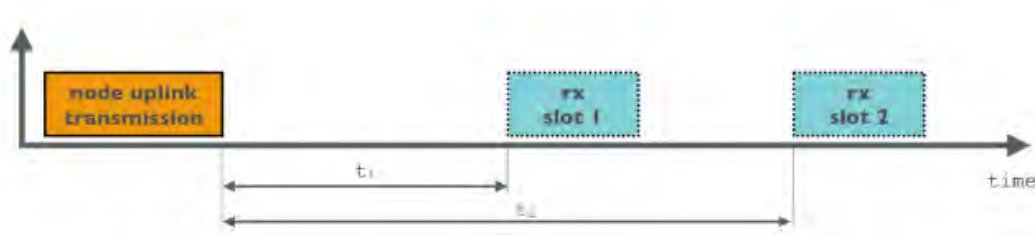
a) Clase A

Esta clase de dispositivos adopta el modo de comunicación de mensajes mostrado en la Figura 2.12. Cuando se envía un mensaje del tipo uplink y se completa, se abren dos ventanas de recepción con tiempos de retraso t_1 y t_2 , respectivamente. Existen casos en los que la primera o segunda ventana no se abre, ya que alguna de ellas ya procesó un mensaje del tipo downlink. Esto implica que los mensajes del tipo downlink solo se procesarán si se completa el envío de un mensaje del tipo uplink.

Debido a que la frecuencia de envío de mensajes se puede modificar libremente, estos dispositivos se pueden configurar en modo suspensión y activarse solo cuando se realice el envío del mensaje. Por lo tanto, su aplicación es ideal para dispositivos que usan baterías, ya que permite un ahorro de energía.

Figura 2.12

Clase A.

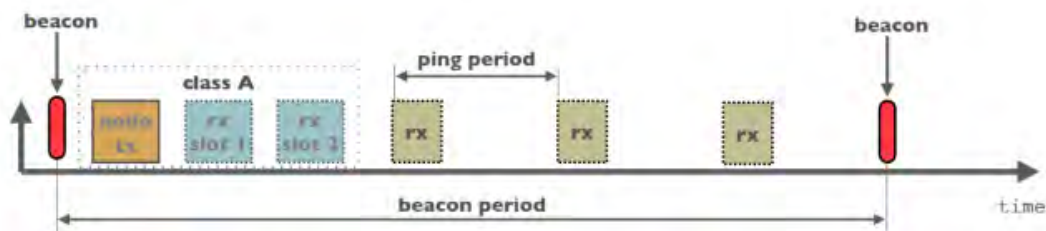


Nota. Adaptado de (Macías, 2020).

b) Clase B

Los dispositivos de Clase B funcionan de manera similar a los de Clase A, pero añaden ventanas de recepción periódicas. Esto significa que, además de las dos ventanas que se abren después de cada transmisión, el dispositivo dispone de momentos adicionales programados para recibir mensajes desde el servidor. De esta forma, el servidor puede enviar información sin depender únicamente de un mensaje uplink previo.

Figura 2.13
Clase B.

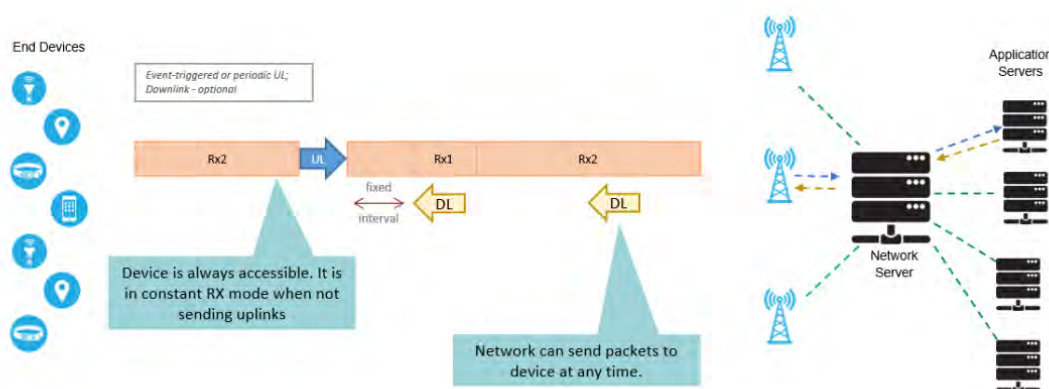


Nota. Adaptado de (Macías, 2020).

c) Clase C

Esta clase de dispositivos implementa dos ventanas de recepción similares a las de la clase A, con la diferencia de mantener siempre activa la ventana RX2. Esto permite que la red pueda enviar mensajes descendentes en cualquier momento, sin necesidad de que se produzca un mensaje uplink. Las ventanas de recepción solo se interrumpen cuando hay un mensaje uplink, para luego reabrirse nuevamente. Este proceso se describe en la Figura 2.14

Figura 2.14
Clase C.



Nota. Adaptado de (Semtech, 2020).

2.5.5. Métodos de activación

Al realizar el despliegue de los nodos, estos deberán ser registrados por el servidor de red. En este proceso de autenticación y registro, existen dos métodos, los cuales se detallan a continuación:

1. **Activation By Personalization (ABP):**

En el caso de ABP, generalmente el consumo de energía puede ser menor en comparación con OTAA, ya que no es necesario el intercambio de mensajes en tiempo real para obtener las claves de sesión. Esto resulta beneficioso para dispositivos con limitaciones de energía. En este método, las claves de cifrado se configuran manualmente en el dispositivo ABP consta de tres parámetros clave para la configuración del dispositivo:

- **DevAddr:** Dirección del nodo final, única para identificar cada dispositivo en la red.
- **NetworkSessionKey:** Clave de encriptación que asegura la comunicación entre el nodo y el servidor de red.
- **ApplicationSessionKey:** Es una clave que se utiliza para cifrar y proteger los datos transmitidos entre el nodo y el servidor de aplicación.

2. **Over The Air Activation (OTAA):**

Al igual que ABP, OTAA también tiene tres parámetros de configuración, pero con un enfoque dinámico de activación que implica la negociación de claves entre el nodo y el servidor de red. Este proceso es más seguro debido a la actualización continua de las claves. Los parámetros de configuración de OTAA son:

- **DevEUI:** Identificador único de 64 bits para el dispositivo final.
- **AppEUI:** Identificador único de la aplicación que se conecta a la red.
- **AppKey:** Clave secreta AES utilizada para asegurar la autenticidad durante el proceso de activación.

2.6. Material particulado

El material particulado se encuentra suspendido en la atmósfera y puede generarse de manera natural, por ejemplo, cuando el viento levanta polvo y otras partículas del suelo, o de forma antropogénica, a través de emisiones vehiculares, procesos industriales (como cementeras, fundiciones y plantas metalúrgicas) y chimeneas (Suárez Salas et al., 2017).

Dado que el material particulado puede tener múltiples fuentes, su composición química es altamente variable; entre sus componentes se encuentran sulfatos, nitratos y amonio, entre otros. Su tamaño también varía considerablemente, pero para su estudio, las partículas se consideran esferas uniformes, tomando su diámetro como representativo de su tamaño. Con base en esto, las partículas suspendidas se clasifican según su diámetro en dos fracciones principales: aquellas con tamaño menor o igual a $2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) y aquellas con tamaño menor o igual a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}).

En mediciones de calidad del aire, se utiliza la unidad $\mu\text{g}/\text{m}^3$, que indica la cantidad de microgramos de partículas presentes en un metro cúbico de aire. Por ejemplo, si se registra una concentración de $\text{PM}_{2.5}$ de $10\ \mu\text{g}/\text{m}^3$, significa que en cada metro cúbico de aire hay 10 microgramos de partículas con diámetro igual o inferior a $2.5\ \mu\text{m}$.

Figura 2.15

Comparación del tamaño relativo de las partículas $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} respecto al grosor de un cabello humano.



Nota. Adaptado de (Admin-Ogreen, 2023).

2.7. Clasificación del material particulado

La clasificación del material particulado se basa en tres procesos: formación, fuente de generación y tamaño.

2.7.1. Proceso de formación

1. **Primaria:** Se liberan directamente a la atmósfera desde una fuente y tienen como característica que no experimentan cambios significativos en su composición química o física una vez liberadas al aire. Por ejemplo, humo de escape de vehículos, emisiones industriales y emisiones de combustión residencial.
2. **Secundario:** Esta fracción se genera directamente en la masa atmosférica mediante interacciones químicas de gases precursores. Sustancias como el dióxido de azufre (SO_2), los óxidos de nitrógeno (NO_x) y el amoníaco (NH_3) reaccionan entre sí para dar origen a nuevos elementos en fase líquida o sólida, entre los que destacan los aerosoles de amonio, sulfatos, nitratos y diversas uniones orgánicas.

2.7.2. Según el tipo de fuente generadora

Esta clasificación surge debido a la existencia de diversas fuentes de generación de partículas, cuya composición química y propiedades físicas están, en parte, determinadas por el entorno en el que se originan. Por ello, el material particulado se clasifica en dos tipos:

- a) **Naturales:** Este tipo de fuente se caracteriza por no estar influenciada, de manera directa ni indirecta, por actividades humanas. Entre los ejemplos más representativos se encuentran las erupciones volcánicas, la actividad geotérmica y la resuspensión atmosférica causada por corrientes de viento.
- b) **Antropogénicas:** Fuentes originadas por actividades humanas, tales como los procesos industriales de extracción y transformación, la combustión de combustibles fósiles, así como el transporte y la circulación vehicular.

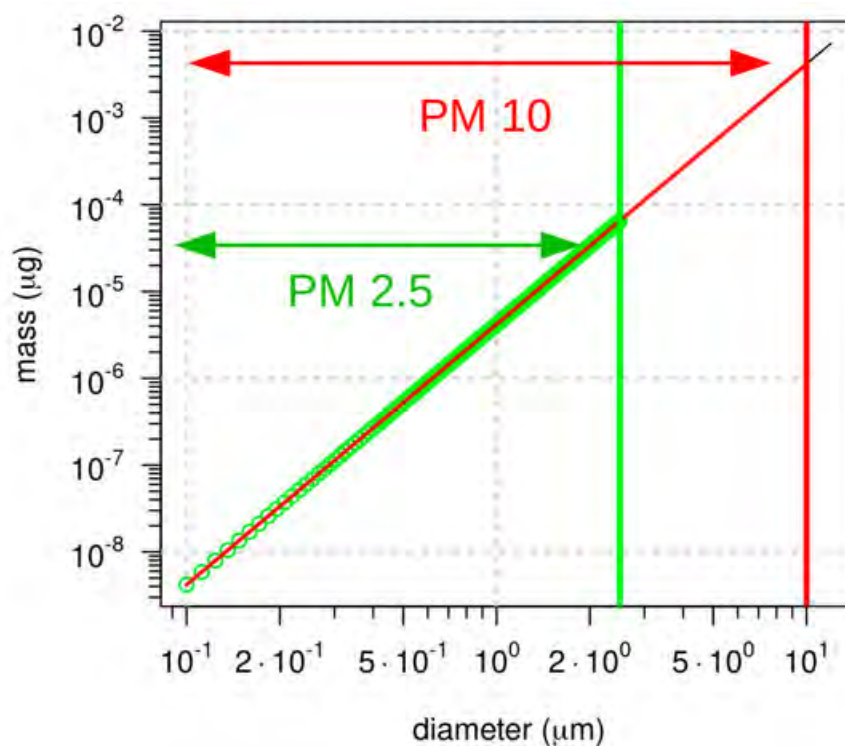
2.7.3. El tamaño de partícula

Las partículas en suspensión se modelan como esferas regulares, cuyo tamaño se determina a partir de su diámetro. En el estudio de la contaminación del aire, la

medición se realiza considerando la concentración de partículas por metro cúbico de aire en función de su tamaño. Entre las más relevantes se encuentran las partículas con diámetros menores a $10\ \mu\text{m}$ (PM_{10}) y $2.5\ \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$), como se muestra en la Figura 2.16.

Figura 2.16

Masa de partícula vs. diámetro para las dos clases de partículas ($\text{PM}_{2.5}$ (verde) y PM_{10} (rojo)) en una escala logarítmica.



Nota. Adaptado de (Alfano et al., 2020)

Tabla 2.3

Clasificación del material particulado según su diámetro aerodinámico

Clasificación	Diámetro Aerodinámico (μm)	Descripción
PM_{10}	≤ 10	Partículas gruesas
$\text{PM}_{2.5}$	$\leq 2,5$	Partículas finas

Nota. Elaboración propia.

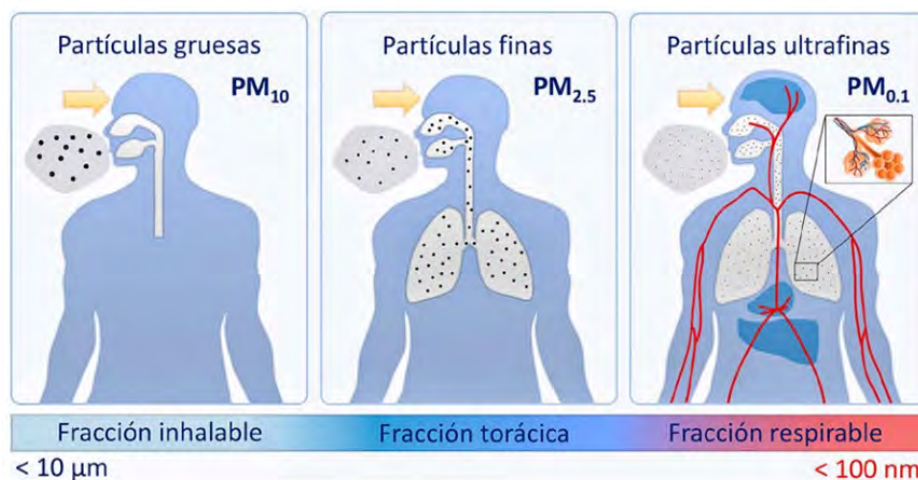
2.8. Distribución del material particulado en el sistema respiratorio

La distribución del material particulado dependerá del tamaño de la partícula, ya que este factor determina el grado de penetración en el organismo humano. El principal medio de ingreso es el sistema respiratorio, cuya función esencial es garantizar el suministro de oxígeno a la sangre. En ambientes con presencia de partículas tóxicas, estas pueden incorporarse al organismo durante el proceso respiratorio que ocurre en los alvéolos, donde se lleva a cabo la difusión de gases hacia y desde la sangre. Al atravesar la membrana alveolo-capilar, las partículas logran ingresar al torrente sanguíneo y, posteriormente, ser transportadas a órganos como el cerebro.

Estudios han demostrado la presencia de partículas finas en el líquido cefalorraquídeo de pacientes con trastornos neurológicos, lo cual sugiere su capacidad para penetrar el sistema nervioso central. La Figura 2.17 representa el grado de infiltración de las partículas a los sistemas respiratorio, sanguíneo y nervioso central.(Qi et al., 2022)

De acuerdo con la región del sistema respiratorio donde se depositen, estas partículas se dividen en tres categorías principales.

- a) **Fracción inhalable.** - Ingresan a la nariz y la boca durante el proceso de respiración normal y se depositan en el tracto respiratorio.
- b) **Fracción torácica.** - Ingresan más allá de la laringe, llegando a depositarse en los pulmones.
- c) **Fracción respirable.** - Ingresan a lo profundo del sistema respiratorio llegando a los bronquiolos, regiones alveolares del pulmón y posteriormente ingresando al torrente sanguíneo.

Figura 2.17*Grado de infiltración de partículas.**Nota. Adaptado de (Bustamante and Ortega-Rosas, 2024).*

2.9. Impacto a la salud a causa del material particulado

La contaminación atmosférica se reconoce hoy en día como una de las mayores amenazas para la salud pública a escala global. Esta problemática se respalda en informes de la Organización Mundial de la Salud (OMS), los cuales señalan que alrededor del 90 % de la población mundial respira aire con niveles de polución superiores a los valores considerados seguros para preservar una vida saludable.

En cuanto al material particulado, este se clasifica principalmente en dos grupos de acuerdo con su tamaño, lo que determina su nivel de riesgo para la salud humana. Las partículas PM₁₀ suelen alojarse en el sistema respiratorio, afectando en particular a los pulmones. Por otro lado, las partículas PM_{2.5}, al ser más pequeñas, representan un peligro mayor, ya que pueden atravesar la barrera pulmonar y llegar al torrente sanguíneo, generando consecuencias más graves para el organismo.

Las investigaciones científicas han documentado una amplia gama de efectos adversos provocados por la exposición a material particulado. En el corto plazo, la exposición a PM_{2.5} puede desencadenar efectos tóxicos en los sistemas cardiovascular y cerebrovascular, provocando complicaciones como trombosis y agravamiento de la insuficiencia cardíaca, especialmente en personas vulnerables. Los estudios han demostrado que la exposición a PM_{2.5} y PM₁₀ está relacionada con un incremento en la mortalidad por infarto al miocardio del 4,14 % y 2,67 % respectivamente. (Felipe Brito et al., 2022)

El impacto de sostener una exposición constante a elevadas concentraciones de

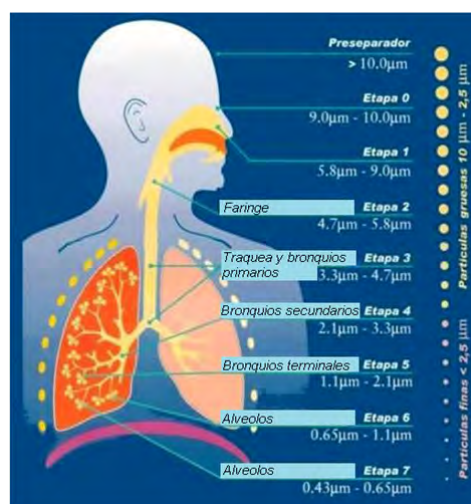
contaminantes ambientales conlleva repercusiones críticas para la salud pública. Este escenario no solo eleva las tasas de morbilidad y los índices de letalidad general, sino que reduce de forma directa la expectativa de vida en la sociedad. Dentro de este contexto, los grupos que ya padecen enfermedades previas representan la población de mayor riesgo, destacando los pacientes diagnosticados con:

- Enfermedad pulmonar obstructiva crónica
- Afecciones cerebrovasculares
- Enfermedades cardíacas
- Cáncer de pulmón

La gravedad de esta situación se ve respaldada por la clasificación de la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC), que ha catalogado el material particulado como una sustancia con potencial cancerígeno para los seres humanos. Los estudios epidemiológicos han establecido una clara correlación entre el contacto prolongado a $PM_{2.5}$ y PM_{10} y el desarrollo de cáncer pulmonar, siendo el $PM_{2.5}$ el que presenta mayor riesgo de mortalidad por esta enfermedad. (Loomis et al., 2014)

Figura 2.18

Representación de la deposición del material particulado de acuerdo al diámetro aerodinámico en el sistema respiratorio.



Nota. Adaptado de (Sebastián, 2016).

2.10. Clasificación de la calidad del aire

2.10.1. Índice de la calidad del aire según normativas peruanas

Esta clasificación se establece con el fin de evaluar el nivel de polución del aire. La clasificación se muestra en la Tabla 2.4, donde, para asignar un valor, se evalúa el intervalo de concentración en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se le asigna un color correspondiente a su categoría de calidad: buena, moderada, mala o umbral de cuidado.

Por ejemplo, si la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ es de $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la calidad del aire se encuentra en la categoría “Moderada”. Esto significa que en cada metro cúbico de aire hay 22 microgramos de partículas con diámetro igual o menor a $2.5 \mu\text{m}$.

Tabla 2.4

Clasificación de la concentración de material particulado $\text{PM}_{2.5}$

Material particulado ($\text{PM}_{2.5}$) promedio 24 horas			
Índice	Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ecuación
Buena	0–50	0–12.5	$I(\text{PM}_{2.5}) = \frac{[\text{PM}_{2.5}] \times 100}{25}$
Moderada	51–100	12.6–25.0	
Mala	101–500	25.1–125.0	
Umbral de cuidado	>500	>125.0	

Nota. Adaptado de (Ministerio del Ambiente, 2016).

2.10.2. Calidad del aire según las directrices mundiales de la Organización Mundial de la Salud

Diversas investigaciones coordinadas por la OMS han evaluado los efectos del material particulado fino ($\text{PM}_{2.5}$) sobre la salud, distinguiendo entre exposición a corto plazo (horas y promedios de 24 horas) y a largo plazo (meses y años). En este análisis se ha identificado una relación consistente entre las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y la aparición de enfermedades y muertes de origen cardiovascular, respiratorio y por cáncer de pulmón. En particular, las directrices mundiales de calidad del aire recomiendan un valor guía anual de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $\text{PM}_{2.5}$; concentraciones por encima de este nivel se asocian con un aumento del riesgo de mortalidad por estas causas, por lo que se

enfatisa la necesidad de reducir de forma sostenida la exposición poblacional a este contaminante.(World Health Organization, 2021)

Tabla 2.5

Desenlaces de salud asociados a la exposición a $PM_{2.5}$ por encima de $5\mu g/m^3$.

Enfermedad / desenlace	Tipo de exposición	Descripción del efecto
Mortalidad cardiovascular	Largo plazo	Mayor riesgo de muerte por enfermedades del corazón y del sistema circulatorio.
Mortalidad respiratoria no maligna	Largo plazo	Mayor riesgo de muerte por enfermedades respiratorias crónicas y agudas no cancerosas.
Mortalidad por cáncer de pulmón	Largo plazo	Aumento del riesgo de muerte por cáncer de pulmón.
Mortalidad cardiovascular diaria	Corto plazo	Más muertes por causas cardiovasculares en días con picos de $PM_{2.5}$.
Mortalidad respiratoria diaria	Corto plazo	Más muertes por causas respiratorias en días con picos de $PM_{2.5}$.
Mortalidad cerebrovascular diaria	Corto plazo	Mayor riesgo de muerte por eventos cerebrovasculares (por ejemplo, ictus) en días contaminados.

Nota: Elaboración propia a partir de las Guías Mundiales de la OMS sobre la calidad del aire (2021).

Tabla 2.6

Niveles guía AQG para $PM_{2.5}$ y PM_{10}

Contaminante	Tiempo promedio	Nivel de referencia de calidad del aire ($\mu g/m^3$)
$PM_{2.5}$	Anual	5
$PM_{2.5}$	24 horas	15
PM_{10}	Anual	15
PM_{10}	24 horas	45

Notas: (a) Datos basados en las Guías Mundiales de la OMS sobre la calidad del aire (2021)(World Health Organization, 2021). (b) Para los promedios de 24 horas, los valores corresponden al percentil 99, es decir, aproximadamente 3–4 días de superación por año.

2.11. Métodos de medición de material particulado

2.11.1. Método de referencia federal

2.11.1.1. Método gravimétrico

El método gravimétrico es una técnica de referencia ampliamente utilizada para medir material particulado en el aire. Su principio se basa en determinar la diferencia de masa de un filtro antes y después de la exposición al flujo de aire. El procedimiento consiste en pesar el filtro limpio en condiciones controladas de laboratorio, luego colocarlo en el equipo muestreador durante un período determinado, comúnmente 24 horas. Durante este tiempo, el equipo succiona aire a través del filtro mediante vacío, reteniendo las partículas presentes en la atmósfera. Finalizado el muestreo, se retira el filtro y se vuelve a pesar en laboratorio. La diferencia de masa entre el filtro limpio y el filtro expuesto corresponde a la cantidad de partículas colectadas. Al dividir esta masa entre el volumen total de aire muestreado, se obtiene la concentración de material particulado expresada en $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

La concentración de partículas se determina mediante la siguiente expresión:

$$C = \frac{W_f - W_i}{V} \quad (\text{II.3})$$

donde:

- W_i : masa inicial del filtro (mg),
- W_f : masa final del filtro (mg),
- V : volumen total de aire muestreado (m^3),
- C : concentración de material particulado ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

El método gravimétrico contempla una serie de etapas secuenciales que se detallan a continuación:

1. Preparación y acondicionamiento de los filtros.
2. Pesado inicial de los filtros limpios en una balanza de precisión.

3. Colocación del filtro en el equipo muestreador.
4. Exposición del filtro durante el periodo de muestreo (24 horas).
5. Extracción del filtro y transporte en condiciones controladas.
6. Almacenamiento de los filtros en desecadores para su estabilización.
7. Acondicionamiento en laboratorio y pesado final de los filtros expuestos.

2.11.1.2. Equipo Impactador Harvard

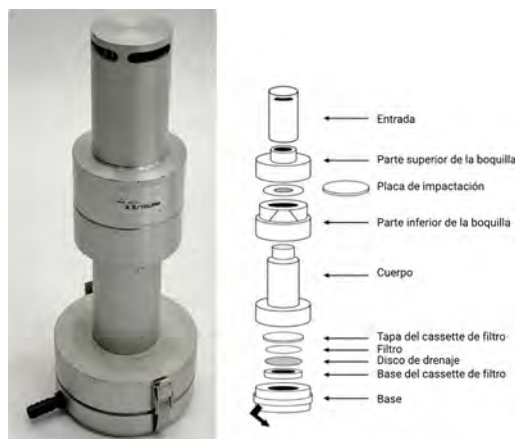
Es un equipo que emplea el método gravimétrico para determinar la concentración de material particulado. La Figura 2.19 presenta el esquema general del impactador Harvard, donde se identifican sus principales componentes. Entre ellos, destaca la ubicación del filtro, ya que es el elemento donde se deposita el material particulado recolectado durante el muestreo; este se encuentra en la base del equipo.

Asimismo, la Figura 2.20 muestra la abertura del impactador Harvard destinada a la colocación del filtro, lo que permite su correcta instalación y posterior retiro para el análisis gravimétrico correspondiente.

Adicionalmente, el sistema de muestreo se realiza en intervalos de 24 horas. Para ello, el equipo dispone de un temporizador eléctrico que controla la activación y desactivación de la bomba de vacío. Generalmente, la bomba opera de manera continua durante todo el periodo de 24 horas, asegurando así la recolección representativa del material particulado.

Figura 2.19

Esquema general del Impactador Harvard.



Nota. Adaptado de (Akbulut et al., 2013).

Figura 2.20

Base del impactador Harvard.



Nota. Adaptado de (Akbulut et al., 2013).

Figura 2.21

Filtros de disco de membrana de PTFE.



Nota. Adaptado de (Omega Peru S.A., 2021).

Figura 2.22

Porta filtro.



Nota. Adaptado de (Ruiz Abad, 2018)

Figura 2.23
Balanza analítica.



Nota. Adaptado de (Ruiz Abad, 2018)

Figura 2.24
Ubicación del Impactador Harvard en la estación de medición.



Nota. Elaboración propia.

Figura 2.25

Estación de medición de material particulado PM_{10} .



Nota. Elaboración propia.

Figura 2.26

Interior del gabinete del muestreador de bajo volumen tipo Harvard, mostrando la bomba de vacío y conexiones internas.



Nota. Elaboración propia.

2.11.2. Métodos equivalentes federales

2.11.2.1. Atenuación de rayos beta

Para la cuantificación continua de la concentración de masa de $\text{PM}_{2.5}$, el monitor automatizado BAM 1022 emplea un principio basado en la recolección de muestras horarias sobre una cinta de filtro compuesta por fibra de vidrio. Este dispositivo destaca por su capacidad de registrar de forma constante la carga de material particulado suspendido en el aire ambiental mediante un sistema de almacenamiento digital diseñado para evaluar la estabilidad de las mediciones.

El principio operativo de este instrumento se fundamenta en el uso de carbono-14 (^{14}C) como fuente emisora de electrones o rayos beta de alta energía. Inicialmente, una bomba de vacío succiona el aire exterior, provocando que las partículas suspendidas se depositen sobre el sustrato de fibra de vidrio.

Posteriormente, esta muestra recolectada es irradiada por la fuente beta, lo que genera una atenuación en la señal debido a la interferencia física de la masa acumulada. Finalmente, el sistema procesa dicha señal para determinar con precisión la cantidad de material particulado retenido entre el emisor de radiación y el detector, calculando de este modo la concentración final en el aire.

Figura 2.27

Analizador de masa por radiación beta BAM-1022 .



Nota. Adaptado de (Met One Instruments, Inc. and Intecon, 2023).

2.11.2.2. Monitoreo por microbalanza de elemento cónico oscilante

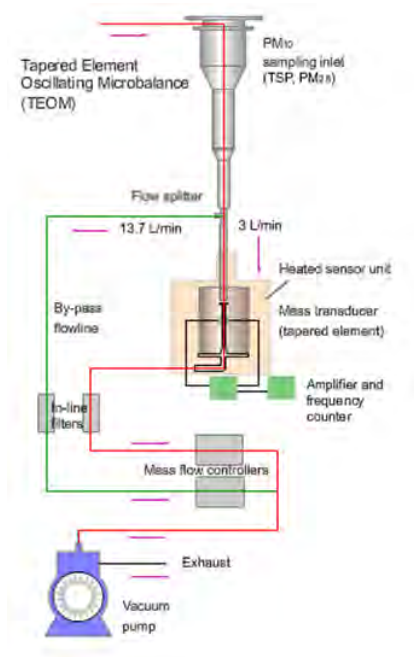
Este método de cuantificación de material particulado atmosférico se fundamenta en el principio de transducción de masa mediante el comportamiento mecánico de una microbalanza oscilante automatizada.

El núcleo operativo de este instrumento consta de un elemento hueco en forma de cono que vibra a su frecuencia natural de resonancia. En la sección superior del dispositivo, el aire exterior ingresa a través de un sistema de acondicionamiento equipado con un cabezal de muestreo selectivo. Este mecanismo actúa como un filtro físico que segrega las partículas según su diámetro aerodinámico, permitiendo aislar el rango de estudio requerido (como $PM_{2.5}$ o PM_{10}) y restringiendo el paso de elementos fuera de la especificación.

Tras este proceso de clasificación volumétrica, el flujo de aire se dirige hacia un sustrato filtrante directamente acoplado al extremo del elemento oscilante, donde se depositan las partículas. A medida que la masa recolectada se incrementa, la inercia del sistema aumenta, provocando un descenso medible en la frecuencia de vibración del cono. Debido a que el cambio en la frecuencia es inversamente proporcional a la masa acumulada, el procesador interno calcula continuamente la concentración exacta de material particulado presente en el volumen de aire aspirado.

Figura 2.28

Esquema operativo del instrumento de microbalanza de elemento oscilante cónico.



Nota. Adaptado de (Muñoz, 2020).

2.11.2.3. Dispersión de la luz

Este tipo de instrumentos utiliza el fenómeno de dispersión de la luz, mediante el cual los contadores ópticos de partículas (OPC) detectan y cuantifican las partículas presentes en el aire. Un haz de luz se dirige hacia el volumen donde se encuentran las partículas; al atravesarlo, estas dispersan la luz incidente en diferentes direcciones.

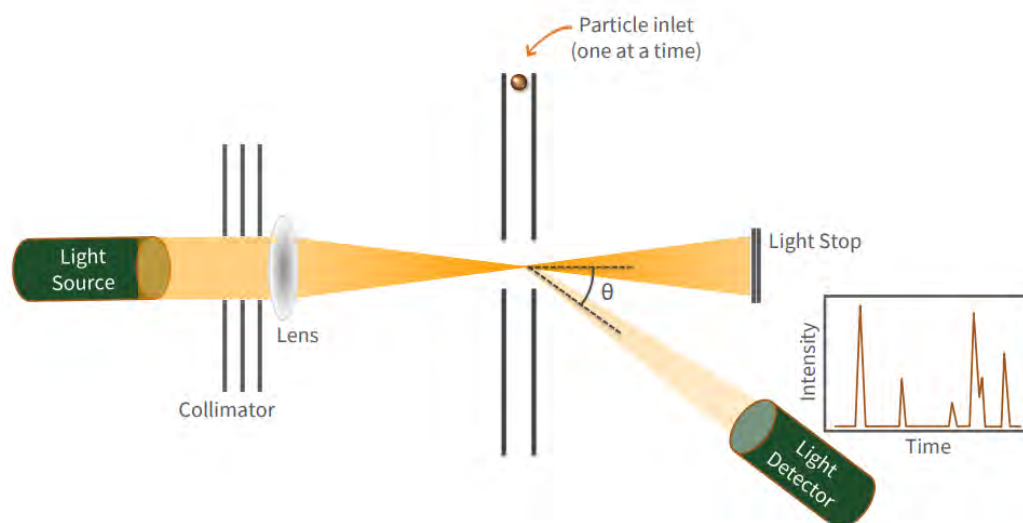
La intensidad de la luz dispersada y el ángulo en el que es detectada por el sensor óptico (fotodetector) se ilustran en la Figura 2.29. Esta dispersión se relaciona directamente con el tamaño de las partículas, ya que partículas de mayor tamaño dispersan una mayor cantidad de luz. A partir de la distribución de tamaños obtenida y del número de partículas contadas en cada rango, se estima posteriormente la concentración de material particulado.

Además, el equipo posee una trampa de luz (light stop). Su función es evitar que el haz de luz, al chocar contra las paredes internas de la cámara, se refleje y llegue al detector, lo que podría generar una señal falsa e interpretar erróneamente una mayor concentración de partículas.

La trampa de luz garantiza que la señal registrada por el detector provenga únicamente de la luz realmente dispersada por las partículas, mejorando así la precisión y confiabilidad de la medición.

Figura 2.29

Principio de medición contador óptico de partículas.



Nota. Adaptado de (Tryner, 2023).

2.11.2.4. Equipo Aeroqual Dust Sentry

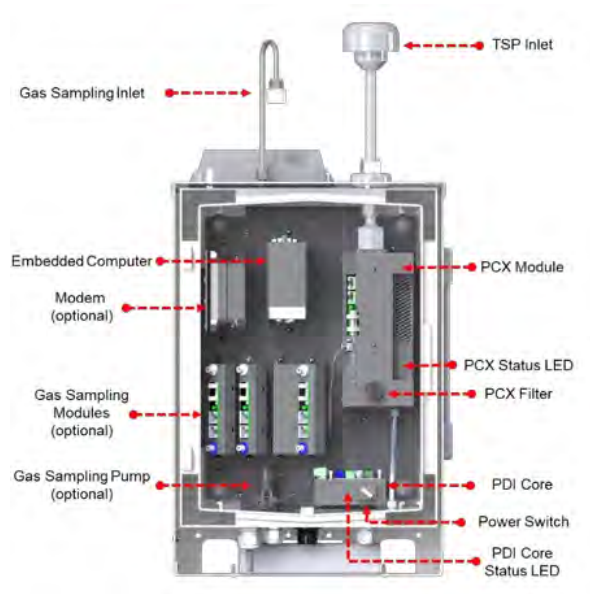
El Dust Sentry PCX es un equipo contador óptico de partículas diseñado para medir de forma continua múltiples fracciones de masa de material particulado en el aire. El sistema incorpora un cabezal de entrada denominado "TSP Inlet" (Total Suspended Particles), el cual permite la captación de la totalidad de las partículas en suspensión.

El módulo PCX se encarga de mantener un flujo de muestreo constante de 1 L/min, asegurando condiciones estables y representativas durante el proceso de medición. Para realizar el análisis, el equipo integra un contador óptico de partículas basado en el principio de dispersión de luz, mediante el cual cada partícula que atraviesa el haz luminoso dispersa una cantidad de luz proporcional a su tamaño.

La señal de luz dispersada es transformada en un pulso eléctrico cuyo voltaje está calibrado en función del diámetro de la partícula. De esta manera, según la amplitud del pulso generado, las partículas se clasifican por tamaño y se distribuyen en los canales de conteo disponibles en el equipo.

Figura 2.30

Partes del equipo Dust Sentry PCX.



Nota. Adaptado de (Taylor et al., 2024).

Figura 2.31
Equipo Dust Sentry PCX.



Nota. Adaptado de (Taylor et al., 2024).

Tabla 2.7
Especificaciones del módulo Dust Sentry PCX.

Característica	Valor	Unidad
Módulo de partículas	PCX1 (contador óptico de partículas)	–
Tamaños de partículas	PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₄ , PM ₁₀ , TSP	–
Rango	0–30 000	μg/m ³
Resolución	0.1	μg/m ³
LDL (2σ)	0.1	μg/m ³
Precisión	±3	% de la lectura
Exactitud	<5	% de la lectura
Estabilidad en cero	±0.1	μg/m ³ (24 h)

Nota. Elaboración propia basada en las especificaciones técnicas del fabricante.

2.12. Sensores de medición de calidad del aire de bajo costo

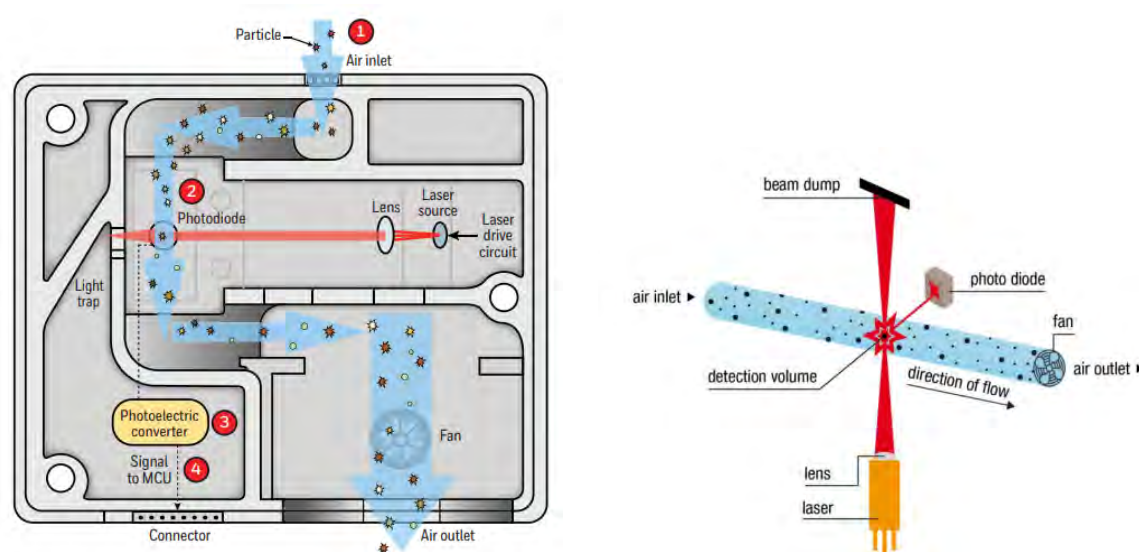
Los sensores de material particulado de bajo costo basan su funcionamiento en el principio de dispersión de la luz (light scattering), caracterizándose por su tamaño compacto, bajo consumo energético y alta viabilidad para aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT). El proceso comienza cuando un ventilador interno genera un flujo de aire constante que introduce las partículas ambientales hacia una cámara de medición, donde son atravesadas transversalmente por el haz emitido por un diodo láser. Al interactuar con este haz, las partículas dispersan la luz, y un fotodiodo (photodetector)

capta la luz dispersada, convirtiéndola en una señal eléctrica. La amplitud y la duración de esta señal permiten estimar el tamaño y la concentración de las partículas en suspensión (Keyes et al., 2023).

En este mecanismo, la trampa de luz (light trap o beam dump) desempeña un papel fundamental al absorber el haz láser que no ha sido dispersado por las partículas y minimizar las reflexiones internas dentro de la cámara óptica. De este modo, se evita la saturación del fotodiodo y se reduce el ruido de fondo, previniendo lecturas erróneas y mejorando la precisión y confiabilidad de las mediciones.

Figura 2.32

Funcionamiento interno de los sensores Honeywell y Sensirion.



(a) Sensor Honeywell.

(b) Sensor Sensirion.

Nota. Adaptado de (Honeywell Sensing, 2020; Sensirion, 2021).

En la Figura 2.32 se presenta una comparativa del funcionamiento interno de los sensores Honeywell y Sensirion. A pesar de sus diferencias de diseño estructural, ambas tecnologías comparten el mismo principio de funcionamiento operativo.

2.13. Tipología de las estaciones de monitoreo

2.13.1. Clasificación de estaciones por características del entorno

La categorización de las estaciones de monitoreo ambiental puede establecerse en función del entorno en el que se ubican. Esta clasificación considera principalmente la densidad y el tipo de edificaciones presentes en la zona. Se distinguen tres tipos principales de áreas:

- Urbana: Corresponde a zonas densamente pobladas, caracterizadas por una alta concentración de edificaciones, infraestructuras y servicios urbanos. Generalmente, incluyen ciudades, centros urbanos y asentamientos donde la actividad humana es intensa.
- Suburbana: Comprende regiones parcialmente urbanizadas, en las que coexisten sectores contruidos con espacios no desarrollados, como zonas agrícolas, cuerpos de agua, áreas boscosas o grandes superficies verdes.
- Rural: Incluye todas aquellas zonas que no cumplen con las características propias de las áreas urbanas ni suburbanas. Se trata de espacios con baja densidad poblacional y escasa o nula urbanización.

2.13.2. Clasificación según las fuentes de emisiones dominantes

La clasificación de las estaciones de medición depende de su ubicación dentro de un área y del tipo de fuentes emisoras que ejercen mayor influencia sobre ellas. Según estas características, las estaciones se dividen en cuatro tipos principales:

Tabla 2.8
Tipos de estaciones de medición de calidad del aire.

Tipo de estación	Descripción
Tráfico	Ubicada en zonas donde las emisiones del tránsito vehicular representan la principal fuente de contaminación.
Punto crítico	Estación instalada a nivel del suelo, utilizada para estudios epidemiológicos relacionados con la exposición directa de la población a contaminantes.
Industrial	Se encuentra en áreas cercanas a fuentes industriales, donde estas representan la influencia predominante sobre la calidad del aire.
De fondo	Estaciones influenciadas por la dispersión de contaminantes con la ayuda de los vientos.

Nota. Adaptado de (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2024).

2.13.3. Clasificación de estaciones según su escala

Su clasificación está definida por el área que cubre, como se observa en la Tabla 2.9, iniciando con una escala micro que abarca de 10 a 100 m².

Tabla 2.9*Escalas de monitoreo y áreas correspondientes.*

Escala	Área
Micro	10 - 100 m ²
Media	100 m ² - 0.5 km ²
Local	0.5 - 4 km ²
Urbana	4 - 100 km ²
Regional	100 - 1,000 km ²
Nacional	>1,000 km ²

Nota. Adaptado de (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2024)

2.14. Determinación de contaminantes atmosféricos prioritarios

El propósito de esta sección es identificar los contaminantes más relevantes para un monitoreo efectivo de la calidad del aire. No es necesario medir todos los posibles contaminantes, ya que esto implicaría costos elevados y un uso ineficiente de recursos.

El Ministerio del Ambiente (MINAM) establece prioridades de medición en función de las fuentes de contaminación y las características de cada área. En zonas urbanas con intenso tráfico vehicular y vías pavimentadas, se considera especialmente importante el monitoreo de PM_{2.5}, debido a que estas partículas finas se generan principalmente por la combustión de combustibles fósiles y tienen un alto impacto sobre la salud humana. Por esta razón, junto con otros contaminantes asociados a emisiones vehiculares, PM_{2.5} es uno de los parámetros clave para evaluar la calidad del aire en entornos urbanos.

Tabla 2.10*Contaminantes a priorizar según las fuentes vinculadas.*

Fuentes vinculadas	Parámetros a priorizar
Parque automotor, vías pavimentadas y zonas urbanas	PM ₁₀ , PM _{2.5} , SO ₂ , NO ₂ , CO, C ₆ H ₆ y O ₃

Nota. Adaptado de (Ministerio del Ambiente, 2019).

2.15. Criterio para la colocación de las estaciones de medición

La ubicación adecuada de las estaciones de monitoreo es crucial para obtener datos precisos y representativos. Tanto las agencias reguladoras como los expertos en el campo han establecido criterios específicos para garantizar la fiabilidad de las mediciones. Estos criterios abarcan diversos aspectos, desde la altura de instalación hasta la distancia de fuentes de contaminación y obstáculos.

La Tabla 2.11 presenta los principios generales recomendados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) para la colocación de sensores de calidad del aire. Estos incluyen consideraciones sobre la distancia a fuentes de contaminación, el flujo de aire libre, la altura de instalación y la infraestructura requerida.

Estas pautas son esenciales para asegurar que los datos recolectados sean representativos de la calidad del aire que respiran las personas y no estén indebidamente influenciados por fuentes localizadas u obstáculos.

Tabla 2.11

Guía de instrucciones de colocación de sensor.

Consideración	Descripción
Ubicación lejana de fuentes/sumideros de contaminación	Evitar colocar el sensor cerca de fuentes puntuales de contaminación, como caminos o zonas de humo, para evitar datos sesgados.
Flujo de aire libre alrededor del sensor	El sensor necesita aire sin obstrucciones para medir con precisión, por lo que debe evitarse la proximidad de barreras como edificios o árboles.
Altura de instalación entre 3 y 6 pies (0.9 a 1.8 m)	Colocar el sensor a una altura que simule la respiración humana y lo proteja de factores como el agua o el polvo del suelo.
Distancia de estructuras cercanas	Mantener el sensor alejado de edificios o barreras que puedan actuar como sumideros de contaminantes, afectando las lecturas.
Infraestructura adecuada	Asegurarse de que el sitio tenga los recursos necesarios (energía, comunicación, seguridad) para la instalación y operación del sensor.

Nota. Adaptado de (Clements et al., 2022).

2.16. Regresión

2.16.1. Regresión lineal simple

La regresión lineal simple constituye una herramienta estadística diseñada para modelar el vínculo existente entre una variable explicativa y una variable de respuesta. Mediante este procedimiento, se logra examinar, evaluar y medir numéricamente el comportamiento de la variable dependiente ante modificaciones en la independiente.

Con el fin de analizar visualmente esta correspondencia, se recurre habitualmente al diagrama de dispersión. Esta gráfica facilita la observación de la tendencia entre ambas variables, sirviendo como base para determinar la estructura matemática idónea que se ajusta a las observaciones.

La estructura matemática del modelo de regresión lineal simple se fundamenta en la ecuación de una línea recta, expresada como:

$$y = mx + b \quad (\text{II.4})$$

donde:

- m representa la pendiente de la recta.
- b constituye el intercepto del modelo con el eje vertical.

El ajuste de esta recta se realiza mediante el método de mínimos cuadrados, cuyo objetivo es identificar el modelo óptimo que minimice la sumatoria de las desviaciones al cuadrado entre los puntos observados y la recta estimada. Este enfoque metodológico permite cuantificar el nivel de asociación entre las variables x e y , ofreciendo una ecuación lineal que simplifica la interpretación del impacto que ejerce el factor independiente sobre el resultado evaluado.

Las fórmulas empleadas para calcular los estimadores de la pendiente (m) y el intercepto (b) se definen de la siguiente manera:

$$m = \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (\text{II.5})$$

$$b = \frac{\sum y_i - m \sum x_i}{n} \quad (\text{II.6})$$

Los componentes e índices incluidos en las expresiones anteriores corresponden a:

- x_i : mediciones registradas para la variable explicativa dentro del conjunto muestral, donde $i = 1, 2, \dots, n$.
- y_i : valores obtenidos para la variable de respuesta asociados a cada observación x_i .
- n : cantidad total de datos o registros analizados.
- $\sum x_i$: sumatoria acumulada de los valores pertenecientes al factor independiente.
- $\sum y_i$: adición total de los registros correspondientes al factor dependiente.
- $\sum x_i^2$: sumatoria de las magnitudes elevadas al cuadrado de la variable explicativa.
- $\sum x_i y_i$: acumulación del producto entre los pares de datos x_i e y_i a lo largo de toda la muestra.

2.17. Indicadores de rendimiento

Las métricas de desempeño detalladas en la Tabla 2.12 se emplean para evaluar la precisión y validez de las mediciones recolectadas por las estaciones de monitoreo de calidad del aire durante sus procesos de calibración.

Tabla 2.12

Métricas estadísticas para la evaluación del rendimiento de los sensores.

Métrica	Descripción	Ecuación
Coficiente de determinación (R^2)	Representa la proporción de la varianza del equipo de referencia que es explicada y replicada por el comportamiento de los sensores bajo el modelo evaluado.	$R^2 = \frac{\left(\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})(r_i - \bar{r})\right)^2}{\sum_{i=1}^N (s_i - \bar{s})^2 \sum_{i=1}^N (r_i - \bar{r})^2}$
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	Cuantifica la dispersión de las desviaciones, penalizando en mayor medida los errores de gran magnitud debido al término cuadrático.	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (s_i - r_i)^2}$
Error absoluto medio (MAE)	Expresa la magnitud promedio de las diferencias absolutas entre las lecturas del sensor y el valor patrón, ignorando el sentido del error.	$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N s_i - r_i $
Sesgo medio normalizado (MNB)	Estima la desviación sistemática del dispositivo (sobrestimación o subestimación), normalizando el cálculo respecto a los valores de referencia.	$MNB = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{s_{ij} - r_i}{r_i}$

En estas ecuaciones:

- r_i representa la i -ésima medición de referencia
- s_i corresponde a la i -ésima lectura del sensor

- N es el número total de observaciones
- $\bar{s}$ denota el promedio de las lecturas del sensor
- $\bar{r}$ indica el promedio de las mediciones de referencia
- s_{ij} representa la i -ésima lectura del j -ésimo ejemplar del modelo de sensor
- M es el número de copias para cada modelo de sensor

2.17.1. Precisión

La precisión entre sensores idénticos debe caracterizarse mediante dos métricas: la desviación estándar (SD) entre las mediciones y el coeficiente de variación (CV). Estas métricas se calculan para los despliegues de prueba en campo, utilizando únicamente los datos correspondientes a los periodos en los que todos los sensores idénticos estén operativos y entregando mediciones promediadas cada 24 horas.

$$SD = \sqrt{\frac{1}{(N \times M) - 1} \sum_{j=1}^M \sum_{d=1}^N (x_{dj} - x_d)^2} \quad (\text{II.7})$$

Donde:

- SD : Desviación estándar de las concentraciones de PM_{2.5} promediadas cada 24 horas por los sensores ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- M : Cantidad de sensores del mismo modelo que operaron simultáneamente durante las pruebas de campo.
- N : Número de días de 24 horas durante los cuales todos los sensores están operativos.
- x_{dj} : Concentración de PM_{2.5} promediada cada 24 horas para el día d y el sensor j ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- x_d : Promedio diario de PM_{2.5} del conjunto de sensores para el día d ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

$$CV = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100 \quad (\text{II.8})$$

Donde:

- CV : Coeficiente de variación (%)
- SD : Desviación estándar de las concentraciones de $PM_{2.5}$ promediadas cada 24 horas ($\mu g/m^3$)
- $\bar{x}$: Concentración promedio general de $PM_{2.5}$ durante todo el periodo de prueba en campo ($\mu g/m^3$)

2.18. Criterios de evaluación y métricas de desempeño para sensores de bajo costo

Para el cálculo de las métricas de evaluación, se considera como variable independiente (x) los datos proporcionados por el equipo de referencia, el cual puede corresponder a un método de referencia federal o equivalente para la medición de $PM_{2.5}$. La variable dependiente (y) corresponde a las mediciones obtenidas por el sensor (Duvall et al., 2021).

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) ha propuesto una serie de métricas de referencia para evaluar el desempeño de los sensores de bajo costo. Aunque estos criterios no constituyen estándares normativos, proporcionan una guía para valorar el comportamiento de los sensores mediante su comparación con equipos de referencia. Para realizar esta evaluación, la EPA recomienda un período mínimo de 30 días de medición durante la etapa de colocación (Duvall et al., 2021). En la Tabla 2.13 se presentan las principales métricas de desempeño, junto con los rangos sugeridos para su interpretación.

Tabla 2.13

Métricas de evaluación del desempeño para sensores de $PM_{2.5}$.

Métrica de desempeño	Descripción	Valor Objetivo (Pruebas Básicas)
Precisión	Desviación estándar (SD)	$\leq 5 \mu g/m^3$
	Coeficiente de variación (CV)	$\leq 30 \%$
Sesgo	Pendiente (m)	$1,0 \pm 0,35$
	Intercepto (b)	$-5 \leq b \leq 5 \mu g/m^3$
Linealidad	Coeficiente de determinación (R^2)	$\geq 0,70$
Error	RMSE	$\leq 7 \mu g/m^3$

Nota. Adaptado de (Duvall et al., 2021).

Capítulo III

Diseño de la red de medición de PM_{2.5}

3.1. Evaluación del área de estudio

Figura 3.1

Mapa de delimitación del área de estudio.



Nota. Elaboración propia.

Para evaluar la calidad del aire en el área de estudio, es esencial seguir normas y estándares que aseguren una medición confiable, precisa y veraz, dado que la exposición a contaminantes tiene un impacto significativo en la salud pública. En particular, nos enfocamos en la cuantificación de PM_{2.5}, un contaminante crítico debido a su capacidad de penetrar en el sistema respiratorio y afectar gravemente la salud.

El área de estudio seleccionada es el campus universitario. Según la literatura revisada y los datos resumidos en la Tabla 3.2, se evidencia que a medida que se expande el área de monitoreo, la cantidad de dispositivos necesarios para medir los niveles de PM_{2.5} aumenta considerablemente. Esto plantea desafíos en términos de recursos, pero es necesario para garantizar una cobertura adecuada.

El objetivo primordial de esta evaluación es proteger la salud de la población universitaria, compuesta por aproximadamente 6,000 estudiantes que se movilizan diariamente entre distintas instalaciones, como el comedor, la biblioteca y las facultades. Dado que el $PM_{2.5}$ es uno de los principales contaminantes en áreas urbanas, es esencial un monitoreo continuo y preciso para identificar zonas de riesgo y minimizar la exposición. Por esta razón, es crucial una correcta clasificación del área de estudio, lo que permitirá un despliegue eficiente de los sensores y una evaluación detallada de la calidad del aire.

La Tabla 3.1 muestra la clasificación de los diferentes aspectos del campus universitario, con el objetivo de facilitar una mejor evaluación de la calidad del aire.

Tabla 3.1

Clasificación del campus universitario.

Tipo de área	Emisiones dominantes	Escala	Fuentes vinculadas	Parámetros a priorizar
Urbana	De tráfico y de fondo	Media	Parque automotor, vías pavimentadas y zonas urbanas	$PM_{2.5}$

Nota. Elaboración propia.

3.1.1. Determinación de la cantidad de puntos de medición

Con el propósito de establecer el número óptimo de puntos de muestreo, se tomó como base la delimitación del campus universitario, el cual comprende una extensión superficial de 0,18 km². Cubrir esta superficie de manera homogénea y representativa exige la distribución estratégica de estaciones de monitoreo en diversas localizaciones del área de interés. Por consiguiente, se evaluó la densidad de estaciones de medición requerida para garantizar una cobertura espacial efectiva dentro del perímetro de estudio.

Con el fin de proveer un sustento técnico a esta fase, se desarrolló un análisis comparativo de la literatura científica y de proyectos previos enfocados en el diseño espacial de estaciones de monitoreo según la extensión del terreno. Los hallazgos recopilados se estructuran en la Tabla 3.2, donde se establece que, para una superficie de 0,18 km², el rango de dispositivos propuesto en las investigaciones varía desde un mínimo de 1 hasta un máximo de 28 estaciones operativas.

Tabla 3.2*Densidad de estaciones de monitoreo en un área determinada.*

N°	Autor	Proyecto	Área (km ²)	Estaciones	Estaciones en 0.18 km ²
1	Porras (2023)	Gaviria Universidad Autónoma de Occidente	0.045475	7	27.71 $\approx$ 28
2	Chu et al. (2020)	Mapeo de PM _{2.5} de sensores de calidad del aire	36	2963	14.81 $\approx$ 15
3	Connolly et al. (2022)	Monitoreo a escala comunitaria	0.64	30	8.44 $\approx$ 8
4	Lu et al. (2021b)	Redes de sensores en Los Ángeles	14	361	4.64 $\approx$ 5
5	Badura et al. (2019)	Campus académico	0.744	17	4.11 $\approx$ 4
6	Kar et al. (2024)	Predicciones de alta resolución espacial de PM _{2.5}	11	143	2.34 $\approx$ 2
7	Van Poppel et al. (2023)	SensEURCity – Ambres	64	34	0.10 $\approx$ 1
8	Van Poppel et al. (2023)	SensEURCity – Oslo	80	34	0.08 $\approx$ 1
9	Torres (2023)	Red de sensores en exteriores	1250	200	0.03 $\approx$ 1
10	Grupo Qaira (2024)	Municipalidad de Lima	36	13	0.07 $\approx$ 1
11	Iyer et al. (2022)	Mapas de contaminación espaciotemporales	1500	28	0.003 $\approx$ 1

Nota. Elaboración propia.

Al desplegar las estaciones de medición, habrá áreas en las que no se podrá determinar directamente la calidad del aire. Dado que el objetivo es evaluar la calidad del aire que respira la población universitaria y considerando su desplazamiento diario hacia lugares como el comedor o la biblioteca, será necesario instalar múltiples estaciones de medición para cubrir de manera efectiva el campus universitario.

Para abordar esta situación, es fundamental aumentar la resolución de medición, lo que implica una mayor densidad de estaciones en el área de estudio. Por lo tanto, es necesario determinar la cantidad óptima de estaciones para lograr una evaluación precisa de la calidad del aire en el campus.

A partir de la Tabla 3.2, al calcular el promedio de la cantidad de sensores necesarios para el área de estudio, se obtiene un valor de 6,09. Por lo tanto, para evaluar la calidad del aire en el campus universitario, se requerirán 6 estaciones de medición.

Diversos estudios sobre contaminación en entornos urbanos han demostrado que la partición del área en cuadrículas es una metodología efectiva para mejorar la resolución espacial y minimizar las zonas sin datos. Por ejemplo, en el estudio de (Lu et al., 2021a), realizado en la ciudad de Los Ángeles, EE. UU., se utilizó una cuadrícula con una resolución de 500 x 500 metros. De manera similar, el estudio de (Jain et al., 2021), llevado a cabo en Pittsburgh, EE. UU., empleó una resolución de 50 x 50 metros, mientras que el estudio de (Kar et al., 2024), centrado en áreas metropolitanas como Columbus, y Denver, utilizó una cuadrícula de 100 x 100 metros.

Estos enfoques han demostrado ser efectivos para mejorar la representación espacial de la calidad del aire, proporcionando una base metodológica para determinar la distribución óptima de las estaciones de medición en el campus universitario. En el presente proyecto, el campus universitario se dividirá en una retícula conformada por cuadrículas, con el propósito de lograr una distribución homogénea de las estaciones de monitoreo. Cada cuadrícula tendrá dimensiones aproximadas de 169 m $\times$ 192 m, lo que permitirá una cobertura espacial representativa del área de estudio.

Figura 3.2

Ubicación de las estaciones de medición en el campus universitario. Cada cuadrícula tiene dimensiones aproximadas de 169 m $\times$ 192 m.



Nota. Elaboración propia.

Tabla 3.3*Ubicación de las estaciones de medición.*

Estación	Latitud (°)	Longitud (°)
Estación 1	-13.5215417	-71.9602111
Estación 2	-13.5224389	-71.9589528
Estación 3	-13.5234917	-71.9580361
Estación 4	-13.5214667	-71.9572222
Estación 5	-13.5207083	-71.9602472
Estación 6	-13.5210583	-71.9586083

Nota. Elaboración propia.

3.2. Selección del sensor de medición de PM_{2.5}

La selección del sensor para la medición de material particulado se fundamenta en el análisis de diversos parámetros críticos que deben cumplir con los requerimientos del proyecto. Los principales criterios de evaluación incluyen la capacidad de medición de PM_{2.5}, la precisión del sensor y su desempeño en campo al compararse con equipos que emplean métodos de referencia federal o equivalentes.

La Tabla 3.5 presenta las características técnicas obtenidas directamente de las hojas de datos de los sensores propuestos para la selección. El análisis comparativo muestra que los sensores comparten características similares en cuanto a la medición del tamaño de partículas y la estimación de PM_{2.5}, resaltando que el sensor Plantower PMS7003 destaca por su mayor precisión.

Además, se realizó un análisis comparativo del desempeño de los sensores a partir de los resultados presentados en la Tabla 3.4. En las evaluaciones de campo, el sensor Plantower PMS7003 obtuvo el mayor coeficiente de determinación ($R^2 = 0,91$) respecto al equipo de referencia TEOM 1400a, lo que evidencia una alta concordancia entre las mediciones del sensor y las registradas por el instrumento de referencia.

En consecuencia, el sensor Plantower PMS7003 fue seleccionado para el desarrollo del sistema de monitoreo, ya que presentó el mejor desempeño entre las alternativas evaluadas. Su mayor precisión y su elevada correlación con el equipo de referencia respaldan técnicamente su selección, permitiendo obtener mediciones confiables de la concentración de PM_{2.5} para la implementación del sistema de monitoreo propuesto.

Tabla 3.4*Comparación de características de sensores de material particulado.*

Fuente	Sensor / Modelo	R^2
Badura et al. (2018), PM _{2.5}	PMS7003	0.91
Badura et al. (2018), PM _{2.5}	ZH03A	0.84
AQ-SPEC, PM _{2.5}	SPS30	0.68–0.69

*Nota. Adaptado de (Duvall et al., 2021).***Tabla 3.5***Especificaciones técnicas de los sensores de calidad del aire.*

Modelo	PMS7003	SPS30	ZH03B
Fabricante	Plantower	Sensirion	Winsen
Tipo de sensor	Contador óptico de partículas (OPC)	Contador óptico de partículas (OPC)	Contador óptico de partículas (OPC)
Principio de funcionamiento	Dispersión de luz láser	Dispersión de luz láser	Dispersión de luz láser
Rango de tamaño de partícula (μm)	0.3–10	0.3–10	0.3–10
PM _x estimado	PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀	PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀	PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀
Rango de concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0–1000	0–1000	0–1000
Precisión ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	± 10 (0–100), $\pm 10\%$ (100–500)	± 15 (0–100), $\pm 10\%$ (100–1000)	N/A
Temperatura de trabajo ($^{\circ}\text{C}$)	-10 a 60	-10 a 60	-10 a 50
Humedad de trabajo (% RH)	0–99	20–80	0–80
Tiempo de respuesta (s)	≤ 10	≤ 1	≤ 45
Protocolo de comunicación	UART	UART, I ² C	UART, PWM
Alimentación (V)	4.5–5.5	4.5–5.5	4.9–5.5
Corriente de operación (mA)	≤ 100	55	70–100

Nota. Elaboración propia a partir de las hojas de datos oficiales de los sensores PMS7003, SPS30 y ZH03B.**Figura 3.3***Sensor PMS7003.**Nota. Adaptado de (Nanchang Panteng Technology Co., 2024).*

3.3. Módulo de medición de temperatura y humedad relativa

Dentro de la gama de sensores disponibles en el mercado, destacan el DHT11 y el DHT22 para aplicaciones IoT, ya que ambos ofrecen salida digital y un voltaje de operación que varía entre 3.3 V y 5V.

Es importante conocer las condiciones climáticas de la ciudad del Cusco para determinar cuál es el sensor más adecuado, seleccionando así los rangos de operación y demás características. Según el Servicio Nacional de Meteorología (SENAMHI), la temperatura más alta reportada fue de 21.7 °C, mientras que la más baja se registró con -1.6 °C. Por otro lado, Weather Atlas indica que la humedad relativa fue del 46 % y del 66 %, respectivamente (Weather Atlas, 2025).

El sensor más adecuado para estas condiciones es el DHT22, ya que es capaz de medir temperaturas negativas y ofrece una mayor precisión tanto en la medición de la temperatura como de la humedad. Además, tiene una mejor resolución en la medición de la humedad en comparación con el DHT11, lo que lo convierte en una opción superior para aplicaciones en condiciones variables como las del Cusco.

Figura 3.4

Sensor de medición de temperatura y humedad DHT22.



Nota. Adaptado de (Magdy, 2023).

Tabla 3.6*Análisis comparativo de las especificaciones técnicas de los sensores DHT11 y DHT22.*

Especificación Técnica	DHT11	DHT22
Tipo de señal de salida	Digital	Digital
Frecuencia de muestreo	1 s	2 s
Parámetros de Temperatura		
Intervalo de medición	0 a 50 °C	-40 a 80 °C
Margen de error (tolerancia)	±2 °C	±0.5 °C
Resolución incremental	0.1 °C	0.1 °C
Parámetros de Humedad Relativa		
Rango operativo	20 % a 90 % RH	0 % a 100 % RH
Margen de error (tolerancia)	±4 % RH	±2 % RH
Resolución incremental	1 % RH	0.1 % RH

Nota. Elaboración propia basada en las hojas de datos oficiales.

3.4. Selección de la tecnología de comunicación inalámbrica

Para la selección de la tecnología de comunicación, es necesario definir los objetivos que se desean alcanzar, como asegurar la cobertura de toda el área de estudio. Asimismo, al tratarse de un sistema de monitoreo de la contaminación del aire, resulta importante que los datos se transmitan en intervalos cortos de tiempo o, idealmente, en tiempo real. De manera complementaria, se debe garantizar que en la transmisión de información se minimice la pérdida de datos.

Considerando estos criterios, el radio del área de estudio es de aproximadamente 400 metros, por lo que las tecnologías disponibles superan ampliamente este requisito. A continuación, se analizan los intervalos de recolección de datos: Sigfox queda descartado debido a su limitación de envío de 140 mensajes por día, lo que permitiría un intervalo de aproximadamente 10 minutos entre cada envío, insuficiente para el sistema que se desea desplegar. Además, depender de la red Sigfox podría limitar la escalabilidad del proyecto.

En cuanto a LoRa y NB-IoT, ambas tecnologías resultan atractivas; sin embargo, NB-IoT ofrece una cobertura más amplia, ya que depende de la red celular. Esta

tecnología sería ideal si se requiriera cubrir ciudades enteras o incluso todo un país, considerando que la mayor parte del territorio cuenta con cobertura celular.

Por otro lado, LoRa, con un alcance de 3 a 6 km, supera ampliamente el requisito del área de cobertura del proyecto. Además, sus costos de operación y despliegue son bajos, lo que la convierte en la opción más adecuada para el despliegue del sistema de monitoreo.

En la Tabla 3.7 se presenta un cuadro comparativo que resume las fortalezas y limitaciones de cada tecnología en relación con el área de estudio que se desea cubrir.

Tabla 3.7
Comparación de tecnologías LPWAN en función de criterios de selección.

Criterio	Sigfox	LoRa	NB-IoT
Cobertura urbana	Cobertura total	3–5 km	Cobertura amplia
Costo de operación	Suscripción	Gratis (propia)	Plan de datos
Disponibilidad	Media	Alta	Alta
Dependencia	Red Sigfox	No (privada)	Operador móvil
Escalabilidad	Limitada	Alta	Alta
Tasa de envío de datos	Máx. 140/día	Depende del usuario	Depende del usuario

Nota. Elaboración propia.

Figura 3.5
Área del campus universitario.



Nota. Imagen extraída de Google Maps.

Luego de realizar el análisis y la selección de la tecnología inalámbrica para

la transmisión de datos, se procede a describir y seleccionar los elementos necesarios para la implementación del sistema de monitoreo. A continuación, se presentan los componentes que conformarán la red LoRaWAN propuesta..

3.5. Elementos que conforman la red LoRaWAN

3.5.1. Puerta de enlace

La puerta de enlace, comúnmente conocida como gateway, constituye un elemento fundamental en la arquitectura de red, ya que proporciona la cobertura necesaria para el monitoreo en conjunto con los nodos. Además, se encarga de recepcionar y gestionar la información transmitida por las estaciones de monitoreo.

Para su implementación, es necesario considerar la frecuencia de operación asignada para redes LoRaWAN en el país, la cual corresponde al plan de frecuencias AU915-928 MHz, operando específicamente en el rango de 915 a 928 MHz (LoRa Alliance Technical Committee, 2022).

Dentro de las opciones disponibles en el mercado, se adquirió un gateway de la familia RAK Wireless, modelo WisGate Lite 2, debido a su bajo costo, su amplio uso en redes LoRaWAN, y al soporte técnico y documentación que el fabricante ofrece para su implementación.

Una de sus principales ventajas radica en que, al contar con un sistema operativo de código abierto, permite la conexión con diversos servidores LoRaWAN, tales como ChirpStack, The Things Network y otros servidores compatibles con el estándar.

- LTE: mediante una ranura para tarjeta SIM
- Wi-Fi: conexión inalámbrica estándar
- Ethernet: conexión por cable de red

Tabla 3.8*Características y costo del gateway WisGate Edge Lite 2 (RAK7268).*

Características	WisGate Edge Lite 2 (RAK7268)
Frecuencia de operación	AU 915, KR 920 y AS 923
Canales	8
Soporte de clase	A y C
Potencia TX	27 dBm
Sensibilidad RX	-139 dBm
Tipo de alimentación	12V/1A y PoE
Sistema operativo	sistema operativo código abierto
Conexión	LTE, Ethernet y Wi-Fi
Temperatura de operación	-10°C a 55°C
Protección	IP30
Uso	Interior
Integración con servidores	LoRaWAN Server, TTN

*Nota. Elaboración propia.***Figura 3.6***WisGate Edge Lite 2.**Nota. Adaptado de (Technology, 2025).*

3.5.2. Nodo final

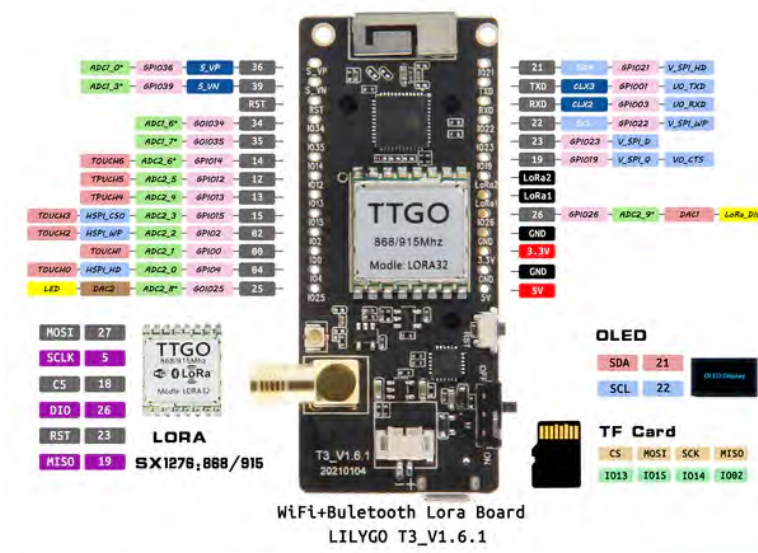
Para la selección del hardware que conformará el nodo final se optó por utilizar una tarjeta de desarrollo, ya que esta facilita la implementación del sistema y permite la integración sencilla de otros componentes. La tarjeta elegida debe contar con comunicación UART y comunicación digital, debido a que estas interfaces son necesarias para la interacción con el sensor PMS7003 y el sensor DHT22, respectivamente. Asimismo, debe integrar un módulo transmisor LoRa, dado que esta es la tecnología de comunicación seleccionada para el proyecto.

Durante el proceso de evaluación se identificaron dos alternativas que cumplieran con los requisitos técnicos: la TTGO LoRa y la Heltec Wi-Fi LoRa . Ambas presentan características similares, disponen de las interfaces de comunicación necesarias y cuentan con un transmisor LoRa integrado.

No obstante, el criterio determinante para la selección fue el costo. El módulo TTGO LoRa32 presenta un menor precio en comparación con el módulo Heltec y, adicionalmente, ofrece una ranura para tarjeta microSD que permite almacenamiento local de datos en caso sea necesario. Por estas razones, se decidió seleccionar el módulo TTGO LoRa como la tarjeta de desarrollo para el nodo final.

Figura 3.7

Esquema de pines y componentes de la placa TTGO T3_V1.6.1.



Nota. Adaptado de (LILYGO, 2025).

Tabla 3.9*Comparación técnica entre placas de desarrollo LoRa.*

Especificación	Heltec Wi-Fi LoRa 32 V2	TTGO LoRa32 T3_V1.6.1
Unidad de procesamiento	ESP32	ESP32
Interfaz Wi-Fi	Integrada	Integrada
Interfaz Bluetooth	Bluetooth 4.2 incorporado	Bluetooth 4.2 incorporado
Módulo de radio LoRa	SX1276 (137–1020 MHz)	SX1276 (137–1020 MHz)
Display incorporado	OLED de 0.96 pulgadas	OLED de 0.96 pulgadas
Sistema de gestión energética	No integrado (requiere alimentación externa)	No integrado (requiere alimentación externa)
Banda regional LoRa-WAN (TTN)	AU915–928 MHz	AU915–928 MHz
Fuente de alimentación	Puerto USB	Puerto USB
Aplicación sugerida	Enlaces inalámbricos de largo alcance	Enlaces inalámbricos de largo alcance
Interfaces de comunicación	UART, I ² C, SPI, GPIO, ADC	UART, I ² C, SPI, GPIO, ADC
Soporte para almacenamiento externo	No dispone	Ranura microSD (TF Card) integrada
Costo referencial	Mayor costo relativo	Menor costo relativo

Nota. Elaboración propia.

3.5.3. Servidor de red

Los servidores de red LoRaWAN gestionan la comunicación entre los gateways y las aplicaciones, coordinando el tráfico de datos y proporcionando servicios esenciales como autenticación, enrutamiento y control de las estaciones de monitoreo.

Se evaluaron diferentes servidores: LoRaWAN Server, ChirpStack y The Things Network (TTN). Los dos primeros requieren instalación local, mientras que TTN opera completamente en la nube. Las pruebas de compatibilidad con el gateway WisGate Lite 2 confirmaron que este es compatible con TTN y LoRaWAN Server, pero no con ChirpStack debido a limitaciones de hardware.

En la Tabla 3.10 se presentan las características del servidor TTN. Se seleccionó TTN por sus múltiples ventajas: es un servicio gratuito y comunitario, no requiere instalación local, facilita la integración con servicios en la nube como AWS IoT y Azure IoT. Además, destaca su integración con MQTT, lo cual resulta muy útil para la gestión y envío de datos. TTN proporciona un servidor listo para operar con las estaciones de

monitoreo y, al mismo tiempo, ofrece escalabilidad para la red a desarrollar.

Tabla 3.10

Características del servidor de red LoRaWAN TTN.

Propiedad	The Things Network (TTN)
Interfaz de Usuario	Sí
Sistemas Operativos Compatibles	Sin instalación directa (soporta Debian/Linux, Windows y macOS)
Clases de Nodo Soportadas	A, B y C
Opciones de Integración	MQTT, AWS IoT, Azure IoT, LoRa Cloud
Modalidad de Implementación	Público o Privado
Tipo de Ayuda	Comunitario
Tipo de Licencia	Código abierto

Nota. Elaboración propia.

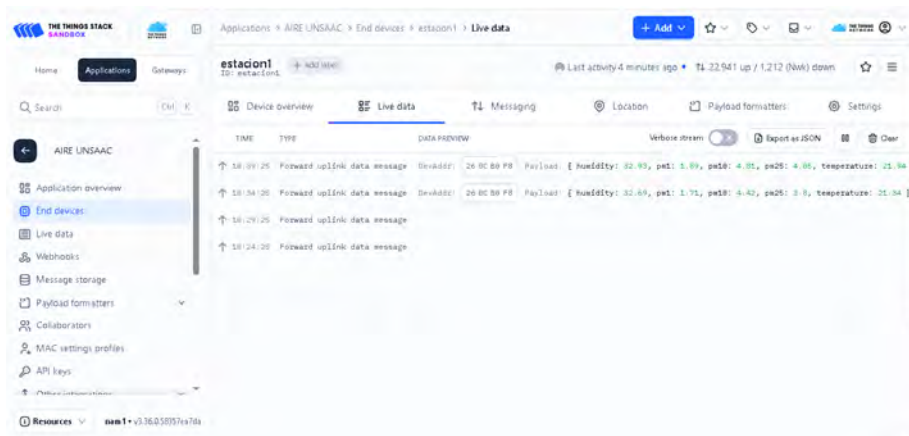
3.5.4. Servidor de aplicación

Una vez definida la utilización de The Things Network (TTN) como servidor de red, se debe considerar que este ya incluye un servidor de aplicaciones. Este servidor permite la interpretación de los datos recibidos, además de ofrecer opciones para el envío de datos mediante MQTT, HTTP y otros protocolos.

Además, el servidor de aplicaciones de TTN facilitará la conexión con Node-RED a través de MQTT, permitiendo la recepción y procesamiento de los datos transmitidos por las estaciones de monitoreo.

Figura 3.8

Servidor de aplicaciones.



Nota. Elaboración propia.

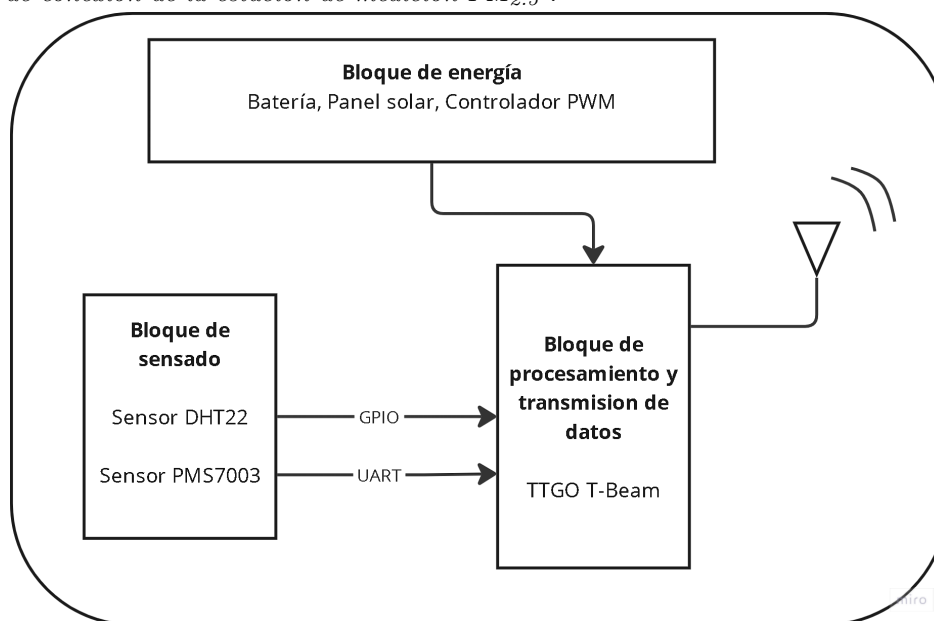
3.6. Diseño de las estaciones de medición de PM_{2.5}

Con el fin de garantizar un funcionamiento eficiente y modular, el sistema de medición de PM_{2.5} contemplará tres bloques principales. Esta organización permitirá separar las funciones críticas, facilitando tanto su implementación como su mantenimiento. En la Figura 3.9 se observa la estructura general de la estación PM_{2.5}, el cual está conformado por:

1. Bloque de procesamiento y transmisión de datos.
2. Bloque de sensado.
3. Bloque de energía.

Figura 3.9

Esquema de conexión de la estación de medición PM_{2.5}.



Nota. Elaboración propia.

3.6.1. Bloque de procesamiento y transmisión de datos

Este bloque integra el procesamiento y la transmisión de datos mediante la tarjeta de desarrollo adquirida, la cual incorpora un microcontrolador ESP32 y un transceptor SX1276. Esta integración permite optimizar el diseño y reducir la complejidad del sistema, al combinar en una sola placa el núcleo de procesamiento y el módulo de comunicación LoRa.

El ESP32 integrado no solo controla el transceptor SX1276 para la transmisión de datos mediante tecnología LoRa, sino que también gestiona la interacción con los sensores conectados. Este microcontrolador dispone de salidas digitales configurables y periféricos integrados, como UART, utilizado para la comunicación con el sensor PMS7003. Adicionalmente, un pin digital configurable del ESP32 se emplea para la lectura del sensor DHT22, que mide la temperatura y la humedad relativa.

3.6.2. Bloque de sensado

El bloque de sensado estará conformado principalmente por el sensor PMS7003, el cual integra un microcontrolador interno encargado de procesar las señales del láser y generar los datos de concentración de material particulado PM_1 , $PM_{2,5}$ y PM_{10} . Este sensor dispone de una interfaz de comunicación UART, lo que permitirá su conexión con el bloque de procesamiento de datos, mediante el cual se transmitirán los bytes correspondientes a las concentraciones de material particulado con un intervalo de actualización establecido por dicho bloque.

Asimismo, el bloque de sensado contará con el sensor DHT22, el cual utiliza una comunicación digital serial de un solo hilo para transmitir los datos bit a bit a través de un único conductor. Mediante esta interfaz, se enviarán los valores de temperatura y humedad al bloque de procesamiento para su registro y posterior transmisión.

3.6.3. Bloque de energía

Esta sección tiene la función de suministrar la energía necesaria para el correcto funcionamiento de los bloques de sensado, procesamiento y transmisión de datos, asegurando la operación continua.

Con este fin, se realizará el cálculo del consumo eléctrico correspondiente a cada uno de estos módulos. En la Tabla 3.11 se detallan los valores de consumo de todos los componentes, información que permitirá establecer el consumo energético global de la estación de monitoreo y determinar apropiadamente las especificaciones del panel fotovoltaico y del sistema de almacenamiento de energía.

Tabla 3.11*Consumo de energía de los componentes para 24 horas de operación continua.*

Características	DHT22	PMS7003	ESP32	Transmisor
Voltaje (V)	3.3	5.0	5.0	5.0
Corriente (mA)	1.5	80.0	80.0	1.5
Tiempo activo (h)	24	24	24	24
Energía diaria (Wh/día)	0.12	9.60	9.60	0.18
Energía total diaria (Wh/día):				19.50

Nota. Elaboración propia.

3.6.4. Diseño del sistema fotovoltaico

3.6.5. Cálculo de la batería

Para dimensionar la batería, se emplea la siguiente ecuación:

$$C_n = \frac{E_d \cdot N}{n_{\text{batería}} \cdot P_d \cdot V_{\text{bat}}} \quad [\text{Ah}] \quad (\text{III.1})$$

Donde:

- E_d : Energía total requerida [Wh/día]
- N : Número de días de autonomía [días]
- $n_{\text{batería}}$: Eficiencia de la batería [%]
- P_d : Profundidad de descarga de la batería [%]
- V_{bat} : Voltaje de la batería [V]

La energía total consumida en 24 horas es de 19.50 Wh. Para considerar un margen de seguridad, se aplica un factor de 1.25, lo que da como resultado una potencia ajustada de 24.38 Wh.

Tabla 3.13

Radiación solar promedio mensual y anual ($\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2/\text{día}$) en Cusco, Perú (Lat. -13.5215 , Long. -71.9587) del 2017 al 2022.

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
2017	5.00	4.71	4.52	4.34	4.10	4.55	5.01	5.09	4.70	5.43	5.20	4.87	4.79
2018	4.53	4.28	4.58	4.56	4.92	4.36	4.52	4.64	5.51	4.60	4.85	5.33	4.72
2019	4.72	4.37	4.59	4.80	4.90	4.78	4.71	5.54	4.98	5.52	5.12	4.46	4.87
2020	4.91	4.21	4.66	4.89	4.79	4.55	4.94	5.61	4.68	5.27	5.89	4.53	4.91
2021	4.63	4.65	4.47	4.62	4.70	4.49	5.08	5.19	5.04	5.42	4.80	4.72	4.82
2022	4.59	4.41	4.75	5.06	4.68	4.92	5.08	5.16	4.94	5.65	6.06	4.81	5.01
Prom.	4.73	4.44	4.60	4.71	4.68	4.61	4.89	5.21	4.98	5.32	5.32	4.79	4.85

Nota. Elaboración propia .

La Tabla 3.13 muestra que febrero es el mes con la menor cantidad de horas solar pico, registrando un valor de 4.44 horas. Para garantizar un diseño adecuado del sistema, el cálculo de la potencia de los paneles solares se realiza considerando este escenario desfavorable.

La siguiente ecuación proporciona el número de paneles solares necesarios:

$$N_T = \frac{E_T}{\text{HPS} \times P_p \times P_G} \quad (\text{III.2})$$

donde:

- HPS: Horas solar pico [h/día].
- P_p : Potencia pico del panel [W].
- E_T : Energía total requerida por día [Wh/día].
- P_G : Factor global de pérdidas (usualmente entre 0.65 y 0.9).

Tabla 3.14

Dimensionamiento de paneles solares según horas solares pico, energía requerida y factor global de pérdidas.

Parámetro	Valor
Energía total requerida (E_T)	24.38 Wh/día
Horas solares pico (HPS)	4.44 h/día
Factor global de pérdidas (P_G)	0.70
Panel solar de 5 W	
Potencia pico (P_p)	5 W
Cantidad de paneles requeridos (N_T)	1.57 $\approx$ 2 unidades
Panel solar de 10 W	
Potencia pico (P_p)	10 W
Cantidad de paneles requeridos (N_T)	0.78 $\approx$ 1 unidad

Nota. Elaboración propia.

3.6.7. Dimensionamiento del regulador

De acuerdo con la Tabla 3.14, se seleccionó un panel solar de 10 W, considerando un voltaje de batería de 12 V. Con estos valores, se calcula la corriente que circulará por el controlador solar mediante la siguiente ecuación:

$$I_{\text{controlador}} = \frac{\text{Potencia del panel}}{\text{Voltaje del sistema}} = \frac{10}{12} \approx 0,833, \text{ A} \approx 1, \text{ A} \quad (\text{III.3})$$

A partir de este resultado, se selecciona un controlador capaz de soportar una corriente mayor a 1 A. En el mercado local se encuentran controladores de 10 A y 20 A; por lo tanto, se optó por un controlador PWM de 10 A, ya que no se encontraron opciones comerciales menores a este valor.

El controlador seleccionado también cumple con los siguientes criterios:

- Compatible con baterías de 12 V.
- Capaz de soportar paneles con un voltaje pico de hasta 18 V.
- Incluye un puerto USB de salida de 5 V y 1 A, el cual se utilizará para alimentar el bloque de procesamiento y transmisión de datos mediante un cable micro-USB.

Figura 3.11
Controlador solar.

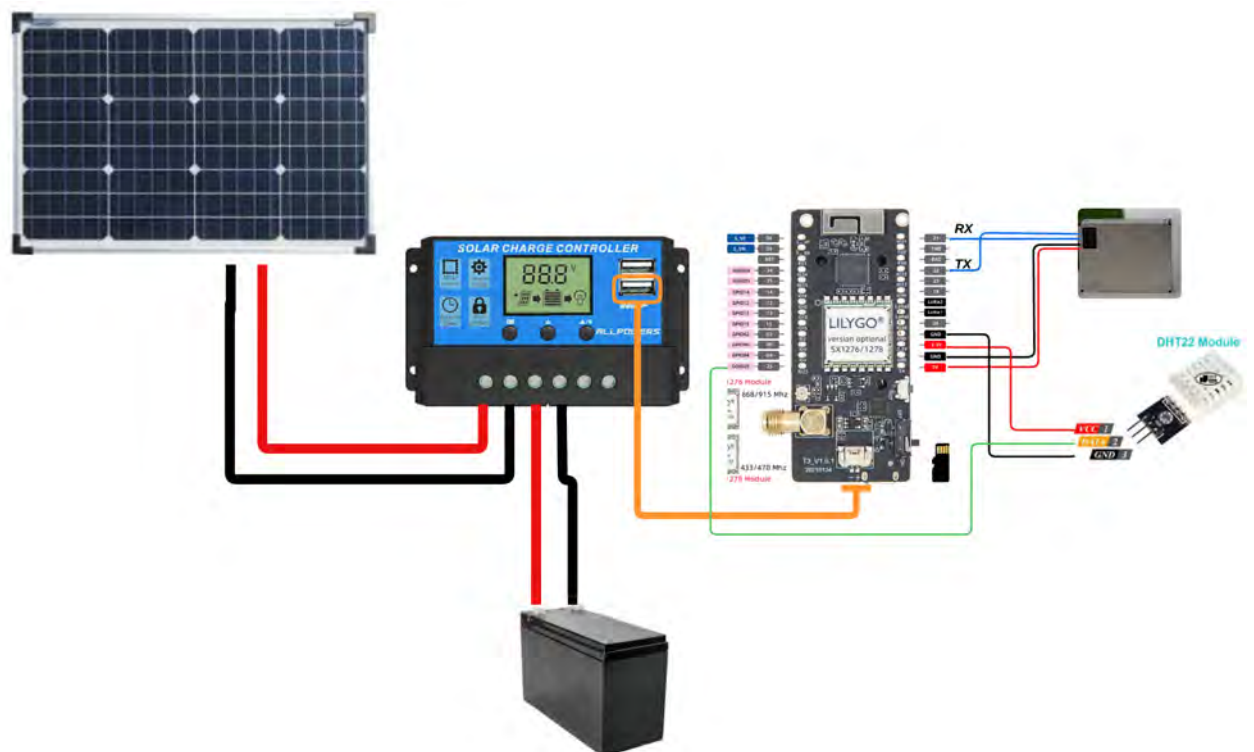


Nota. Adaptado de (KapscoMoto, 2025).

3.6.8. Implementación de las estaciones de monitoreo

En la Figura 3.12 se presenta el diagrama de conexiones de la estación de medición, el cual integra el panel solar, el controlador de carga, la batería de respaldo y la tarjeta de desarrollo. Asimismo, se detallan las conexiones hacia los sensores de material particulado, temperatura y humedad.

Figura 3.12
Esquema general de conexión de una estación de monitoreo.

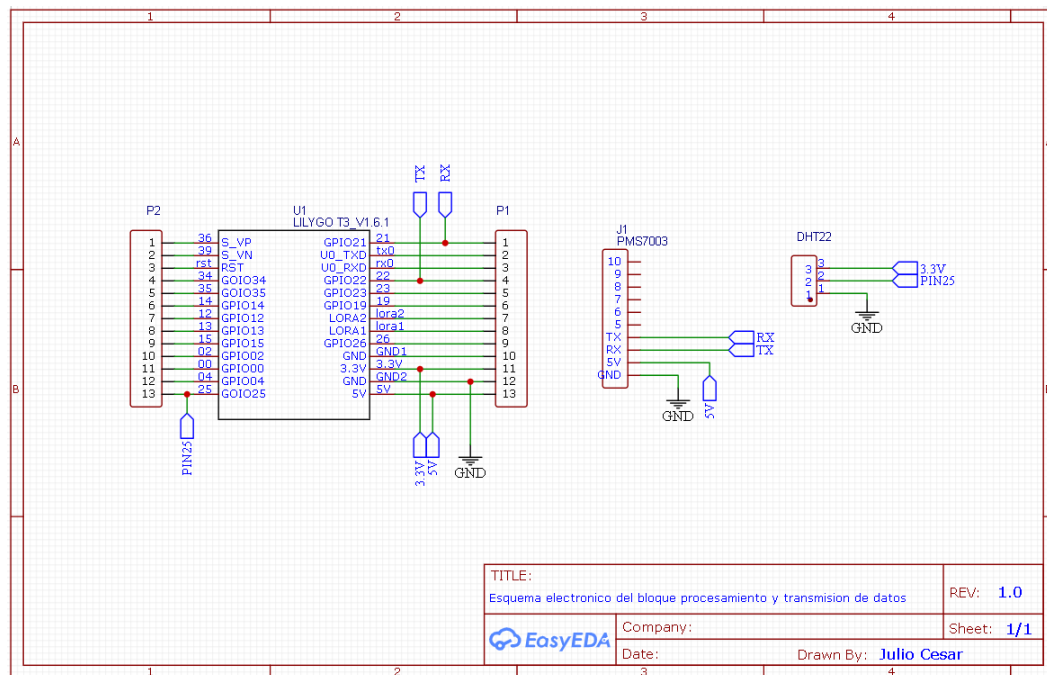


Nota. Elaboración propia.

Para facilitar la conexión de los sensores a la tarjeta de desarrollo, se diseñó una placa de circuito impreso. Para ello, se elaboró el diagrama circuital mostrado en la Figura 3.13, donde se presentan los pines utilizados para la comunicación UART del sensor PMS7003 y el pin digital empleado para la comunicación con el sensor DHT22.

Figura 3.13

Esquema electrónico del bloque de procesamiento y transmisión de datos.

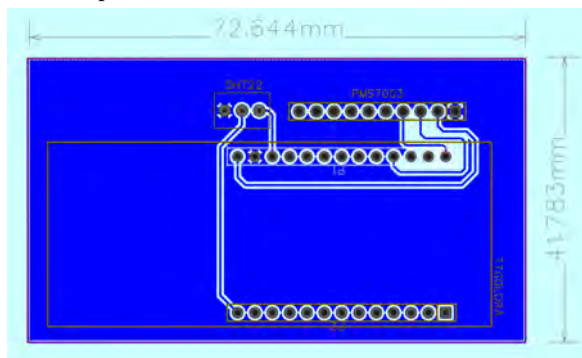


Nota. Elaboración propia.

La Figura 3.14 muestra el diseño de la placa de circuito impreso, así como la disposición de las pistas y pads destinados a la conexión del sensor PMS7003 y del sensor DHT22. Además, se observa el ruteo de las pistas que permiten la comunicación entre la tarjeta de desarrollo y los sensores utilizados en el sistema.

Figura 3.14

Diseño de la placa de circuito impreso.



Nota. Elaboración propia.

En la Figura 3.15 se muestra el diseño virtual de la placa electrónica. Se utilizaron headers hembra para la colocación de la tarjeta de desarrollo, lo que facilita su inserción y extracción y permite realizar modificaciones de manera sencilla. De igual forma, los sensores PMS7003 y DHT22 se conectan mediante headers hembra independientes, con la finalidad de mejorar la interconexión entre la tarjeta de desarrollo y los sensores empleados en el sistema.

Figura 3.15

Modelo 3D virtual de la placa electrónica.



Nota. Elaboración propia.

Previo al despliegue, se evaluó cuidadosamente el entorno en el que serían instaladas las estaciones. Dado que Cusco se caracteriza por intensas lluvias, fue necesario proteger los elementos que conforman los componentes más críticos, como el sensor PMS7003, la tarjeta de desarrollo y el sensor DHT22. Para tal fin, se diseñó y fabricó un case que resguarda estos elementos frente a la humedad y las inclemencias del tiempo. Dicho case se muestra en la Figura 3.18.

Figura 3.16

Vista de componentes del módulo principal de la estación de monitoreo.



Nota. Elaboración propia.

Figura 3.17*Vista inferior del módulo principal del prototipo.**Nota. Elaboración propia.***Figura 3.18***Vista superior del módulo principal del prototipo.**Nota. Elaboración propia.*

Para resguardar adecuadamente otros componentes electrónicos, como la batería, el controlador solar y el resto del sistema de alimentación, se empleó una caja de PVC resistente, tal como se muestra en la Figura 3.19. Esta solución contribuye a garantizar el funcionamiento continuo del sistema ante condiciones climáticas adversas.

Figura 3.19*Vista interna de la estación de medición.**Nota. Elaboración propia.*

A continuación, se muestra un ejemplo de instalación de la estación de monitoreo de calidad del aire en el campus universitario, siguiendo las recomendaciones de ubicación propuestas por la EPA, como se observa en la Figura 3.20.

Figura 3.20

Estación de medición de calidad del aire instalada.



Nota. Elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 3.21 se presenta el diseño final de las estaciones de $PM_{2.5}$, en el que se aprecia el sensor de partículas PMS7003 y el sensor de temperatura y humedad DHT22 debidamente integrados en el case de protección.

Figura 3.21

Diseño final de las estaciones de $PM_{2.5}$. Vista del sensor PMS7003 y del sensor de temperatura DHT22.



Nota. Elaboración propia.

3.7. Configuración del Gateway

Para iniciar la configuración del gateway, es necesario definir las bandas de operación. En el Perú, el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) establece la banda de 915-928 MHz como un rango de frecuencias no licenciadas. Según las normativas de LoRa Alliance, a Perú se le asignan las bandas AU915 y AS923-1. Para el presente proyecto, se utilizará la banda AU915-928.

Figura 3.22

Banda de operación asignada por LoRa Alliance para Perú.

País (código)	Banda de frecuencia
Peru (PE)	915–928 MHz

Nota. Adaptado de LoRa Alliance Technical Committee (2022).

Figura 3.23

Bandas de operación admitidas para Australia.

País (código)	Banda de frecuencia	Plan de canales
Australia (AU)	915–928 MHz	AS923-1 / AU915-928

Nota. Adaptado de LoRa Alliance Technical Committee (2022).

3.7.1. Asignación de canales de operación

Dentro de los parámetros regionales establecidos por LoRa Alliance para la banda AU915-928, se dispone de 64 canales de enlace ascendente (*uplink*), los cuales se muestran en la Tabla 3.15. Estos canales se encuentran agrupados en sub-bandas, conformadas por conjuntos de ocho canales de operación.

Considerando que el gateway utilizado posee capacidad de recepción para ocho canales simultáneos, se seleccionó la sub-banda 2, correspondiente a los canales 8 al 15. Esta asignación de sub-banda debe configurarse tanto en el gateway como en los nodos finales, con el propósito de garantizar la compatibilidad de comunicación y asegurar una correcta transmisión y recepción de datos dentro de la red LoRaWAN.

Tabla 3.15*Sub-bandas y canales de operación LoRa AU915-928.*

Sub-banda	Canales	Frecuencias (MHz)							
Sub-banda 1	0–7	915.2	915.4	915.6	915.8	916.0	916.2	916.4	916.6
Sub-banda 2	8–15	916.8	917.0	917.2	917.4	917.6	917.8	918.0	918.2
Sub-banda 3	16–23	918.4	918.6	918.8	919.0	919.2	919.4	919.6	919.8
Sub-banda 4	24–31	920.0	920.2	920.4	920.6	920.8	921.0	921.2	921.4
Sub-banda 5	32–39	921.6	921.8	922.0	922.2	922.4	922.6	922.8	923.0
Sub-banda 6	40–47	923.2	923.4	923.6	923.8	924.0	924.2	924.4	924.6
Sub-banda 7	48–55	924.8	925.0	925.2	925.4	925.6	925.8	926.0	926.2
Sub-banda 8	56–63	926.4	926.6	926.8	927.0	927.2	927.4	927.6	927.8

*Nota. Cada sub-banda está compuesta por ocho canales con un ancho de banda de 125 kHz.
Elaboración propia.*

3.7.2. Configuración operativa del Gateway WisGate Lite 2

Dentro de la plataforma de configuración de RAK Wireless para el WisGate Lite 2, mostrada en la Figura 3.24, es posible ajustar diversos parámetros, como la región y los canales de operación, la conexión a Internet y el enlace con el servidor de red. Además, la plataforma permite visualizar los mensajes uplink en tiempo real y gestionar la cantidad de nodos activos en la red.

Figura 3.24*Plataforma de configuración Wis Gate Lite 2.*

Nota. Elaboración propia.

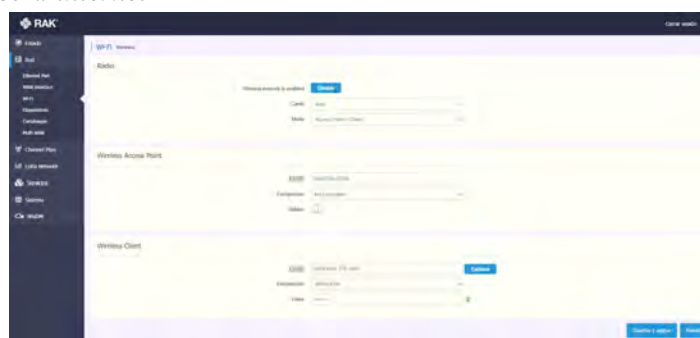
Como primer paso en la configuración del WisGate Lite 2, se define la región de operación y los canales de transmisión. En este caso, se selecciona la región AU915-928, junto con los canales de operación del 8 al 15, tal como se muestra en la Figura 3.25. Esta configuración es fundamental para garantizar la compatibilidad con la red LoRaWAN y optimizar la comunicación entre los dispositivos.

Figura 3.25*Configuración Channel plan.**Nota. Elaboración propia.*

Como segundo paso, se configura el acceso a Internet del WisGate Lite 2 dentro de la plataforma de RAKwireless, la cual permite operar el dispositivo en tres modos: Access Point (AP), Client WiFi, o ambos de manera simultánea. Se elige esta última opción, ya que proporciona un mejor control sobre la conectividad del gateway y el acceso a Internet, como se muestra en la Figura 3.26.

En modo Access Point, el gateway crea su propia red WiFi, lo que permite conectarse directamente a él para realizar configuraciones sin necesidad de una red externa. Simultáneamente, en modo Cliente WiFi, el dispositivo escanea las redes inalámbricas disponibles y se conecta a una de ellas para obtener acceso a Internet y transmitir datos.

Gracias a esta funcionalidad, la plataforma de RAKwireless permite gestionar la configuración del dispositivo de manera eficiente, asegurando una conexión estable y sin interrupciones durante el proceso de integración a la red.

Figura 3.26*Configuración acceso a internet.**Nota. Elaboración propia.*

Para finalizar, se realiza la configuración para establecer la conexión con el servidor de red The Things Network. En este caso, RAK Wireless no proporciona la configuración específica para el WisGate Lite 2. En particular, la dirección del servidor es **nam1.cloud.thethings.network**.

Figura 3.27

Configuración de la puerta de enlace con el servidor red.

The screenshot shows the RAK LoRaWAN Network Settings interface. The left sidebar contains navigation links: Status, Network, Channel Plan, LoRa Network, Network Settings (highlighted), Services, and System. The main content area is titled 'LoRaWAN Network Settings' and includes a 'Logout' button in the top right. Below the title, there are tabs for 'General Setup', 'Packet Forwarder', and 'GPS Information'. The 'Packet Forwarder' tab is active, displaying various configuration fields. A red box highlights the 'Protocol' dropdown menu, which is set to 'Selected (ESP, MQTT, PubSub)'. Other visible fields include 'Gateway EUI' (88380F6756F59), 'Server Address' (m2m.eu.thingsnetworks), 'Server Port Up' (7000), 'Server Port Down' (7000), 'Push Timeout (ms)' (700), 'Status Interval (s)' (30), 'Keepalive Interval (s)' (5), 'Automatic data recovery' (checked), 'Automatic Timeout' (30), 'Is LoRaWAN Network' (YES), and 'Log Level' (NOTICE). At the bottom right, there are 'Save & Apply' and 'Cancel' buttons.

Nota. Adaptado de (RAKwireless Technology Limited, 2025)

3.7.3. Despliegue del servidor de red

Se realiza la integración del WisGate Lite 2 dentro del servidor de red The Things Network (TTN). Durante este proceso, se asignan dos identificadores clave: el Gateway ID y el Gateway EUI, los cuales son necesarios para registrar el dispositivo en la plataforma.

Además, se configura la frecuencia de operación, la cual debe coincidir exactamente con la establecida en el gateway. En este caso, se selecciona la región AU915-928, específicamente la subbanda 2, que abarca los canales del 8 al 15.

Esta configuración asegura que el gateway pueda comunicarse correctamente con la red LoRaWAN y transmitir los datos de los dispositivos conectados. En la Figura 3.28 se muestra el proceso de integración en TTN.

Figura 3.28
Configuración del servidor red.



Nota. Elaboración propia.

Una vez realizada la integración del gateway, el servidor de red permite crear aplicaciones en las cuales se alojarán los nodos finales. Para este caso, la aplicación se ha nombrado **“AIRE UNSAAC”**.

Figura 3.29
Creación de la aplicación.



Nota: El servidor de TTN permite generar varias aplicaciones y dentro de cada aplicación se alojara los nodos finales.

Una vez creada la aplicación, se iniciara el registro de los nodos finales, considerando los siguientes parámetros. En el caso de la versión de LoRaWAN y los parámetros regionales, se recomienda utilizar los valores sugeridos por el servidor de The Things Network:

- **Plan de frecuencia:** AU915-928 MHz
- **Subbanda:** 2

- Versión de LoRaWAN: 1.0.4
- Parámetros regionales: RP1-1.0.4
- Modo de activación: OTAA

Figura 3.30

Registro del dispositivo final.



Nota. Elaboración propia.

3.7.4. Configuración de operación de las estaciones de medición

Inicialmente, se define el método de activación, y en la Tabla 3.16 se presentan las ventajas de utilizar el modo OTAA. Este método permite una mayor flexibilidad en la configuración y programación del microcontrolador, evitando problemas con el contador de tramas tras un reinicio. Esto facilitara la optimización del algoritmo de procesamiento y transmisión de datos, sin interrupciones ni reconfiguraciones manuales.

Tabla 3.16

Comparación entre ABP y OTAA en LoRaWAN.

Característica	ABP	OTAA
Gestión de claves	Claves fijas, no se renuevan	Claves nuevas en cada unión
Seguridad	Menos segura, posible vulnerabilidad	Más segura, claves dinámicas
Contadores de trama	Se reinician al resetear el nodo	Se restauran automáticamente
Problema con TTN	Mensajes bloqueados tras un reinicio	No hay problema, contador se reactiva

Nota. Elaboración propia.

Definido el modo de activación de la estación de medición, se configuran los parámetros de operación según lo descrito en la Tabla 3.17.

Tabla 3.17*Parámetros operativos de transmisión utilizados en la estación de medición.*

Parámetro	Valor configurado
Región de operación	AU915-928 MHz
Sub-banda utilizada (uplink)	2
Modo de clase LoRaWAN	Clase A
Nivel de potencia de transmisión	+14 dBm
Ancho de canal	125 kHz
Método de activación	OTA (Over-The-Air)
Spreading Factor configurado	SF7
Coding Rate (FEC)	4/5
Dirección de enlace utilizada	Solo transmisión ascendente

Nota. Elaboración propia.

3.7.4.1. Programación de la estación de medición

Para implementar la comunicación LoRaWAN, se emplea la biblioteca "`lmic.h`", la cual permite configurar los parámetros descritos en la Tabla 3.17 y gestionar la transmisión de datos mediante este protocolo.

Asimismo, para la adquisición de datos de los sensores se utilizan las bibliotecas "`Plantower_PMS7003.h`" y "`DHT.h`", encargadas de la lectura del sensor de material particulado PMS7003 y del sensor de temperatura y humedad DHT22, respectivamente. Estas bibliotecas facilitan la integración de los dispositivos y la obtención de mediciones de las variables ambientales.

La Figura 3.31 presenta el diagrama de flujo de la estación de monitoreo. En este se muestra la secuencia de ejecución del programa, que comprende la inicialización de las bibliotecas, la configuración de las credenciales de conexión, la adquisición de los datos provenientes de los sensores y su posterior transmisión al servidor de The Things Network (TTN).

Tabla 3.18*Bibliotecas utilizadas en la programación de la estación.*

Biblioteca	Función
<code>lmic.h</code>	Implementación del protocolo LoRaWAN (LMIC).
<code>Plantower_PMS7003.h</code>	Lectura del sensor de material particulado PMS7003.
<code>DHT.h</code>	Lectura del sensor de temperatura y humedad DHT22.

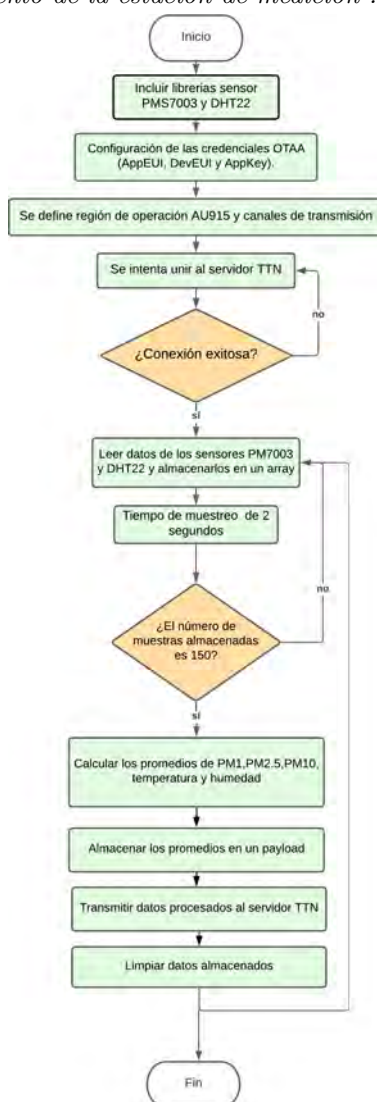
Nota. Elaboración propia.

3.7.4.2. Diagrama de flujo

El diagrama describe el funcionamiento básico de la estación de medición. Primero se cargan las librerías de los sensores PMS7003 y DHT22, se configuran las credenciales OTAA y se define la región AU915 con sus canales. Luego el nodo intenta unirse al servidor TTN; si la conexión es exitosa, comienza a leer datos de partículas, temperatura y humedad cada 2 segundos y los almacena. Cuando se alcanzan 150 muestras, se calculan los promedios, se empaquetan en un payload, se envían al servidor TTN y finalmente se limpia la memoria para iniciar un nuevo ciclo de medición.

Figura 3.31

Diagrama de flujo de funcionamiento de la estación de medición .



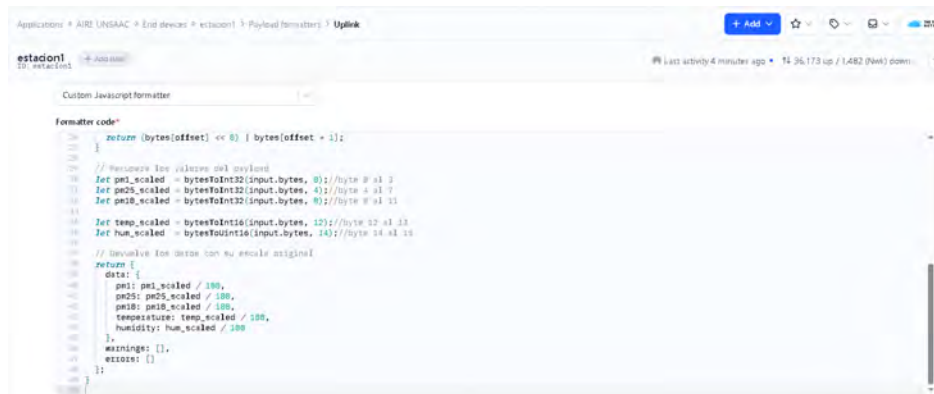
Nota. Elaboración propia.

Una vez recibido el payload por el servidor de The Things Network (TTN),

este es decodificado para reconstruir la información transmitida por la estación de monitoreo. Debido a que todas las estaciones utilizan la misma estructura de datos, se emplea un único payload decoder para procesar la información proveniente de toda la red.

Figura 3.32

Función para decodificar la información recibida.



Nota: Elaboración propia

La Figura 3.33 muestra la interfaz Live data de The Things Network (TTN), en la cual se visualizan en tiempo real los mensajes uplink enviados por la estación de monitoreo. En esta interfaz es posible observar el payload transmitido tanto en formato hexadecimal como en su versión decodificada, mostrando las variables ambientales medidas, como la concentración de material particulado (PM_1 , $PM_{2.5}$ y PM_{10}), la temperatura y la humedad. Asimismo, se presenta información del proceso de recepción y procesamiento de cada mensaje, permitiendo verificar el correcto funcionamiento de la comunicación LoRaWAN entre la estación de monitoreo y el servidor de red.

Figura 3.33

Visualización de los datos recibidos.



Nota: Elaboración propia.

3.8. Diseño e implementación de la interfaz web de usuario

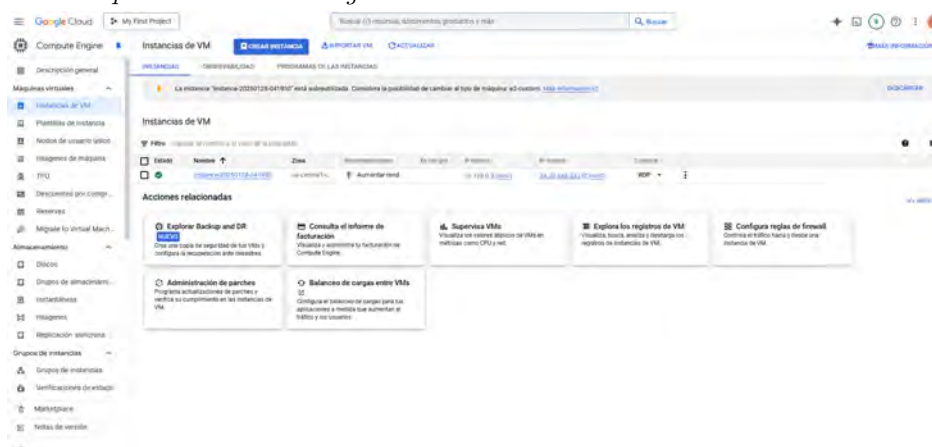
Para la implementación de la plataforma web se utilizará una máquina virtual que alojará los diferentes componentes necesarios para la visualización y almacenamiento de la información.

Google Cloud Platform permite la creación de máquinas virtuales, y en este caso, la máquina virtual alojará los servicios requeridos para el funcionamiento del sistema, incluyendo Node-Red para la gestión y visualización de datos, y PHPMyAdmin como interfaz de administración para el almacenamiento de la información recolectada. Además, se empleará NGINX como servidor web y proxy inverso, permitiendo el acceso al dashboard desarrollado en Node-Red mediante el servicio Compute Engine, lo que facilitara el acceso remoto a la plataforma.

Para este propósito, se configurará una máquina virtual con sistema operativo Windows, proporcionando el entorno necesario para ejecutar los servicios web y de base de datos requeridos, garantizando así la correcta operación y visualización de los datos recolectados.

Figura 3.34

Creación de la maquina virtual en Google Cloud.



Nota. Elaboración propia.

Se utilizará el protocolo de comunicación MQTT, el cual servirá como nexo entre el servidor de red y Node-RED. Este protocolo permitirá que los paquetes de datos recibidos desde las estaciones de medición sean dirigidos a Node-RED, que a su vez se encargará de procesarlos y almacenarlos en la base de datos, gestionada mediante PHPMyAdmin.

3.8.1. Configuración de Node Red

Definido el protocolo de comunicación MQTT, TTN nos proporciona el puerto de comunicación 1883 con la dirección pública `nam1.cloud.thethings.network:1883`. Además, otorga credenciales de acceso para la recepción de información, incluyendo el Username y Password, como se presenta en la Figura 3.35.

Figura 3.35

Plataforma de The Thing Network para la comunicación MQTT.



Nota. Elaboración propia.

Las credenciales obtenidas de TTN se ingresan en Node-Red, permitiendo que el nodo MQTT In reciba los mensajes. Estos mensajes son enviados desde TTN a Node-Red .

Para la identificación de cada estación de medición, se utiliza el tópic (topic), que actúa como un identificador único para cada estación.

Figura 3.36

Configuración del nodo mqtt in.



Nota. Elaboración propia.

3.8.2. Base de datos

El sistema de almacenamiento constituye un pilar fundamental en cualquier arquitectura orientada a la recopilación, ordenamiento y consulta óptima de datos. En el ecosistema del Internet de las Cosas (IoT), la selección del motor de base de datos determina la eficiencia en la estructuración y posterior análisis de las variables medidas. Por lo general, estas tecnologías se dividen en dos grandes vertientes: las soluciones relacionales (MySQL y PostgreSQL), que organizan la información mediante tablas y esquemas predefinidos, y las no relacionales o NoSQL (MongoDB y Cassandra), orientadas a la gestión flexible de registros semiestructurados o carentes de una estructura fija.

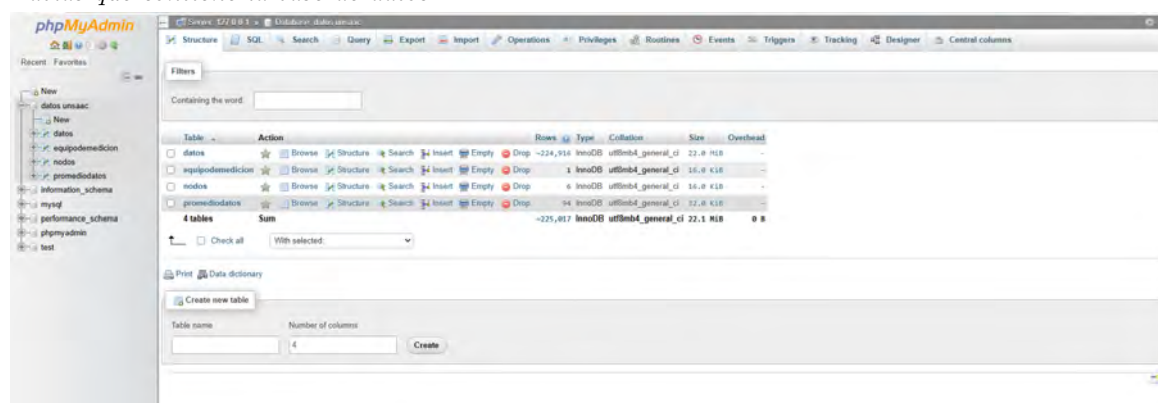
Para el desarrollo de este prototipo se seleccionó MySQL, un gestor relacional de amplio uso en el entorno técnico, complementado con phpMyAdmin para las tareas de administración. La elección de MySQL se fundamenta en su capacidad para almacenar datos de forma matricial y organizada, una característica idónea para registros estructurados que ingresan en intervalos de tiempo constantes. Asimismo, la plataforma phpMyAdmin provee un entorno gráfico intuitivo que agiliza el diseño de las tablas, la ejecución de sentencias SQL y los procesos de migración o respaldo de la información.

3.8.2.1. Creación de la base de datos

Se implementó una base de datos llamada “datos unsaac”, que contiene las tablas descritas a continuación.

Figura 3.37

Tablas que contiene la base de datos.



Nota. Elaboración propia.

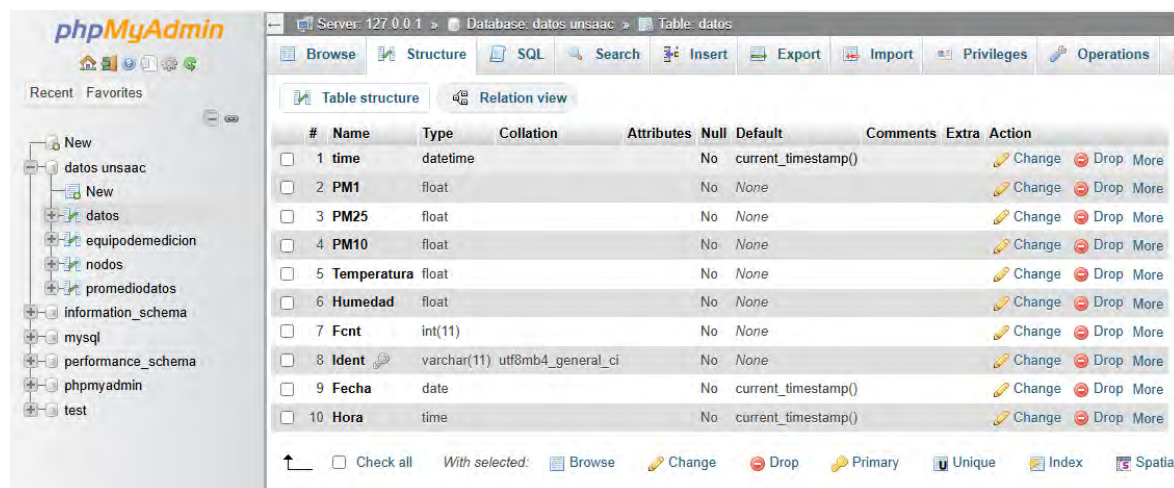
La tabla denominada “datos” almacena las variables recolectadas, las cuales se obtienen mediante el flujo presentado en la Figura 3.39. A través del nodo MQTT in de Node-RED, se reciben los datos provenientes de las estaciones de monitoreo mediante el servidor de red de TTN, permitiendo su integración continua en el sistema.

Asimismo, dicho flujo permite realizar la corrección de las mediciones de $PM_{2.5}$ mediante la aplicación de la ecuación de calibración correspondiente a cada estación, cuyos coeficientes se presentan en la Tabla 4.9. Una vez corregidos, los valores son procesados y posteriormente almacenados en la base de datos para su análisis.

Finalmente, la Tabla 3.38 presenta las variables que se registran y almacenan en el sistema.

Figura 3.38

Estructura de la tabla “datos”.



#	Name	Type	Collation	Attributes	Null	Default	Comments	Extra	Action
1	time	datetime			No	current_timestamp()			Change Drop More
2	PM1	float			No	None			Change Drop More
3	PM25	float			No	None			Change Drop More
4	PM10	float			No	None			Change Drop More
5	Temperatura	float			No	None			Change Drop More
6	Humedad	float			No	None			Change Drop More
7	Fcnt	int(11)			No	None			Change Drop More
8	Ident	varchar(11)	utf8mb4_general_ci		No	None			Change Drop More
9	Fecha	date			No	current_timestamp()			Change Drop More
10	Hora	time			No	current_timestamp()			Change Drop More

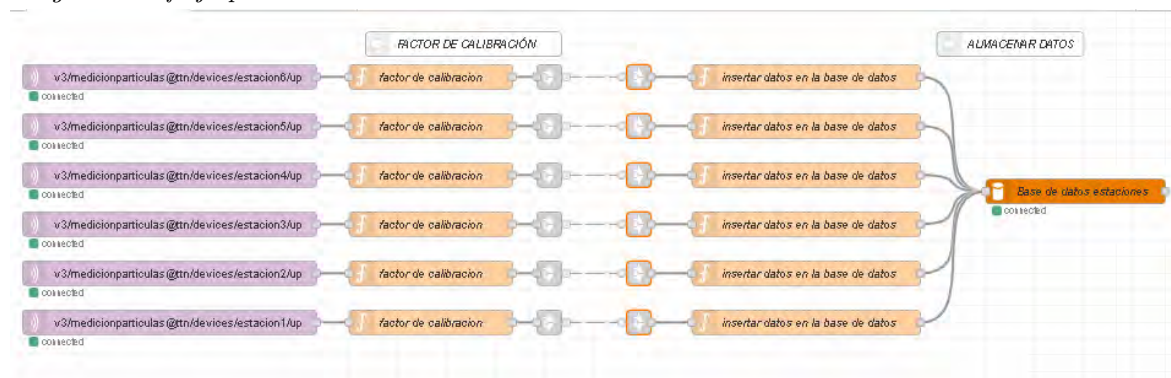
Nota. Elaboración propia.

Además de las variables medidas, se almacena el valor de $FCnt$, el cual sirve como contador de mensajes. Dicho contador se incrementa en uno con cada envío realizado con éxito, lo que permite llevar un registro secuencial de los datos recibidos y facilita su identificación y seguimiento en el sistema.

El siguiente flujo se encarga de almacenar los datos medidos de las variables, destacando que a la variable $PM_{2.5}$ se le aplica el factor de corrección definido dentro del código JavaScript (Nodo que aplica el modelo de corrección sobre $PM_{2.5}$), como se muestra en la Figura 3.39.

Figura 3.39

Diagrama de flujo para el almacenamiento de datos en la tabla “datos”.



Nota. Elaboración propia.

La Tabla 3.40 se encarga de almacenar los valores promedio diarios de las variables monitoreadas. Estos promedios son fundamentales para la evaluación de la calidad del aire, ya que los estándares y criterios de clasificación se basan en concentraciones medias calculadas a lo largo de un día completo.

Figura 3.40

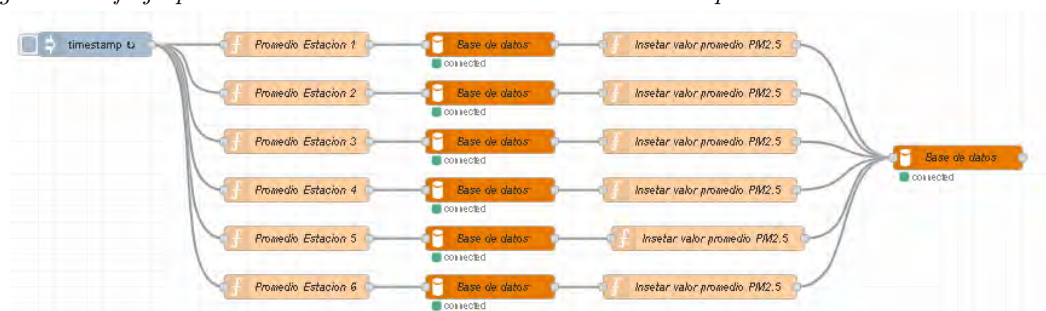
Estructura de la base de datos denominada “promediodatos”.

#	Name	Type	Collation	Attributes	Null	Default	Comments	Extra	Action
1	Time	datetime			No	None			Change Drop More
2	avgPM1	float			No	None			Change Drop More
3	avgPM25	float			No	None			Change Drop More
4	avgPM10	float			No	None			Change Drop More
5	avgTemp	float			No	None			Change Drop More
6	avgHum	float			No	None			Change Drop More
7	Ndatos	float			No	None			Change Drop More
8	Estacion	varchar(11)	utf8mb4_general_ci		No	None			Change Drop More

Nota. Elaboración propia.

Figura 3.41

Diagrama de flujo para el almacenamiento de datos en la tabla “promediodatos”.



Nota. Elaboración propia.

El flujo se inicia mediante un nodo **inject**, el cual se activa automáticamente cada 24 horas. Este nodo habilita al nodo “Promedio estacion x”, donde x representa a cada estación que contiene una función en JavaScript encargada de ejecutar una consulta SQL.

Dicha consulta se realiza sobre la tabla **Datos**, y permite calcular el promedio de las variables medidas durante un día calendario completo (desde las 00:00 hasta las 23:59). Las variables consideradas en el cálculo son las siguientes:

Tabla 3.19

Variables consideradas en el cálculo del promedio diario.

N°	Variable
1	PM _{1.0}
2	PM _{2.5}
3	PM ₁₀
4	Temperatura
5	Humedad

Nota. El promedio se calcula sobre un día calendario completo (00:00 a 23:59).

Los valores promedio obtenidos son enviados a un nodo **MySQL**, que ejecuta la consulta y retorna los resultados.

3.8.3. Instalación del servidor web Nginx

Para facilitar la visualización de la plataforma web desarrollada, se empleó el servidor Nginx como proxy inverso, actuando como intermediario entre los clientes y los servidores web. Esta configuración permite que cualquier usuario, desde un dispositivo móvil, computadora o laptop, pueda acceder al sistema desde cualquier ubicación con conexión a Internet. El acceso se realiza mediante la dirección <http://34.122.24.93/ui/#!/1?socketid=qOuWbBd6zEpEulZEAAD1>, que dirige al panel de control (*dashboard*) de Node-RED. De este modo, Nginx facilita la accesibilidad a los servicios web, cumpliendo su función de enlace entre el cliente y el servidor.

3.8.3.1. Plataforma web IoT

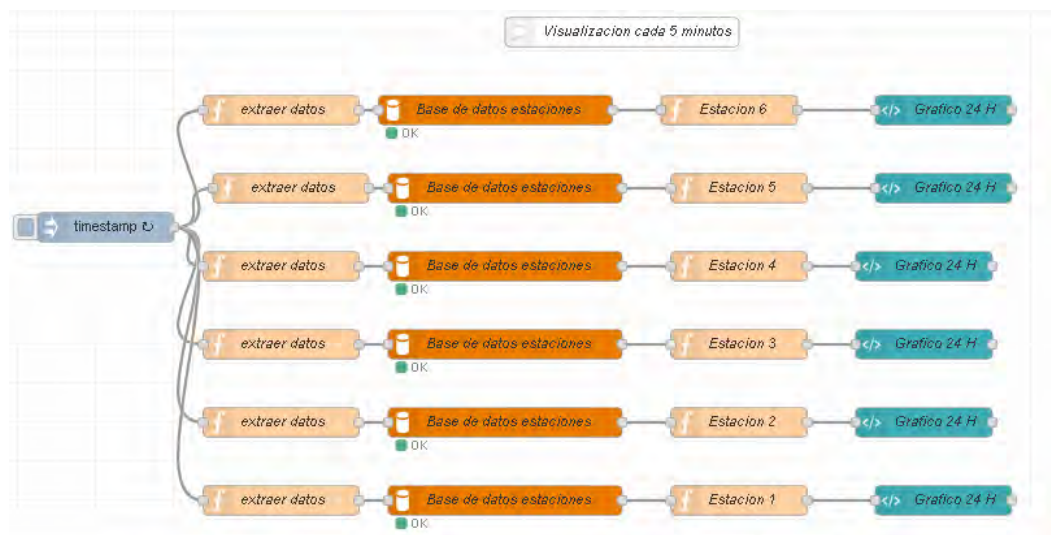
Node-Red, además de permitir la interacción con The Thing Network(TTN) y el almacenamiento de información en una base de datos, ofrece la posibilidad de visualizar los datos mediante su módulo de interfaz gráfica denominado node-red-dashboard.

La Figura 3.42 muestra el flujo implementado en Node-RED para la extracción, procesamiento y visualización de los datos de $PM_{2.5}$. En este flujo, la actualización de la información se realiza cada 5 minutos. El proceso inicia con un nodo *timestamp*, encargado de ejecutar automáticamente una consulta cada 30 minutos a la base de datos, solicitando los registros correspondientes a las últimas 24 horas.

Posteriormente, la base de datos devuelve la información almacenada, la cual es procesada y filtrada para obtener únicamente los valores de $PM_{2.5}$ de cada estación de monitoreo. Finalmente, los datos procesados son enviados a un nodo de nombre “Gráfico 24H”, que permite generar la representación gráfica de la información en el dashboard para su visualización.

Figura 3.42

Flujo de procesamiento y visualización de datos cada 5 minutos en Node-RED para las estaciones de monitoreo de calidad del aire.



Nota. Elaboración propia.

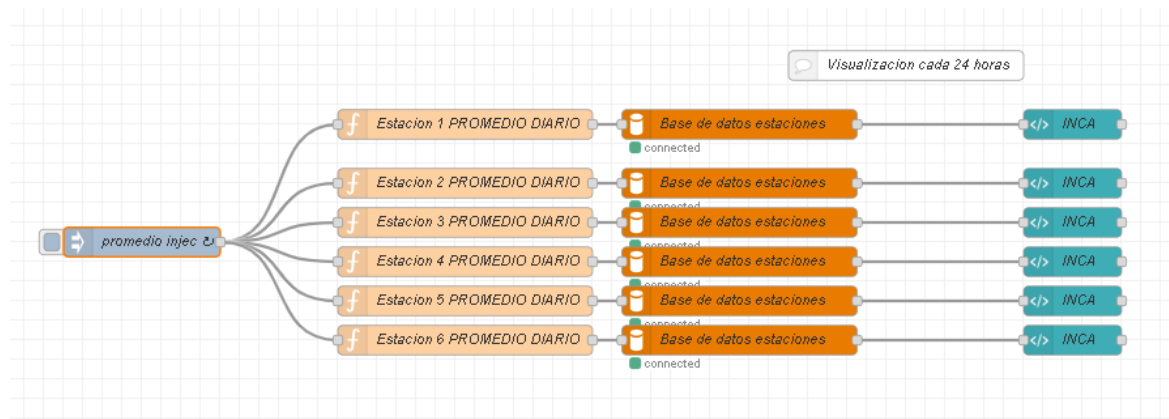
Ahora, el siguiente flujo permite extraer y visualizar los datos promedio de $PM_{2.5}$ correspondientes a las últimas 24 horas de monitoreo. El proceso inicia con un nodo de activación, encargado de ejecutar automáticamente la consulta hacia la base de datos. Dicha consulta solicita los valores promedio diarios obtenidos durante las 24 horas de medición.

Una vez realizada la consulta, la base de datos devuelve la información almacenada, la cual es enviada al nodo final denominado “INCA”, encargado de la visualización de los datos. Este nodo no solo permite representar gráficamente las concentraciones mediante barras, sino también clasificar automáticamente los valores de acuerdo con los índices de calidad del aire, facilitando la interpretación del nivel de contaminación.

registrado en cada estación de monitoreo.

Figura 3.43

Flujo de procesamiento y visualización de datos cada 24 horas en Node-RED para las estaciones de monitoreo de calidad del aire.



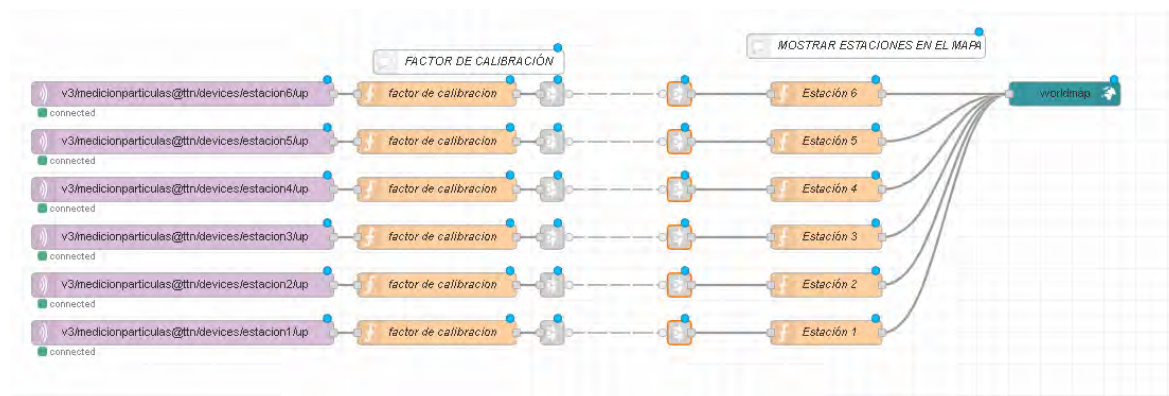
Nota. Elaboración propia.

Para el proceso de visualización de la ubicación de las estaciones de monitoreo dentro del campus universitario se utilizó el nodo *worldmap* de Node-RED. En este caso, se optó por mostrar directamente los valores de $PM_{2.5}$ luego de aplicar la ecuación de calibración correspondiente.

La Figura 3.45 muestra el resultado de este flujo, donde se observa la ubicación de las seis estaciones de monitoreo implementadas en el campus universitario. Además, el mapa permite visualizar los valores registrados de temperatura, humedad y concentración de $PM_{2.5}$ para cada estación, facilitando la supervisión espacial de la calidad del aire en tiempo real.

Figura 3.44

Flujo de procesamiento y visualización de la ubicación de las estaciones de monitoreo de calidad del aire.



Nota. Elaboración propia.

Finalmente se muestra, la plataforma web IoT desarrollada utilizando Node-Red.

Figura 3.45

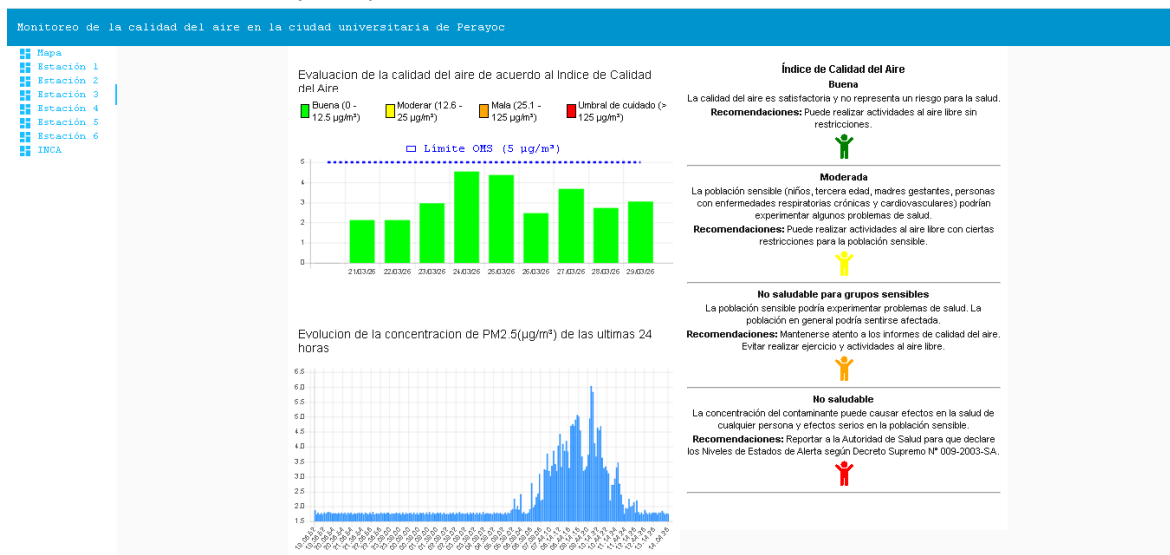
Ubicación de las estaciones de monitorio.



Nota. Elaboración propia.

Figura 3.46

Visualización de la data y clasificación de la calidad del aire.



Nota. Elaboración propia.

La Figura 3.46 tiene como propósito principal clasificar la calidad del aire, indicando su estado según el índice correspondiente. Este índice recalca que, para una

evaluación adecuada, se requieren mediciones continuas durante un período de 24 horas. En la parte inferior de la figura, se presenta la evolución o comportamiento de la contaminación a lo largo del tiempo.

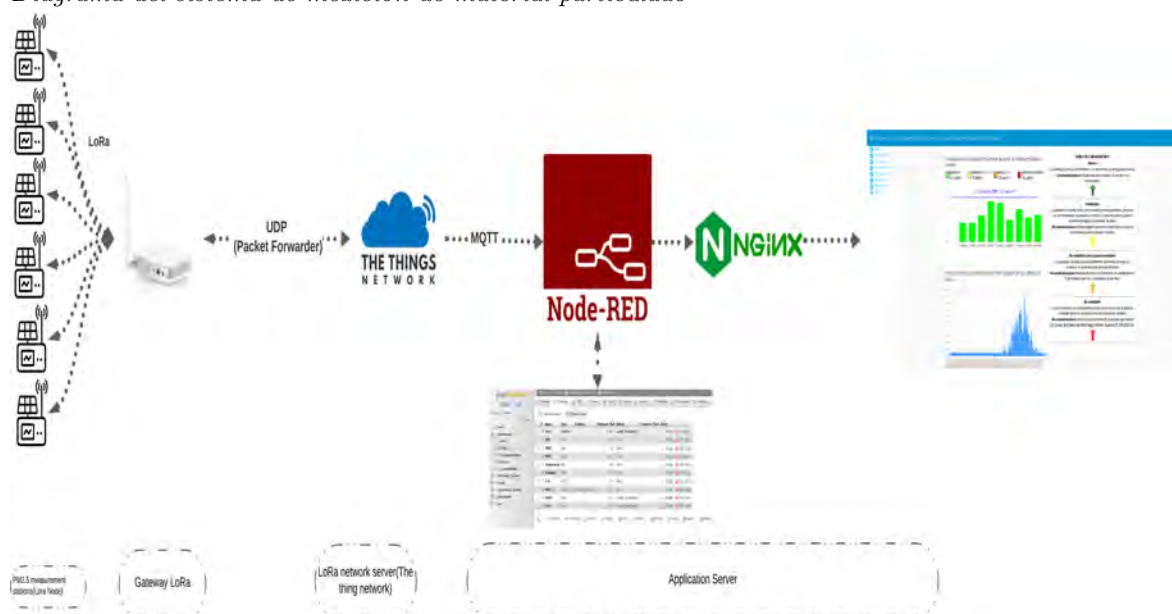
Además, se muestran las recomendaciones correspondientes de acuerdo con el estado de la calidad del aire: buena, moderada, mala o en nivel de cuidado. Estas recomendaciones se establecen en función del valor registrado, permitiendo orientar acciones según el nivel de contaminación.

3.9. Esquema general del sistema a desplegar

En la Figura 3.47 se muestra la arquitectura de la red LoRaWAN. Además, se ilustran los protocolos de comunicación empleados en cada etapa del sistema: LoRa se utiliza para la transmisión inalámbrica entre los nodos y el gateway, UDP para el envío de paquetes desde el gateway hacia el servidor de red, y MQTT para la distribución de la información en la base de datos, así como para la visualización de los datos en la aplicación final.

Figura 3.47

Diagrama del sistema de medición de material particulado



Nota. Elaboración propia.

Capítulo IV

Pruebas y resultados

4.1. Calibración de los sensores de medición de PM_{2.5}

La calibración de las estaciones de medición se realizó utilizando un equipo de referencia que emplea un método equivalente basado en la dispersión de luz para la medición de material particulado, instalado en el Centro de Monitoreo de Seguridad Ciudadana del distrito de Santiago.

Para este proceso se siguieron las recomendaciones de la EPA para la colocación de sensores, ubicándolos a la misma altura y a una distancia horizontal menor a 20 metros del equipo de referencia, con el objetivo de asegurar una comparación óptima de los datos, además de otras consideraciones que se describen en la Tabla 4.2.

El equipo de referencia utilizado corresponde al monitor Dust Sentry PCX , el cual cuenta con un Certificado de Conformidad de Producto (MCERTS) emitido en el Reino Unido. Dicho certificado forma parte del esquema MCERTS de la Environment Agency, administrado por CSA Group y acreditado por UKAS, y valida que el instrumento cumple con estándares específicos de calidad y desempeño para la medición indicativa de material particulado en aire ambiente.

Tabla 4.1

Certificación MCERTS y rangos de medición del Dust Sentry PCX.

Equipo		Certificación	Rangos certificados
Dust Sentry PCX		MCERTS para monitor indicativo de PM _{2.5} y PM ₁₀ en aire ambiente (Environment Agency, Reino Unido)	PM _{2.5} : 0–75 µg/m ³ ; PM ₁₀ : 0–150 µg/m ³

Nota. Elaboración propia.

Figura 4.1

Equipo Dust Sentry PCX.



Nota. Adaptado de (Taylor et al., 2024).

Tabla 4.2

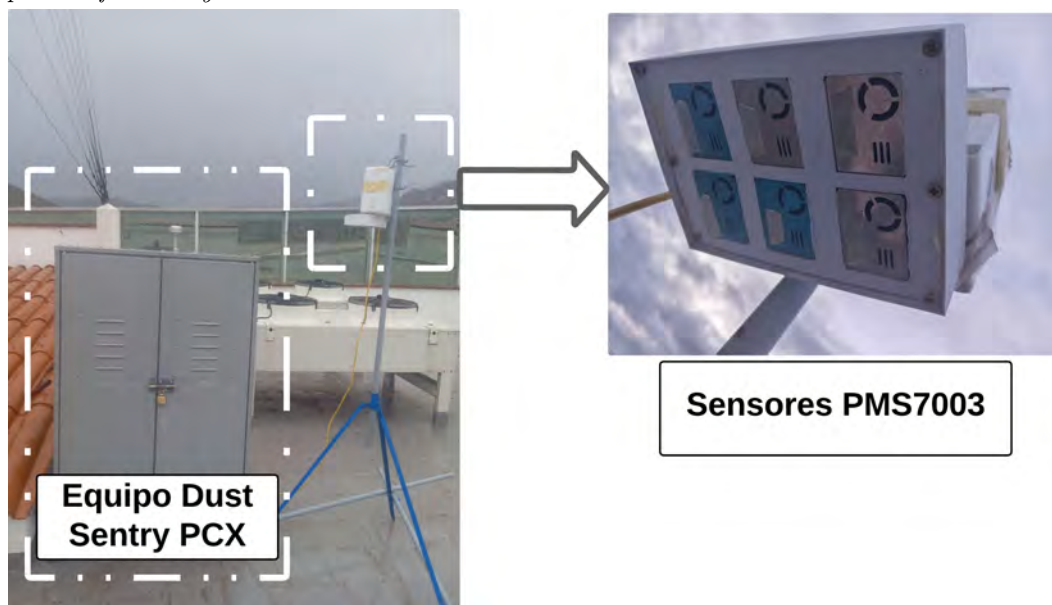
Recomendaciones para la instalación de sensores.

Recomendaciones
■ Instalar los sensores a una distancia horizontal menor a 20 metros respecto al equipo de referencia. ■ Ubicar los sensores en zonas con circulación de aire libre y sin obstrucciones. ■ Verificar que la entrada de muestreo de aire de los sensores se encuentre dentro de un rango vertical de ± 1 metro respecto a la entrada del equipo de referencia. ■ En caso de requerirse protección ambiental, emplear refugios o recintos que permitan una adecuada ventilación alrededor del sensor.

Nota. Adaptado de (Duvall et al., 2021).

Figura 4.2

Equipo de referencia y sensores PMS7003.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.3

Parte interna de la estación de referencia.



Nota. Elaboración propia.

4.1.0.1. Configuración experimental del arreglo de sensores para la calibración

En el proceso de calibración, la agrupación de los sensores para la evaluación de su comportamiento se realizó en una configuración matricial, tomando como referencia el estudio de (Badura et al., 2018), en el cual se organizaron 12 sensores en una matriz de 3×4 con la finalidad de analizar su desempeño comparativo bajo las mismas condiciones ambientales.

En el presente caso, se conformó una matriz de 3×2 para la implementación del sistema, para lo cual se diseñó y fabricó un case que permitió alojar y proteger los seis sensores, asegurando una disposición homogénea y condiciones de exposición similares.

Figura 4.4

Conformación matricial del conjunto de sensores PMS7003.



Nota. Elaboración propia.

4.2. Recolección de datos

4.2.1. Muestreo y resolución temporal de las mediciones de $PM_{2.5}$

En la realización del muestreo de material particulado $PM_{2.5}$ se han empleado tiempos de adquisición que varían entre 2 y 150 segundos en diferentes estudios. En el trabajo reportado en (Patel et al., 2024) se consideró un tiempo de muestreo de 8 segundos, mientras que en la investigación presentada en (Aix et al., 2023) se utilizó un intervalo de 150 segundos (2 minutos con 30 segundos).

Asimismo, (Badura et al., 2018) trabajó con una resolución temporal de 2 segundos, promediando posteriormente las mediciones en intervalos de 1 minuto. Mediante esta metodología de muestreo se obtuvo un alto coeficiente de correlación con el equipo de referencia, lo que evidencia la confiabilidad del enfoque adoptado.

La alta frecuencia de adquisición permite alcanzar un elevado nivel de resolución temporal gracias a la gran cantidad de datos recolectados, lo que facilita una mejor caracterización de las variaciones dinámicas de la concentración de $\text{PM}_{2.5}$ y mejora la representatividad de los valores promediados. Considerando estos antecedentes, en el presente trabajo se optó por un tiempo de muestreo de 2 segundos, acumulando 150 muestras consecutivas para obtener un dato promedio representativo de la concentración instantánea de $\text{PM}_{2.5}$.

Tabla 4.3

Configuración del tiempo de muestreo y envío de datos.

Etapas	Tiempo de muestreo	Cantidad de datos acumulados	Intervalo de envío
Proceso de calibración	2 segundos	150 muestras	5 minutos
Despliegue en campo	2 segundos	150 muestras	5 minutos

Nota. Elaboración propia.

4.2.2. Obtención de datos del equipo de referencia Dust Sentry

La recolección de datos con el equipo de referencia Dust Sentry se realizó considerando su capacidad para reportar concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en distintos intervalos de tiempo: 5 minutos, 10 minutos, 1 hora, 5 horas y 24 horas.

Tomando en cuenta estos intervalos de obtención de datos, para el proceso de calibración se seleccionó el intervalo de 5 minutos. Esta elección permitió contar con un mayor número de registros, mejorando la resolución temporal del análisis y facilitando la comparación directa con las mediciones obtenidas por los sensores de bajo costo.

Posteriormente, se elaboró un gráfico de dispersión con el objetivo de evaluar el comportamiento de los sensores frente al equipo de referencia y analizar su grado de correlación. Este análisis permitió identificar posibles desviaciones sistemáticas y establecer un modelo de ajuste orientado a mejorar la precisión de las mediciones.

4.2.3. Evaluación y limpieza de datos de calibración

Inicialmente se determina la cantidad de datos recolectados en el proceso de calibración, que tuvo una duración de 37 días.

Tabla 4.4

Cantidad de datos válidos de $PM_{2.5}$ a resolución temporal original (cada 5 minutos).

Variable	Cantidad de datos válidos
$PM_{2.5}$ de referencia	10 321
Sensor 1 $PM_{2.5}$	10 315
Sensor 2 $PM_{2.5}$	10 315
Sensor 3 $PM_{2.5}$	10 315
Sensor 4 $PM_{2.5}$	10 315
Sensor 5 $PM_{2.5}$	10 315
Sensor 6 $PM_{2.5}$	10 315
Filas completas (referencia + 6 sensores)	10 310

Nota. Elaboración propia.

Tabla 4.5

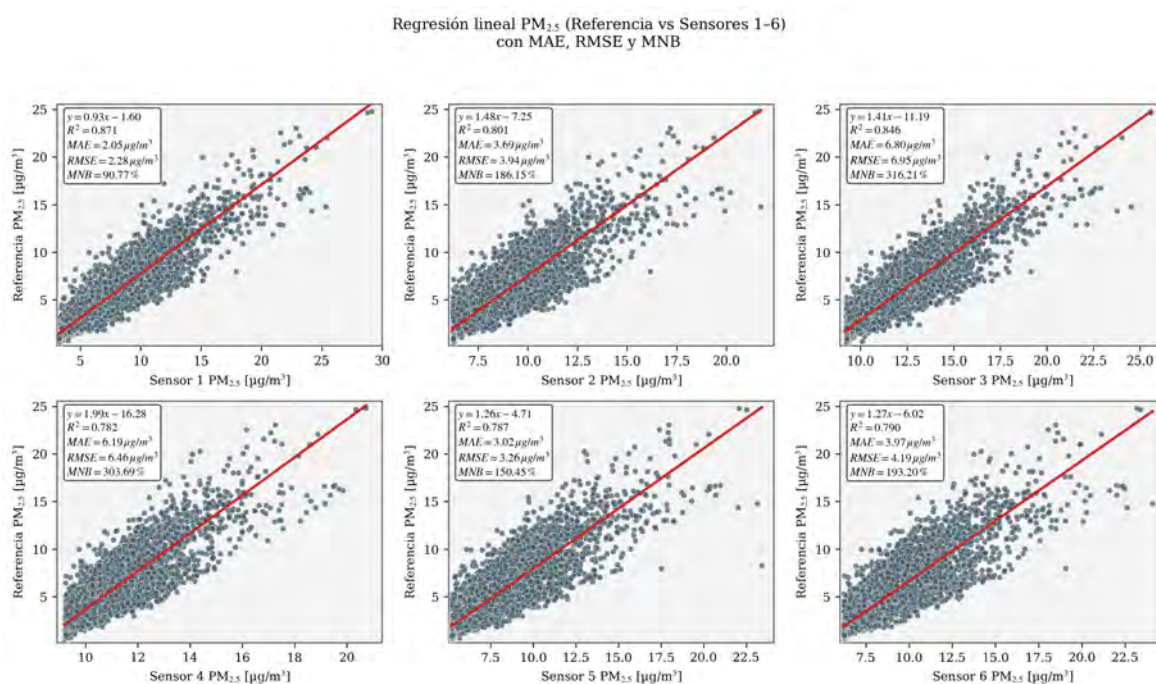
Cantidad de promedios diarios (24 h) de $PM_{2.5}$ procesados.

Descripción	Cantidad
Número de días con promedio de 24 h válido (referencia + seis sensores)	37

Nota. Los promedios diarios se calcularon a partir de los datos con resolución temporal original, agrupados por fecha.

Figura 4.5

Gráfico de dispersión.



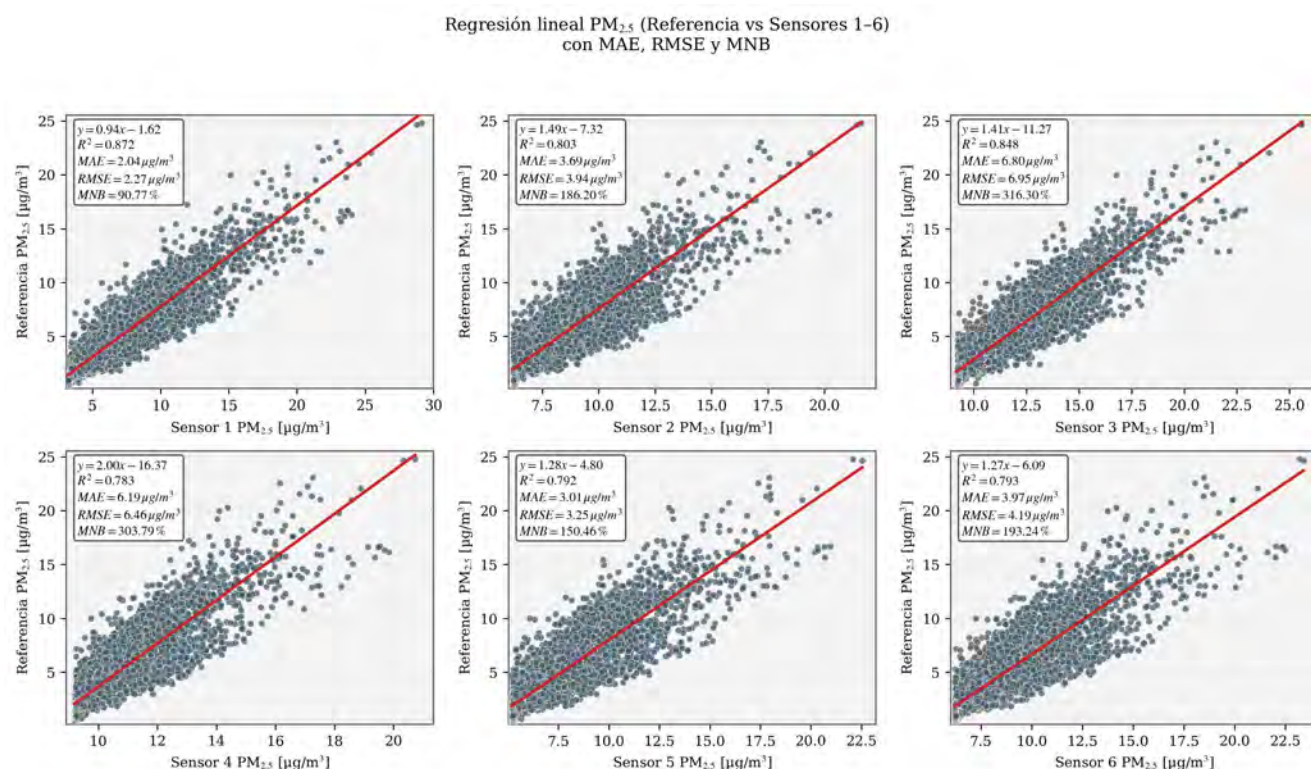
Nota. Elaboración propia.

A partir del análisis de las métricas de evaluación y del gráfico de dispersión, se identificaron observaciones atípicas que no siguen la tendencia definida por la recta de ajuste. En particular, los sensores 5 y 6 presentan varios puntos claramente alejados de la recta de regresión mostrada en la Figura 4.5, lo que evidencia que dichas mediciones no mantienen una relación consistente con el comportamiento esperado del modelo.

Este tipo de valores afecta la calidad del ajuste estadístico y puede generar interpretaciones erróneas sobre la relación entre las variables analizadas. Por lo tanto, estos datos no deben ser considerados en el análisis, ya que corresponden a valores atípicos (outliers) que no representan adecuadamente el desempeño real de los sensores.

Figura 4.6

Gráfico de dispersión sin valores atípicos.



Nota. Elaboración propia.

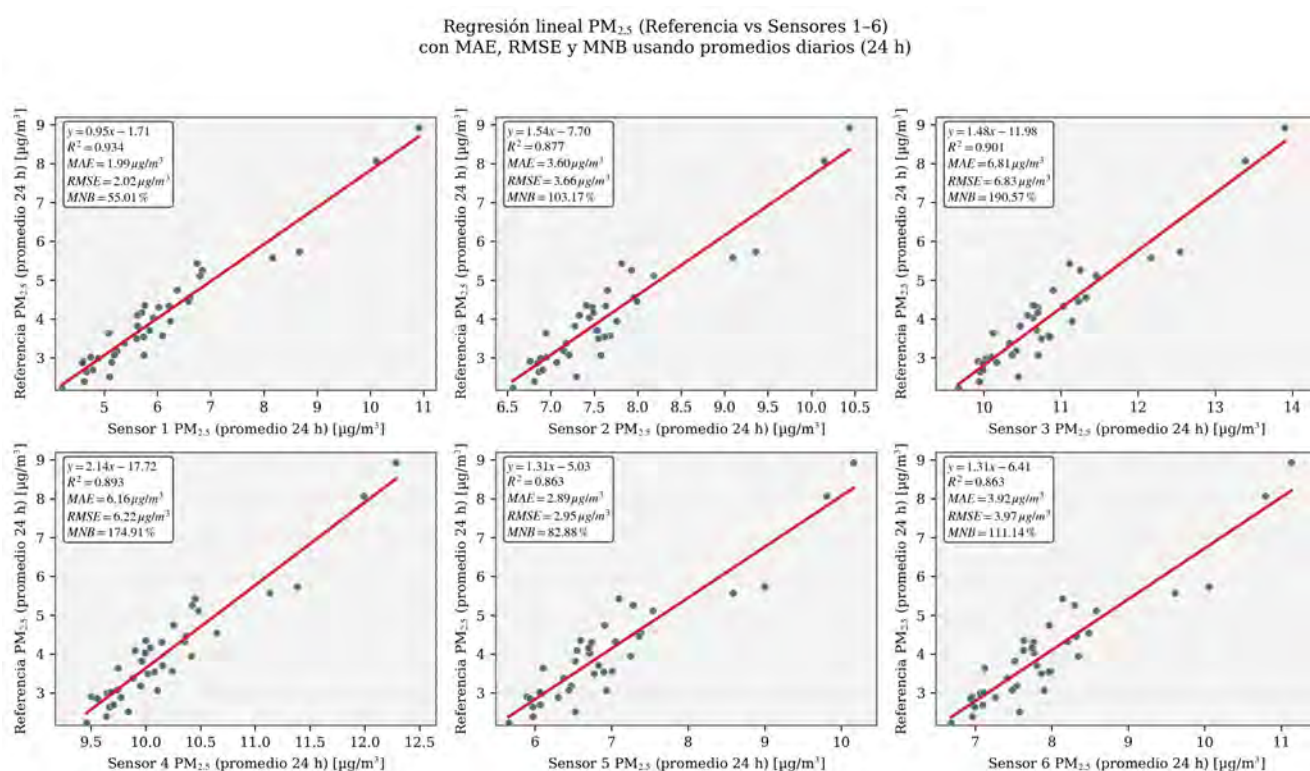
Obtenido el gráfico de dispersión luego del proceso de limpieza de datos, se presenta la Figura 4.6, en la cual ya no se observan valores atípicos evidentes que distorsionen la relación entre la concentración de $PM_{2.5}$ medida por la estación de referencia y los sensores de bajo costo.

4.3. Evaluación de métricas EPA

Para analizar el comportamiento de los sensores en relación con el equipo de referencia se empleó un gráfico de dispersión, el cual permite visualizar la relación entre ambas mediciones y detectar posibles patrones o valores atípicos. Además, se calcularon métricas de evaluación (R^2 , MAE, RMSE y MNB) con el fin de estimar el desempeño individual y conjunto de los sensores participantes se evalúa cada 24 horas. (Duvall et al., 2021)

Figura 4.7

Gráfico de dispersión.



Nota. Elaboración propia.

En primer lugar, el grado de relación lineal simple entre cada sensor y el equipo de referencia se evaluó mediante el coeficiente de determinación R^2 . En la Tabla 4.6 se muestra que R^2 varía aproximadamente entre 0.86 y 0.93, lo que indica que entre el 86 % y el 93 % de la variabilidad de las mediciones del equipo de referencia puede explicarse por las lecturas de los sensores, cuando se consideran promedios diarios de 24 h.

El error absoluto medio (MAE) cuantifica la desviación promedio entre las mediciones obtenidas por cada sensor y el valor registrado por el equipo de referencia.

La Figura 4.7 se observa que el sensor 1 presenta una nube de puntos estrechamente alineada con los datos de referencia y sin valores atípicos significativos, lo que se refleja en un MAE cercano a $2.00 \mu\text{g}/\text{m}^3$, indicando una buena precisión en sus mediciones. Por otro lado, los sensores 3 y 4 muestran una mayor dispersión de los datos respecto a la línea de referencia, obteniendo valores de MAE de aproximadamente 6.81 y $6.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Esta mayor dispersión observada en los gráficos evidencia errores más elevados y, por consiguiente, una desviación promedio mayor respecto a las concentraciones medidas por el equipo de referencia.

El RMSE, por su parte, es una métrica sensible a errores de gran magnitud, debido a que se calcula a partir del cuadrado de las diferencias entre las mediciones del sensor y los valores de referencia. En los gráficos de dispersión se observa que, en general, las mediciones de los sensores se distribuyen próximas a la recta de regresión, lo que se refleja en valores de RMSE moderados, comprendidos entre 2.02 y $6.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$. El sensor 1 presenta el menor valor de RMSE, evidenciando un mejor ajuste respecto al equipo de referencia, mientras que el sensor 3 registra el valor más elevado.

Finalmente, el sesgo medio normalizado (MNB) proporciona una medida relativa del sesgo sistemático de los sensores respecto al equipo de referencia, indicando si tienden a sobreestimar o subestimar las concentraciones. En esta evaluación, los seis sensores presentan valores positivos de MNB, en un rango aproximado de 55.02 % a 190.57 %, lo que indica una sobreestimación sistemática de las concentraciones de PM_{2.5} respecto al equipo de referencia.

Tabla 4.6

Desempeño de los sensores de PM_{2.5} respecto al equipo de referencia (promedios diarios de 24 h).

Sensor	Ecuación de regresión	R ²	MAE [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	RMSE [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	MNB [%]
1	$y = 0,95x - 1,71$	0.934	1.99	2.02	55.02
2	$y = 1,54x - 7,70$	0.877	3.60	3.66	103.17
3	$y = 1,48x - 11,98$	0.901	6.81	6.83	190.57
4	$y = 2,14x - 17,72$	0.893	6.16	6.22	174.91
5	$y = 1,31x - 5,03$	0.863	2.89	2.95	82.88
6	$y = 1,31x - 6,41$	0.863	3.92	3.97	111.14

Nota. Elaboración propia a partir de la regresión lineal entre los promedios diarios (24 h) de PM_{2.5} de la estación de referencia y de los seis sensores de bajo costo.

La siguiente tabla, asociada al gráfico de la Figura 4.7, evalúa el comportamiento de los sensores bajo condiciones similares, en las cuales los valores esperados deberían ser cercanos entre sí y presentar baja dispersión. En este caso, se obtuvo un coeficiente de variación (CV) de 21.08, lo que indica que, bajo las mismas condiciones, los sensores

no entregan valores similares o próximos, tal como se evidencia en la Tabla 4.8. Asimismo, se observa que el valor mínimo medido por el equipo de referencia es $2.23 \mu g/m^3$ de $PM_{2.5}$, mientras que los sensores registran valores mínimos de 4.21; 6.56; 9.46; 5.66 y $6.69 \mu g/m^3$, lo que pone en evidencia la falta de homogeneidad en las mediciones. Estos resultados reflejan la necesidad de realizar un adecuado proceso de calibración y ajuste de las mediciones de los sensores, con el fin de mejorar técnicamente la calidad y la confiabilidad de los datos obtenidos.

Tabla 4.7

Indicadores estadísticos de precisión y sesgo obtenidos.

Indicador	Valor
SD grupo ($\mu g/m^3$)	1.738
CV grupo (%)	21.08
MNB grupo (%)	119.61

Nota. Elaboración propia.

Tabla 4.8

Valores mínimos y máximos de las concentraciones promedio diarias de $PM_{2.5}$ registradas por los sensores y el equipo de referencia durante el mismo periodo de evaluación.

Sensor	Mínimo ($\mu g/m^3$)	Máximo ($\mu g/m^3$)
Sensor 1 $PM_{2.5}$	4.21	10.91
Sensor 2 $PM_{2.5}$	6.56	10.44
Sensor 3 $PM_{2.5}$	9.67	13.90
Sensor 4 $PM_{2.5}$	9.46	12.29
Sensor 5 $PM_{2.5}$	5.66	10.16
Sensor 6 $PM_{2.5}$	6.69	11.13
Equipo de referencia $PM_{2.5}$	2.23	8.92

Nota. Elaboración propia.

4.3.1. Coeficientes del modelo de regresión lineal empleado para la calibración de las mediciones de $PM_{2.5}$ de cada sensor respecto al equipo de referencia

A partir de la ecuación de regresión obtenida en la Tabla 4.6, mediante el ajuste lineal entre las mediciones de cada sensor y el equipo de referencia, el modelo de calibración adoptado se expresa de la siguiente manera:

$$Y_{PM_{2.5}, \text{calibrado}} = a \cdot \bar{X}_{\text{sensor}} + b \quad (\text{IV.1})$$

donde:

- $Y_{\text{PM}_{2.5}, \text{calibrado}}$: Concentración calibrada de $\text{PM}_{2.5}$.
- $\bar{X}_{\text{sensor}}$: Concentración promedio de $\text{PM}_{2.5}$ medida por el sensor de la estación.
- a : Pendiente de la recta de regresión, que representa el factor de corrección multiplicativo.
- b : Intercepto del modelo de regresión, que representa el término de corrección aditivo.

Tabla 4.9

Coeficientes del modelo de regresión lineal para cada sensor de $\text{PM}_{2.5}$.

Sensor	a (pendiente)	b (intercepto)
1	0.95	-1.71
2	1.54	-7.70
3	1.48	-11.98
4	2.14	-17.72
5	1.31	-5.03
6	1.31	-6.41

Nota. Elaboración propia.

4.4. Evaluación de las mediciones calibradas de PM_{2.5} respecto al equipo de referencia

4.4.1. Métricas de evaluación EPA

Una vez obtenida la ecuación de calibración, se procede a corregir los datos registrados por los sensores de medición. Con estos valores corregidos, se aplica una regresión lineal simple con el fin de evaluar la relación entre las mediciones obtenidas y los valores de referencia proporcionados por el equipo Dust Sentry.

En este análisis, la variable independiente (x) corresponde a los datos del equipo de referencia Dust Sentry, mientras que la variable dependiente (y) representa los datos corregidos de las estaciones. (Clements et al., 2022). La regresión lineal simple se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$y = mx + b \tag{IV.2}$$

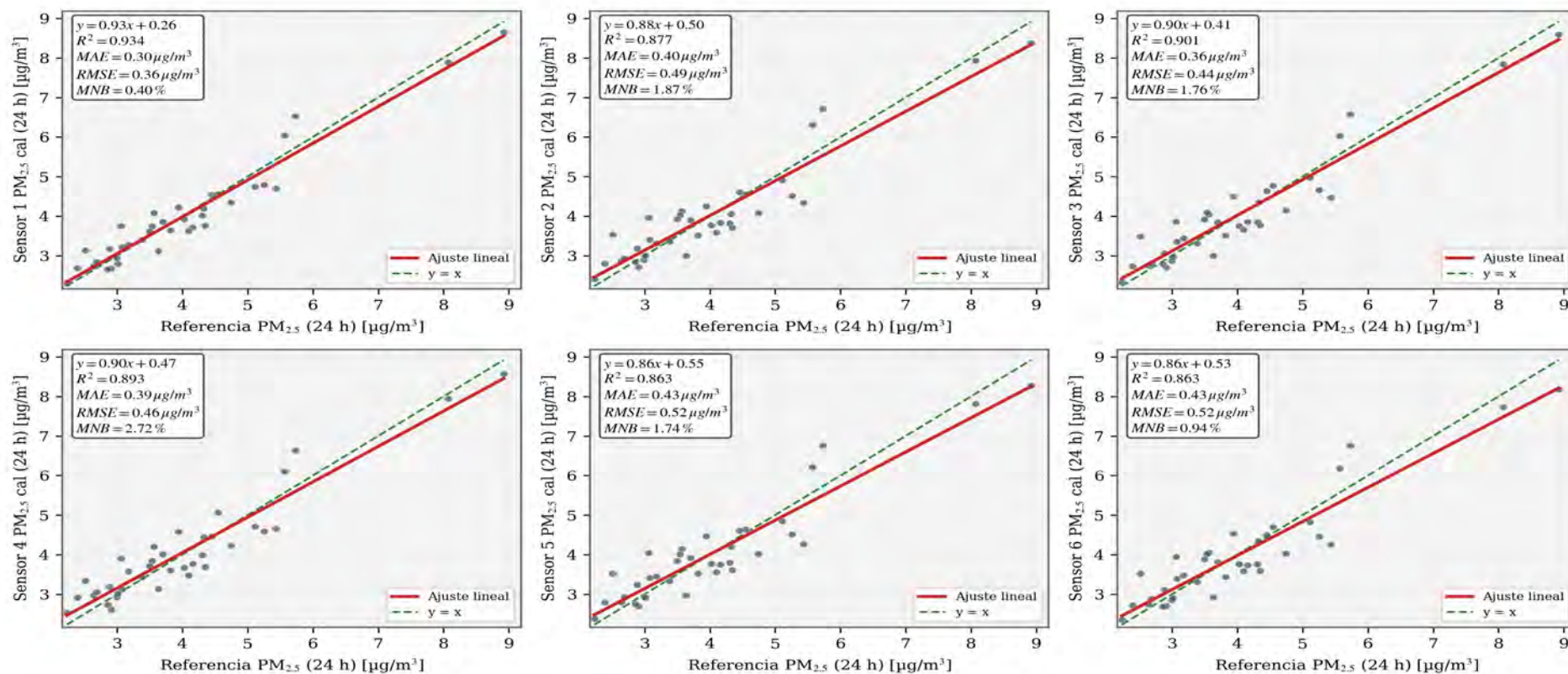
donde:

- y : valor estimado por el sensor,
- x : valor registrado por el equipo Dust Sentry,
- m : pendiente de la recta de regresión,
- b : intercepto.

Figura 4.8

Diagrama de dispersión con resolución temporal de 24 h para evaluación de métricas EPA.

Regresión lineal PM_{2.5} (Referencia vs Sensores calibrados, 24 h)



Nota. Elaboración propia.

Tabla 4.10*Métricas de evaluación por sensor (promedios diarios de 24 h).*

Métrica	Valor recomendado EPA	Sensor					
		1	2	3	4	5	6
Coefficiente de determinación (R^2)	$\geq 0,7$	0.934	0.877	0.901	0.893	0.863	0.863
Error Cuadrático Medio (RMSE) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	≤ 7	0.35	0.49	0.44	0.46	0.52	0.52
Pendiente (m)	$1 \pm 0,35$	0.93	0.88	0.93	0.90	0.86	0.86
Intercepto (b) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	$-5 \leq b \leq 5$	0.26	0.50	0.41	0.47	0.55	0.53
Error Absoluto Medio (MAE) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	–	0.30	0.40	0.36	0.39	0.43	0.43
Sesgo Medio Normalizado (MNB) [%]	–	0.40	1.87	1.76	2.72	1.74	0.94

Nota. Elaboración propia.

- El coeficiente de determinación (R^2) de todas las estaciones supera el valor mínimo recomendado por la EPA ($\geq 0,7$). Los valores obtenidos se sitúan entre 0.843 y 0.934, lo que representa un buen ajuste lineal entre las mediciones de los sensores calibrados y las del equipo de referencia.
- El RMSE, con valores entre 0.35 y 0.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, indica que las mediciones de las estaciones se encuentran muy próximas a las del equipo de referencia. Estos valores, claramente por debajo del umbral de 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ establecido por la EPA, reflejan un bajo nivel de error cuadrático medio y la ausencia de discrepancias significativas.
- La pendiente de la regresión lineal para todas las estaciones se encuentra dentro del rango aceptable definido por la EPA ($1 \pm 0,35$). Los valores obtenidos, comprendidos entre 0.86 y 0.93, evidencian una buena correspondencia entre las concentraciones medidas por los sensores y las registradas por el equipo de referencia.
- El intercepto representa el error sistemático de las mediciones y, idealmente, debe ser cercano a cero. En este estudio, las estaciones presentan interceptos entre 0.26 y 0.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, valores que se encuentran dentro del rango recomendado por la EPA ($-5 \leq b \leq 5$), lo que indica que el sesgo constante es bajo y aceptable.
- El MAE refleja el error medio absoluto entre las mediciones del sensor y las del equipo de referencia. En este caso, los valores se encuentran entre 0.30 y 0.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que indica un buen nivel de precisión, ya que las diferencias promedio respecto al equipo de referencia son reducidas.
- El MNB permite evaluar si las estaciones tienden a sobrestimar o subestimar las concentraciones respecto al equipo de referencia. Todas las estaciones muestran un sesgo positivo bajo, con valores entre aproximadamente 0.40 % y 2.72 %, lo que indica una ligera tendencia a sobreestimar las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$, pero dentro de márgenes considerados aceptables.

4.4.2. Evaluación de la precisión de las mediciones de las estaciones de medición de PM_{2.5}

En la Tabla 4.11 se presentan las métricas estadísticas después de la corrección aplicada durante el proceso de calibración de las estaciones de medición de PM_{2.5}. Los valores mostrados permiten evaluar la mejora en la precisión de las mediciones tras la calibración.

Tabla 4.11

Métricas estadísticas de las estaciones calibradas y límites de desempeño recomendados.

Métrica	Valor obtenido	Límite recomendado
Desviación estándar (SD) [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	0.09	$\leq 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Coefficiente de variación (CV) [%]	2.43	$\leq 30 \%$
Sesgo medio normalizado (MNB) [%]	1.57	-

Nota. Elaboración propia.

Desviación estándar (SD): La desviación estándar cuantifica la dispersión de las mediciones realizadas por las estaciones de monitoreo de PM_{2.5}. Un valor bajo de SD indica que las estaciones presentan mediciones más homogéneas entre sí. Además, la EPA recomienda que este valor sea inferior a $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para considerar adecuada la precisión entre equipos.

En este estudio, se obtuvo un valor de $0.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ después de la corrección, lo que evidencia una reducción significativa en la dispersión de las mediciones y una mejora en la precisión del sistema.

Coefficiente de variación (CV): El coeficiente de variación mide la variabilidad relativa de las mediciones respecto a la media y constituye un indicador de la reproducibilidad entre estaciones de medición. En estudios de evaluación de sensores de bajo costo, un valor inferior al 10 % se considera aceptable (Sousan et al., 2017). Asimismo, la EPA recomienda que este valor sea menor al 30 %.

En este trabajo, se obtuvo un valor de 2.43 % en los datos corregidos, lo que indica una mejora sustancial en la consistencia de las mediciones y una adecuada reproducibilidad entre estaciones.

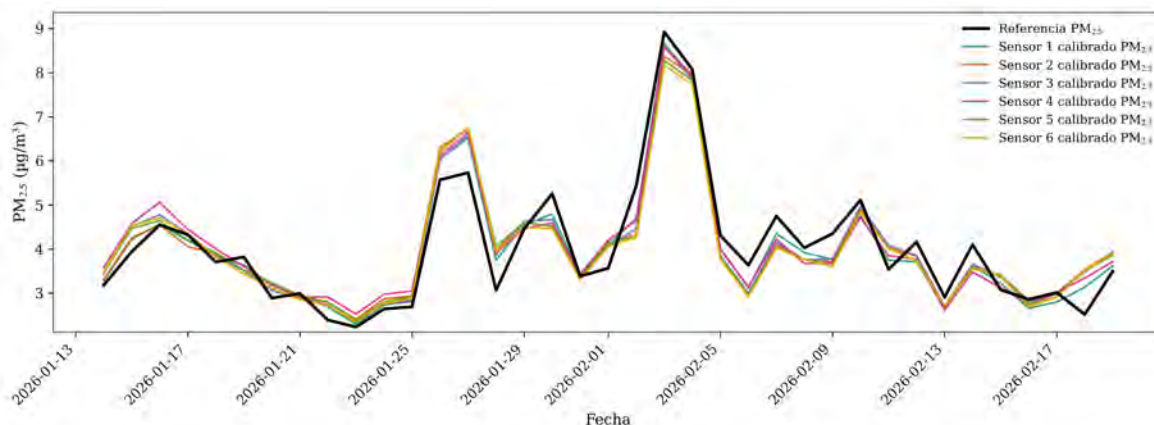
Sesgo medio normalizado (MNB): El sesgo medio normalizado permite evaluar la desviación sistemática entre las mediciones de las estaciones y los valores de referencia. Valores cercanos a cero indican menor sesgo y mayor exactitud.

En este estudio, el MNB fue de 1.57 % después del proceso de calibración, lo que evidencia una alta exactitud de las mediciones y un sesgo sistemático reducido.

La Figura 4.9 muestra la evolución diaria de las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas por la estación de referencia y por los seis sensores de bajo costo una vez calibrados. El gráfico evidencia que las series de los sensores se superponen estrechamente con la referencia, lo que se refleja en un coeficiente de variación (CV) cercano al 2 %, valor muy inferior al umbral del 30 % recomendado por la EPA , e indicativo de una alta reproducibilidad entre equipos. Además, las diferencias respecto al equipo de referencia son pequeñas y sistemáticamente bajas, en concordancia con los valores obtenidos para el sesgo medio normalizado (MNB) y las demás métricas de desempeño, lo que confirma un buen ajuste del proceso de calibración y una representación fiable de la dinámica temporal de $PM_{2.5}$ a lo largo de todo el periodo de estudio.

Figura 4.9

Serie temporal diaria de las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas por la estación de referencia y los seis sensores de bajo costo calibrados.



Nota. Elaboración propia.

4.5. Despliegue de las estaciones de monitoreo de $PM_{2.5}$

La siguiente figura muestra la distribución de las estaciones de monitoreo desplegadas dentro del área de estudio. La instalación de cada estación en los cuadrantes establecidos fue realizada considerando los criterios técnicos descritos en la Tabla 2.11, con el objetivo de garantizar una adecuada cobertura espacial y una representatividad apropiada de las mediciones de $PM_{2.5}$ dentro del campus universitario.

Figura 4.10

Ubicación de las estaciones de monitoreo $PM_{2.5}$



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.11

Estación 1.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.12
Estación 2.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.13
Estación 3.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.14
Estación 4.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.15
Estación 5.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.16
Estación 6.



Nota. Elaboración propia.

4.6. Evaluación de la red LoRaWAN

En esta sección se presenta la evaluación del desempeño de la red LoRaWAN implementada, considerando indicadores clave como la tasa de recepción de paquetes (PDR), los márgenes de la potencia recibida (RSSI) y el factor de relación señal-ruido (SNR). Estos parámetros permiten analizar la confiabilidad, la cobertura y la calidad del enlace de comunicación entre las estaciones de monitoreo y el *gateway*.

4.6.1. Análisis de la tasa de recepción de paquetes

La tasa de recepción de paquetes es un indicador clave para evaluar el éxito en la transmisión de datos desde las estaciones de monitoreo hacia el gateway, permitiendo analizar el rendimiento de la red. En el despliegue realizado, el gateway se ubicó en el quinto piso de la Escuela profesional de Ingeniería Electrónica, con el fin de maximizar la cobertura y mejorar la calidad del enlace de comunicación.

Figura 4.17

Ubicación del gateway.



Nota. Elaboración propia.

La evaluación se realiza a nivel diario, considerando los datos recolectados durante el despliegue del sistema. A partir de estos valores, se calcula el PDR diario para cada estación y, posteriormente, se obtiene un promedio por estación, con la finalidad de verificar el rendimiento de la red y la correcta transmisión de los datos.

Asimismo, este procedimiento permite validar la eficiencia de la comunicación entre las estaciones de monitoreo y el gateway. Además, facilita la identificación de posibles problemas en la comunicación, tales como pérdidas de paquetes u otras condiciones que puedan interrumpir la transmisión de datos.

Figura 4.18

Clasificación del desempeño de las estaciones según el PDR promedio.



Nota. Elaboración propia.

La Figura 4.18 muestra el porcentaje de entrega de paquetes transmitidos y recibidos correctamente. En general, las estaciones presentan valores de PDR entre el 92,7 % y el 98,3 %, lo que indica un desempeño adecuado de la red.

Se observa que las estaciones 4, 5, 3 y 1 registran los índices más altos. Destaca especialmente la estación 4, que al ser la más cercana al *gateway*, alcanza el valor máximo de 98.3 %, lo que evidencia un enlace de comunicación altamente confiable. Por otro lado, las estaciones 2 y 6 presentan valores ligeramente menores, aunque se mantienen dentro de un rango aceptable; cabe señalar que la estación 6, al ser una de las más alejadas del *gateway*, registró el valor mínimo de 92.7 %.

4.6.2. Análisis de la potencia de señal (RSSI)

Se analiza la intensidad de la señal recibida (RSSI), la cual representa la potencia con la que los paquetes de datos son recibidos en el *gateway* desde las estaciones de monitoreo. Este parámetro permite identificar posibles pérdidas asociadas a la distancia, la presencia de obstáculos físicos o interferencias en el canal de comunicación.

La Figura 4.19 muestra la clasificación del RSSI para cada estación. Se observa que la estación 4 presenta un valor de -80 dBm, correspondiente a una condición excelente, lo cual se explica por su proximidad al *gateway*, favoreciendo una mayor potencia de señal recibida. Por otro lado, las estaciones 2, 3, 5 y 1 presentan valores de RSSI clasificados como buenos, lo que indica enlaces confiables, aunque con menor intensidad en comparación con la estación más cercana.

Figura 4.19

Clasificación del RSSI de LoRaWAN por estación.



Nota. Elaboración propia.

En cuanto a las estaciones más alejadas del *gateway*, destaca la estación 6, la cual presenta el valor más bajo de RSSI, aproximadamente -108 dBm. Este resultado es consistente con su mayor distancia y la posible presencia de obstáculos que introducen atenuación en la potencia de la señal transmitida.

Estos valores de RSSI indican que la mayoría de estaciones se encuentran dentro de un rango entre excelente y bueno, por lo que sus enlaces pueden considerarse operativos. No obstante, la estación 6 presenta un nivel de señal significativamente menor. Sin embargo, debido a la naturaleza robusta de la modulación LoRa, el sistema aún es capaz de recibir los paquetes de datos transmitidos. Esto se evidencia en que aproximadamente el 92.7% de los paquetes enviados fueron recibidos correctamente, indicando que, a pesar de las condiciones desfavorables del enlace, la comunicación se mantiene funcional.

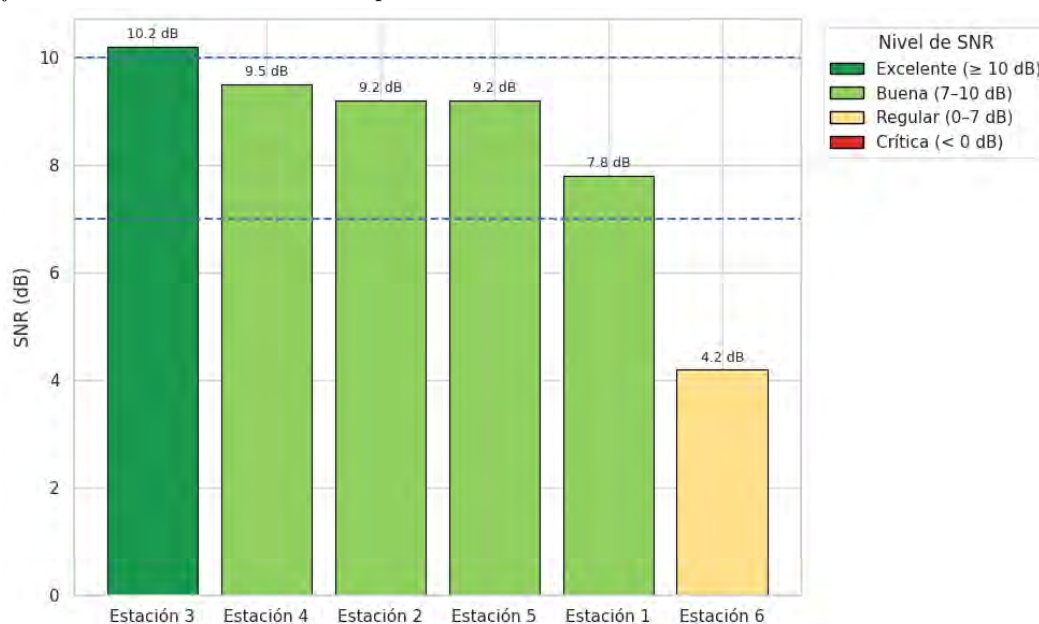
4.6.3. Análisis de la relación señal-ruido (SNR)

La Figura 4.20 muestra que las estaciones 3, 4, 2 y 5 presentan valores de SNR clasificados como excelentes (superiores a 10 dB o muy próximos a este umbral), lo que evidencia enlaces de muy buena calidad. La estación 1 obtiene un SNR considerado bueno, por lo que su comunicación sigue siendo estable, aunque con un margen de seguridad ligeramente menor que el de las estaciones con SNR excelente.

Por otro lado, la estación 6 registra el SNR más bajo, cercano al límite entre los niveles bueno y regular, lo que la convierte en el punto más vulnerable frente a interferencias o incrementos de ruido. Aunque el sistema aún logra recibir los datos, resulta recomendable evaluar mejoras en la ubicación de esta estación o en su configuración de radio, con el fin de aumentar el margen de SNR y reforzar la robustez del enlace.

Figura 4.20

Clasificación del SNR de LoRaWAN por estación.



Nota. Elaboración propia.

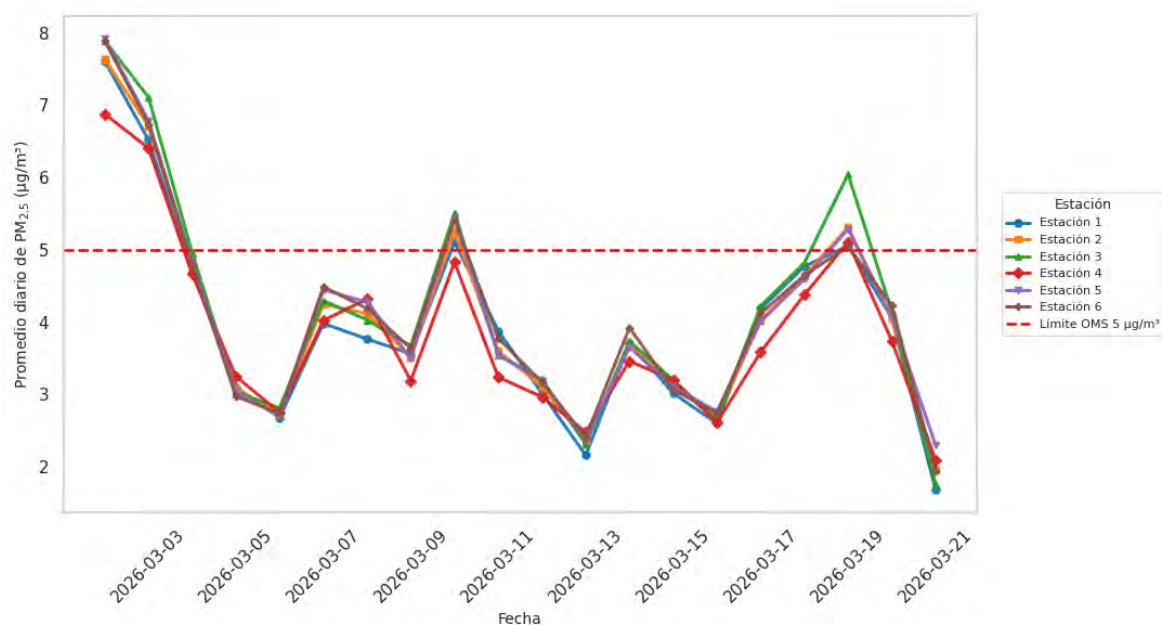
4.7. Análisis de resultados

4.7.1. Análisis de los datos obtenidos de las estaciones de monitoreo desplegadas

Con base en la información recolectada durante la fase de despliegue, se examinó el comportamiento temporal de los niveles de $PM_{2.5}$ mediante el cálculo de promedios diarios. A lo largo del periodo de estudio, las concentraciones exhibieron variaciones atenuadas y una marcada uniformidad espacial entre las diferentes estaciones de la red.

Figura 4.21

Evolución diaria de $PM_{2.5}$.



Nota. Elaboración propia.

La Figura 4.21 presenta los valores promedio diarios de las concentraciones de $PM_{2.5}$ registrados por las estaciones de monitoreo. En el periodo analizado se observa un valor mínimo diario de $2.16 \mu g/m^3$ y un valor máximo de $7.89 \mu g/m^3$.

De la figura se evidencia lo siguiente:

- Los promedios diarios de $PM_{2.5}$ medidos por las distintas estaciones muestran una evolución temporal similar, con curvas que se superponen en gran parte del periodo y con valores numéricos cercanos entre sí.
- En general, las estaciones registran concentraciones muy similares, lo que evi-

dencia un comportamiento consistente entre los diferentes puntos de medición. Esta cercanía entre los valores registrados sugiere que la contaminación del aire dentro del campus universitario presenta una distribución espacial relativamente homogénea, sin variaciones significativas entre estaciones.

- El coeficiente de variación calculado es de 4.45 %, lo que confirma que las mediciones diarias presentan una baja dispersión respecto a su valor promedio. Este resultado es coherente con la similitud observada entre las series temporales de las estaciones e indica una homogeneidad espacial en las concentraciones de $PM_{2.5}$.

Este comportamiento uniforme podría estar asociado a condiciones ambientales similares en la zona de estudio, así como a la ausencia de fuentes de emisión altamente localizadas que generen cambios abruptos en las concentraciones. En conjunto, estos resultados evidencian que el comportamiento de la concentración de $PM_{2.5}$ en el área de estudio es relativamente uniforme, tanto en el ámbito espacial como en el temporal.

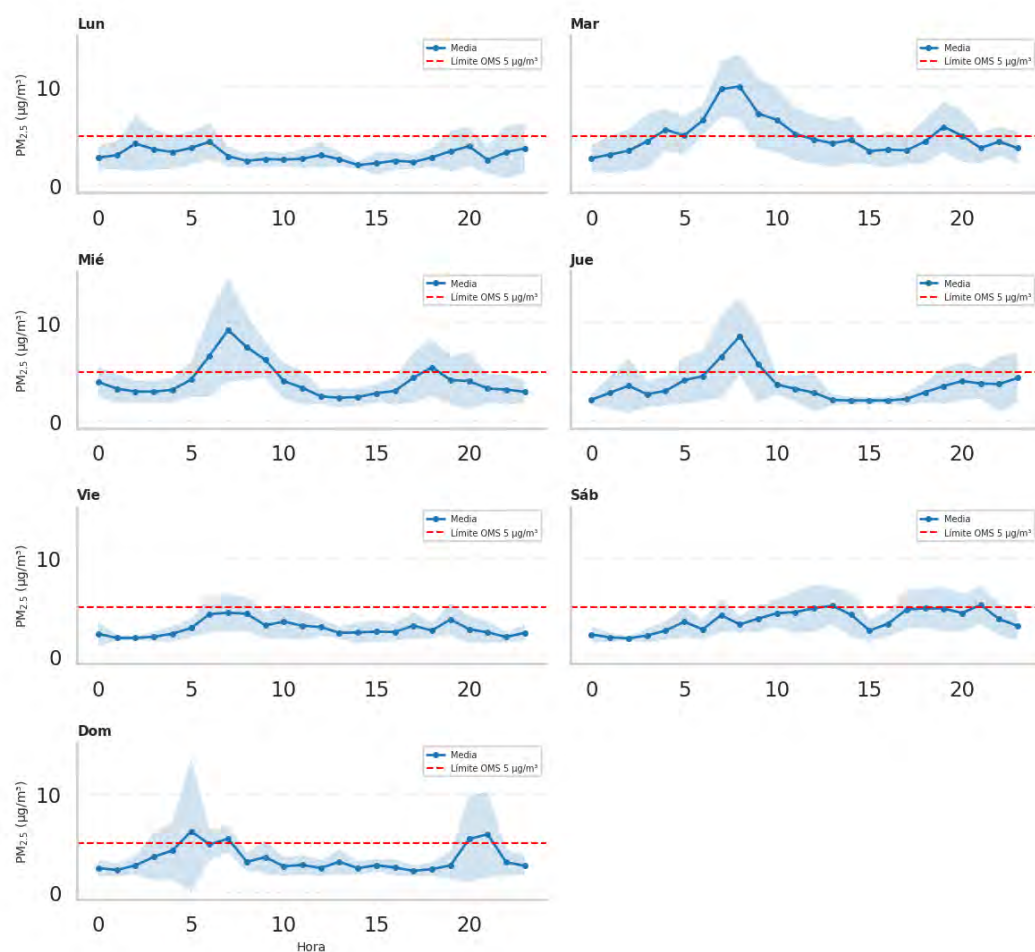
Tabla 4.12

Resumen de variabilidad diaria de $PM_{2.5}$ para el conjunto de estaciones.

Estación	Mínimo diario	Máximo diario	Unidad
Estación 1	2.16	7.61	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Estación 2	2.35	7.64	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Estación 3	2.31	7.89	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Estación 4	2.48	6.88	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Estación 5	2.36	7.92	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Estación 6	2.41	7.89	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Coeficiente de variación (CV)			4.45 %

Nota. Los valores corresponden a los promedios diarios de $PM_{2.5}$ obtenidos en los días con datos completos para todas las estaciones.

Seguidamente, se analiza el comportamiento horario de la concentración de material particulado $PM_{2.5}$ para identificar patrones temporales y variaciones en la calidad del aire. En este contexto, la Figura 4.22 muestra el perfil promedio horario para cada día de la semana, obtenido mediante la agregación de los datos por día y hora.

Figura 4.22*Evolución del comportamiento diario de la contaminación del aire.***Comportamiento horario de PM_{2.5} por día (Lun-Dom)***Nota. Elaboración propia.*

En la Figura 4.22, cada subgráfico representa un día específico de la semana; la línea principal corresponde al valor promedio de concentración, mientras que la banda sombreada indica la variabilidad de los datos mediante la desviación estándar. Adicionalmente, se incluye una línea de referencia asociada al límite recomendado por la OMS, fijado en $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, con el propósito de contrastar visualmente los registros frente a los umbrales normativos internacionales.

Se observa, por ejemplo, que los días martes, jueves y domingo, aproximadamente entre las 5:00 y las 11:00 horas, se registran valores que duplican la recomendación de la OMS, por lo que no se recomienda la exposición prolongada al aire ambiente durante ese intervalo. Este enfoque comparativo permite contrastar el comportamiento entre días y detectar incrementos en horas específicas, los cuales pueden estar asociados

al tráfico vehicular, a otras actividades antropogénicas o a fenómenos meteorológicos como la inversión térmica.

A continuación, se evalúa la evolución horaria de la contaminación durante los primeros 22 días del despliegue, analizando el comportamiento conjunto de las seis estaciones de monitoreo, con el objetivo de observar su evolución diaria y verificar si los patrones identificados se mantienen, así como detectar episodios puntuales de alta concentración de $PM_{2.5}$. La Figura 4.23 presenta el perfil horario promedio construido a partir de todos los datos recopilados, revelando un patrón característico con un pico matutino alrededor de las 7:00 AM y concentraciones mínimas durante la madrugada y la tarde.

Figura 4.23

Evolución horaria de la contaminación en un día típico.



Nota. Elaboración propia.

La Figura 4.23 muestra la evolución horaria promedio de la concentración de $PM_{2.5}$ a lo largo de un día típico, construida a partir de todos los días del periodo de estudio. Se observa que entre las 0:00 y aproximadamente las 4:00 h los niveles de contaminación se mantienen por debajo del valor de referencia de la OMS ($5 \mu g/m^3$), indicando un periodo de menor exposición.

A partir de las 5:00 h la concentración comienza a incrementarse de manera sostenida hasta alcanzar un máximo alrededor de las 7:00 h, momento en el cual se duplica aproximadamente el límite recomendado por la OMS. Posteriormente, entre las 7:00 y las 11:00 h se registra un descenso gradual de los niveles de $PM_{2.5}$, aunque durante la mayor parte de este intervalo las concentraciones se mantienen aún por encima de $5 \mu g/m^3$.

Entre las 12:00 y las 17:00 h los valores promedio descienden por debajo del umbral de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que sugiere condiciones relativamente más favorables en relación a la calidad del aire. Sin embargo, a partir de las horas vespertinas se observa un nuevo incremento, alcanzando valores cercanos a $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre las 20:00 y las 22:00 h, antes de iniciar nuevamente la disminución hacia la medianoche.

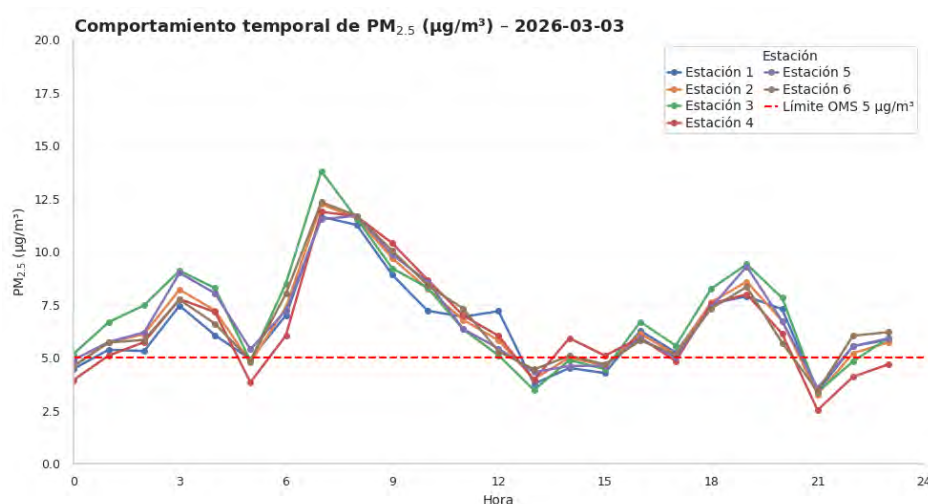
4.7.2. Evaluación horaria de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ en cada estación respecto al límite recomendado por la OMS ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Inicialmente, se realiza un análisis de los días con valores promedio diarios elevados, con el fin de observar las variaciones de la concentración de $\text{PM}_{2.5}$. A partir de ello, se identifica un patrón similar entre los distintos días evaluados. Los siguientes gráficos fueron elaborados seleccionando los días con mayores concentraciones registradas, para analizar las variaciones temporales del contaminante $\text{PM}_{2.5}$.

Asimismo, se observa que alrededor de las 6:00 a.m. comienza el incremento de la concentración de $\text{PM}_{2.5}$, alcanzando sus valores máximos entre las 7:00 y 8:00 a. m., para luego descender progresivamente durante las siguientes horas. Durante este periodo, las concentraciones superan los límites recomendados por la OMS, llegando en algunos casos a duplicarlos o triplicarlos.

Figura 4.24

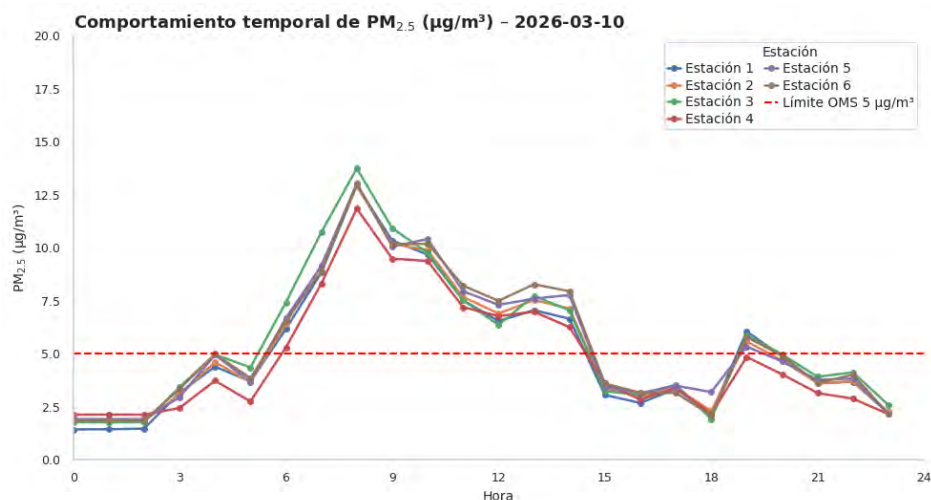
Variación horaria de $\text{PM}_{2.5}$ por estación y comparación con el límite de la OMS ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) el 3 de marzo de 2026.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.25

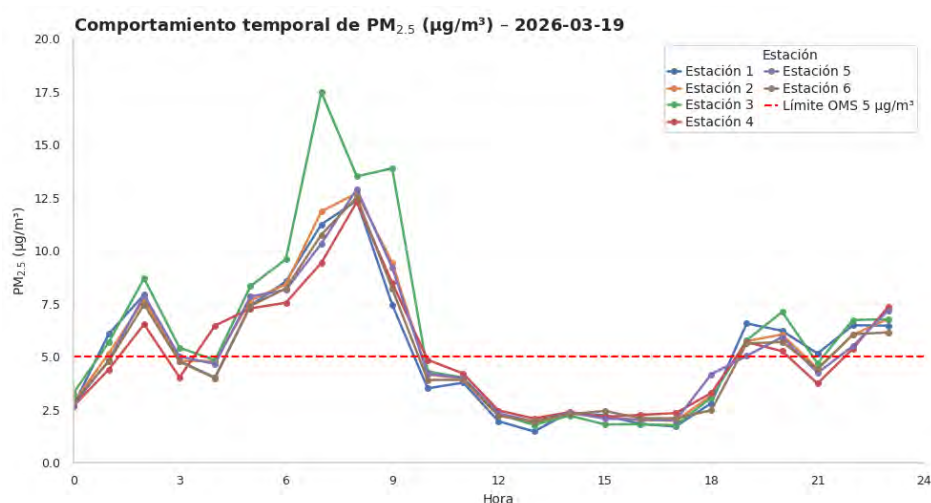
Variación horaria de $PM_{2.5}$ por estación y comparación con el límite de la OMS ($5 \mu g/m^3$) el 10 de marzo de 2026.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.26

Variación horaria de $PM_{2.5}$ por estación y comparación con el límite de la OMS ($5 \mu g/m^3$) el 19 de marzo de 2026.

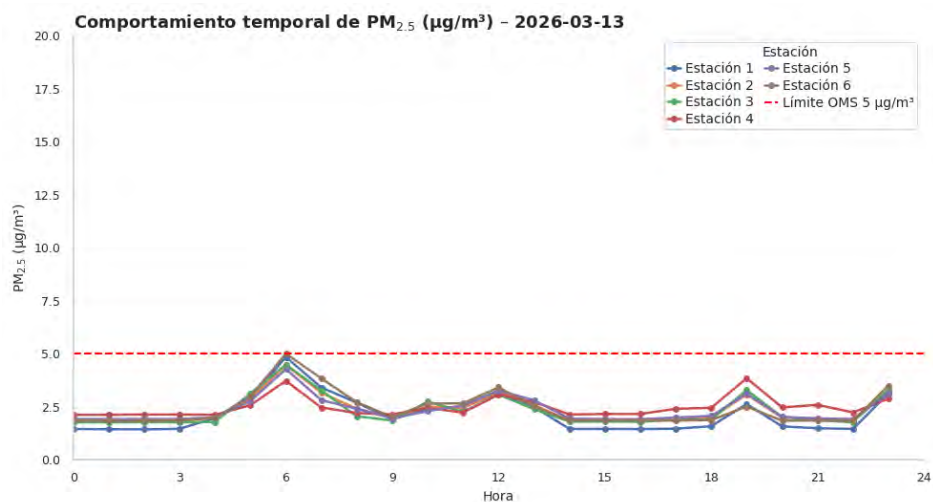


Nota. Elaboración propia.

Adicionalmente, se elaboró un análisis de los días con menores valores promedio de contaminación diaria. De manera similar a lo observado en los días con mayores concentraciones de $PM_{2.5}$, las estaciones de monitoreo presentan un comportamiento relativamente homogéneo, mostrando tendencias temporales similares entre sí. Esto indica que, tanto en episodios de alta como de baja contaminación, existe una respuesta espacial comparable entre las distintas estaciones evaluadas dentro del área de estudio.

Figura 4.27

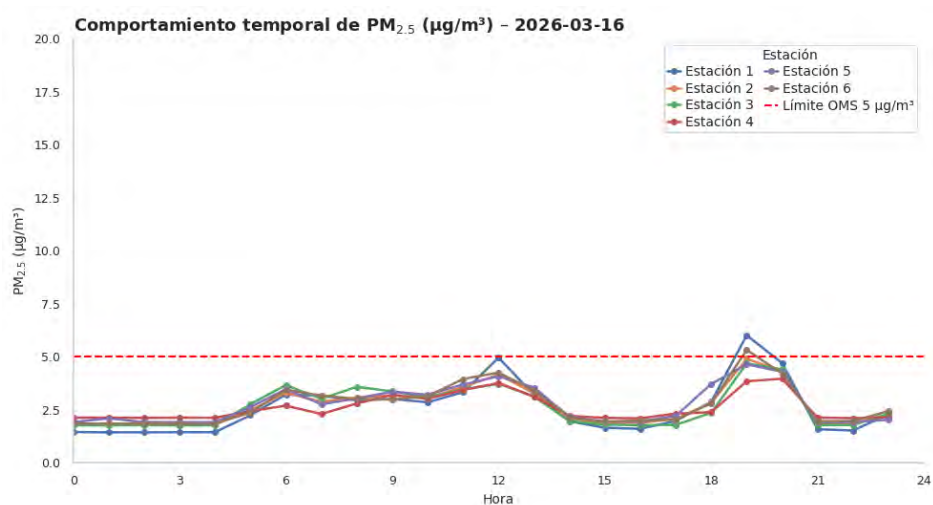
Variación horaria de $PM_{2.5}$ por estación y comparación con el límite de la OMS ($5 \mu g/m^3$) el 13 de marzo de 2026.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.28

Variación horaria de $PM_{2.5}$ por estación y comparación con el límite de la OMS ($5 \mu g/m^3$) el 16 de marzo de 2026.



Nota. Elaboración propia.

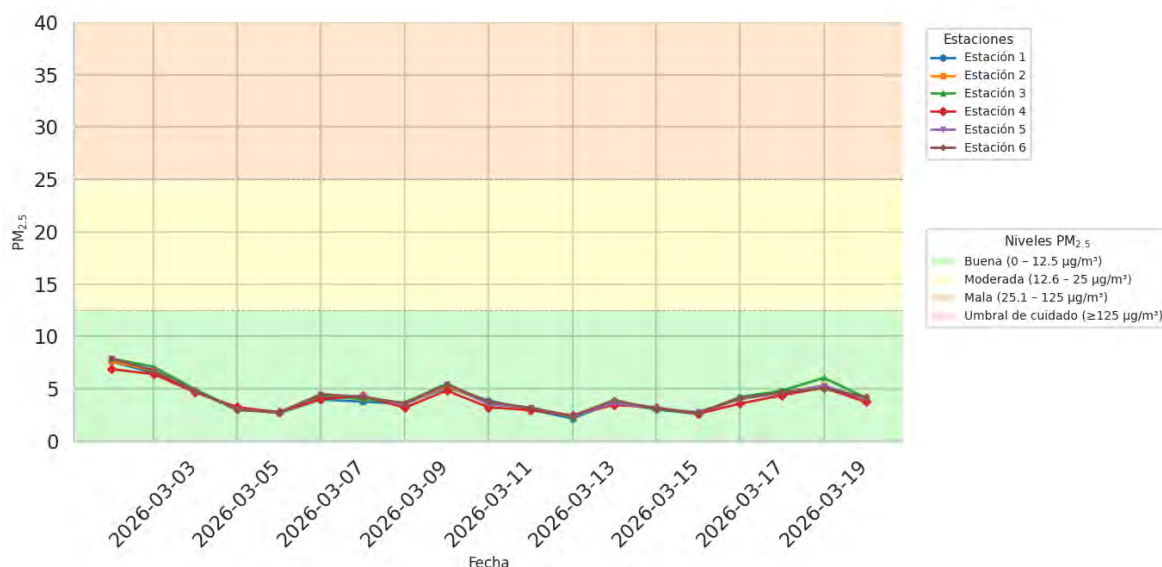
4.8. Análisis de la calidad del aire de acuerdo con los estándares nacionales de contaminación

De acuerdo con los Índices de Calidad del Aire (INCA), las concentraciones de material particulado $PM_{2.5}$ registradas en el área de estudio se encuentran dentro de la categoría *Buena*, correspondiente a concentraciones entre 0 y $12.5 \mu g/m^3$ para

promedios diarios de 24 horas.

Figura 4.29

Promedio diario de concentración de $PM_{2.5}$



Adicionalmente, se realiza un análisis temporal con una resolución de medición de cada 5 minutos, con el propósito de obtener una mejor visualización de la variación de las concentraciones de $PM_{2.5}$. Esta resolución temporal permite identificar variaciones de contaminación en horarios específicos en los cuales las concentraciones tienden a incrementarse.

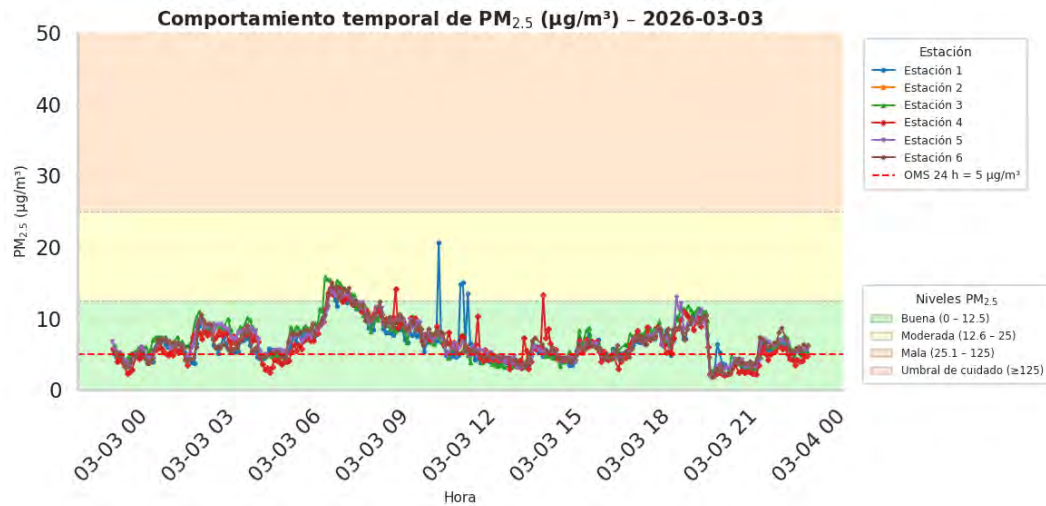
Las siguientes figuras, correspondientes a los días con mayores niveles de contaminación registrados, evidencian que la mayor parte de las mediciones se encuentran dentro de la clasificación “Buena”, de acuerdo con los Índices de Calidad del Aire (INCA). Sin embargo, destaca la Estación 3 en la Figura 4.33, donde se registró una concentración máxima de $42,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valor que corresponde a la categoría de calidad del aire “Mala”.

Adicionalmente, se presentan los días con los promedios más altos dentro de la clasificación del Índice de Calidad del Aire (INCA). En ellos, se observa que las estaciones de monitoreo mantienen concentraciones relativamente bajas durante la madrugada; sin embargo, a partir de las primeras horas de la mañana se evidencia un incremento progresivo de los niveles de $PM_{2.5}$. Este aumento da lugar a picos de concentración entre las 07:00 y las 08:00 h, cuyos valores se encuentran dentro de la categoría de calidad del aire “Moderada”. Posteriormente, las concentraciones disminuyen gradualmente a lo largo del día, situándose nuevamente en la categoría “Buena”. De manera similar, durante la tarde y noche se registran nuevos incrementos, generando picos secundarios

entre las 18:00 y las 20:00 h.

Figura 4.30

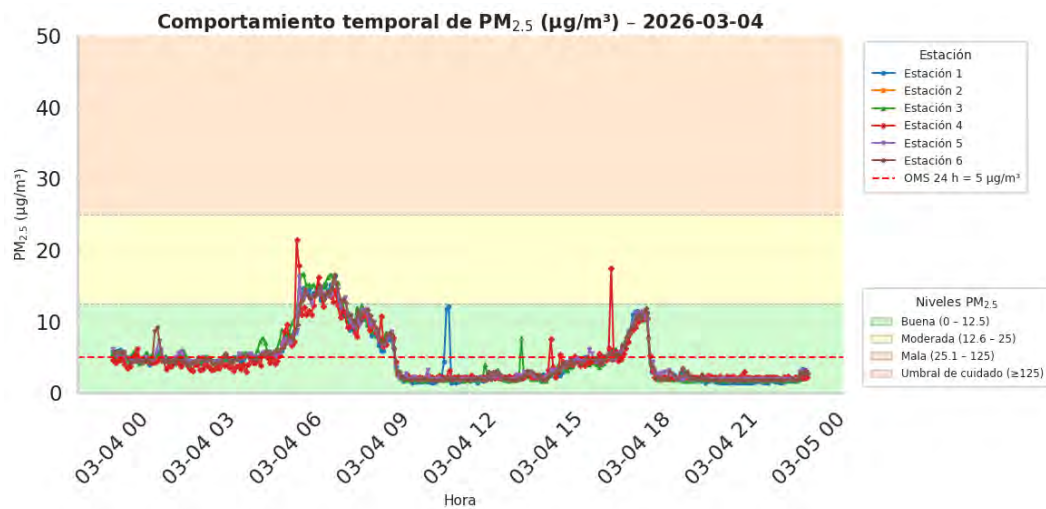
Comportamiento temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas por las estaciones de monitoreo durante el día 03 de marzo de 2026.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.31

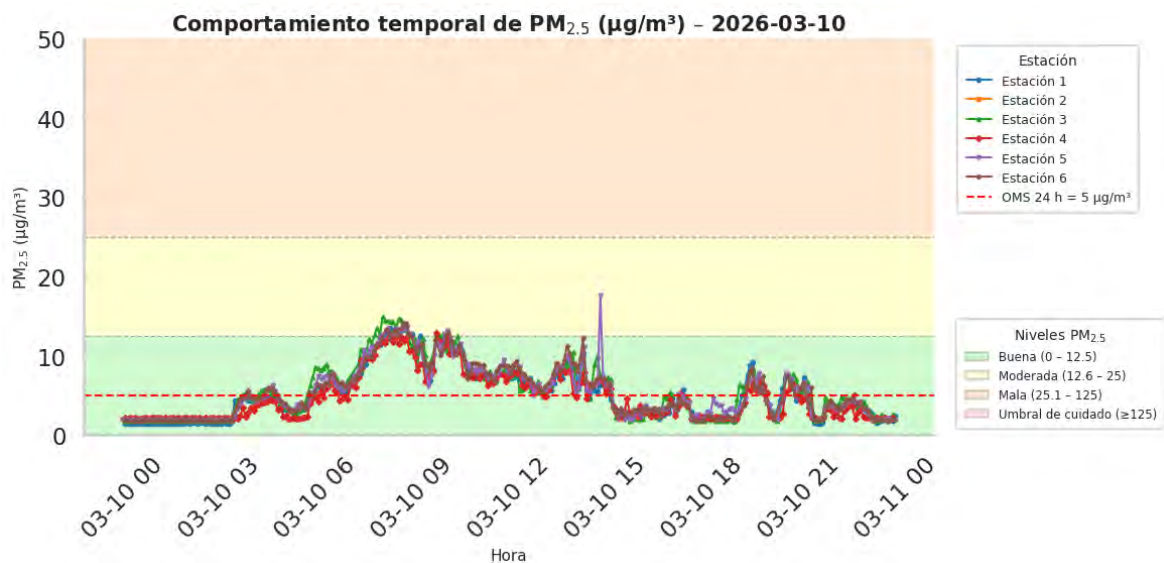
Comportamiento temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas por las estaciones de monitoreo durante el día 04 de marzo de 2026.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.32

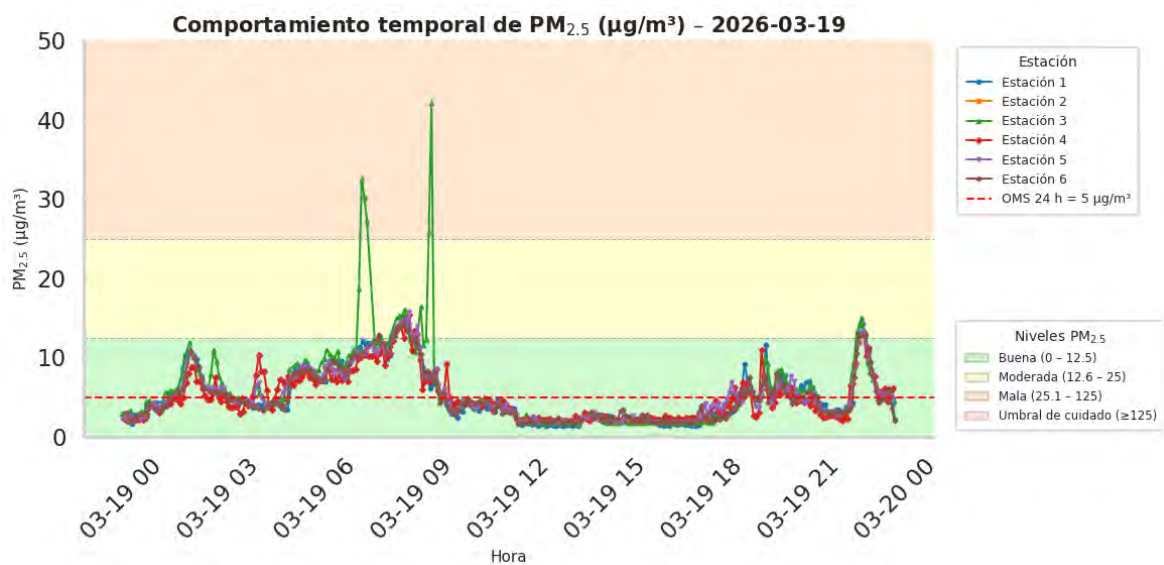
Comportamiento temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas por las estaciones de monitoreo durante el día 10 de marzo de 2026.



Nota. Elaboración propia.

Figura 4.33

Comportamiento temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$ registradas por las estaciones de monitoreo durante el día 19 de marzo de 2026.



Nota. Elaboración propia.

4.9. Discusión

4.9.1. Evaluación y calibración de los sensores

Los hallazgos preliminares obtenidos durante la etapa de evaluación evidenciaron la necesidad de realizar un proceso de calibración y ajuste en las mediciones de los sensores de bajo costo bajo condiciones reales de operación. Si bien estos dispositivos suelen venir calibrados de fábrica en laboratorios especializados, la EPA indica que para su implementación efectiva se debe realizar un proceso de evaluación frente a equipos de referencia. Esto se debe a que su comportamiento en campo suele variar significativamente debido a diversos factores; por lo tanto, es indispensable evaluar y ajustar sus lecturas mediante la comparación directa con un equipo de referencia certificado.

Inicialmente, se evaluó el coeficiente de determinación (R^2), el cual permite analizar el grado de relación entre las mediciones del equipo de referencia y las de los sensores de bajo costo. En el trabajo realizado por (Badura et al., 2018), utilizando sensores PMS7003 y el equipo de referencia TEOM 1400, basado en el método de microbalanza de elemento cónico oscilante, se reportó un valor de $R^2 = 0,91$. De manera similar, en el presente estudio se obtuvieron valores de R^2 entre 0.863 y 0.934 en comparación con el equipo de referencia Dust Sentry, basado en el principio de dispersión de luz. Estos resultados evidencian una alta correlación entre las mediciones de los sensores PMS7003 y equipos de referencia, lo que indica que los sensores son capaces de seguir adecuadamente el comportamiento temporal de las concentraciones de $PM_{2.5}$.

Sin embargo, a pesar de presentar altos valores de correlación, los sensores mostraron inicialmente errores de medición importantes. Los valores de sesgo medio normalizado (MNB) variaron entre 55.02 % y 190.57 %, lo que indica una fuerte sobreestimación de las concentraciones respecto al equipo de referencia Dust Sentry. Esto evidencia que los sensores registraban valores considerablemente más altos que el equipo de referencia, situación observable en la Figura 4.6, donde para determinadas concentraciones cercanas a $3 \mu g/m^3$ medidas por el equipo de referencia, algunos sensores registraban valores próximos a $10 \mu g/m^3$.

Asimismo, los valores de pendiente obtenidos antes de la calibración variaron entre 0.95 y 2.14, mientras que los interceptos oscilaron entre -17.72 y -1.71 $\mu g/m^3$. De acuerdo con los criterios recomendados por la EPA, la pendiente ideal debe aproximarse a 1 y el intercepto a 0, lo que representa una mayor concordancia entre las mediciones del sensor y el equipo de referencia. En este caso, únicamente la estación 1 presentó

valores cercanos a dichos criterios, tal como se observa en la Tabla 4.6.

En la evaluación de la precisión entre sensores se obtuvo un coeficiente de variación (CV) de 21.08 %, lo que indica que, aun cuando las estaciones fueron expuestas a las mismas condiciones ambientales, las mediciones presentaron variabilidad entre sensores. Del mismo modo, el valor de desviación estándar obtenido refleja la dispersión existente en las mediciones antes del proceso de calibración.

Posteriormente, luego del proceso de calibración, se analizaron los nuevos valores de desempeño, de acuerdo con los criterios establecidos en la guía de evaluación. Los valores de RMSE variaron entre 0.35 y 0.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, significativamente inferiores al límite recomendado de 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que evidencia una reducción importante del error de medición.

De igual manera, los valores de pendiente e intercepto posteriores a la calibración se aproximaron a los criterios recomendados por la EPA. La pendiente se acercó al valor 1, obteniéndose valores entre 0.86 y 0.93, mientras que el intercepto varió entre 0.26 y 0.55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esto evidencia una mejor concordancia con el equipo de referencia y una mejora en la coincidencia entre las mediciones de las estaciones y las del equipo de referencia. En conjunto, estos resultados demuestran que el proceso de calibración permitió corregir las desviaciones iniciales observadas en los sensores de bajo costo.

Asimismo, los datos expuestos en la Tabla 4.11 evidencian que, después de la calibración, las estaciones alcanzaron niveles adecuados de precisión y estabilidad en las mediciones. El coeficiente de variación ($\text{CV} = 2.43 \%$) fue considerablemente menor al límite recomendado del 30 %, indicando una alta consistencia entre sensores. Asimismo, el valor de MNB de 1.57 % evidencia una reducción significativa del sesgo de las mediciones respecto al equipo de referencia. Estos resultados confirman que las estaciones calibradas presentan un desempeño confiable y adecuado para aplicaciones de monitoreo de la calidad del aire.

Este último resultado es especialmente relevante para la evaluación del área de estudio en el proceso de despliegue, ya que permite reducir errores en las mediciones. Al contar con sensores calibrados, es posible detectar variaciones espaciales en las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ dentro de una misma área y, en consecuencia, identificar zonas con mayores concentraciones o posibles fuentes de contaminación.

4.9.2. Comportamiento de las concentraciones de $\text{PM}_{2.5}$ y posibles fuentes de contaminación

En la evaluación de las mediciones de $\text{PM}_{2.5}$ en el área de estudio, las estaciones de monitoreo reportaron un comportamiento temporal similar y concentraciones cercanas entre sí. Los resultados obtenidos no evidenciaron la presencia de fuentes puntuales de contaminación significativamente predominantes dentro del campus universitario, debido a que las estaciones desplegadas no registraron incrementos localizados que difieran del comportamiento general observado. En este contexto, la principal fuente potencial de contaminación estaría asociada al tráfico vehicular presente en los alrededores y vías cercanas al área de estudio.

Los resultados obtenidos en el presente estudio evidenciaron que los mayores incrementos en los niveles de $\text{PM}_{2.5}$ coincidieron principalmente con las horas de mayor flujo vehicular durante los días con promedios diarios más elevados. Esto sugiere una relación directa entre las variaciones temporales y las emisiones generadas por el tránsito automotor. Dichos hallazgos presentan similitud con los antecedentes considerados en la presente investigación. Estudios como el desarrollado por (Hernández, 2020) indican que los picos de contaminación por $\text{PM}_{2.5}$ se presentan principalmente durante periodos de alta congestión vehicular. De manera similar, (Recalde et al., 2021) registró concentraciones pico de hasta $11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, atribuyendo dichos incrementos al tráfico vehicular.

Asimismo, estos antecedentes reportan el desarrollo de redes de monitoreo de calidad del aire mediante el empleo de sensores de bajo costo, tales como el HPMA115S0, PMS3003 y el DSM501A. Sin embargo, en varios de estos trabajos no se evidencia un proceso de validación de los sensores utilizados ni la aplicación de recomendaciones técnicas relacionadas con la ubicación e instalación de los dispositivos. Estos aspectos son fundamentales para garantizar la representatividad y confiabilidad de las mediciones de material particulado, conforme a las recomendaciones establecidas por la EPA.

En este contexto, para lograr una evaluación más sólida de las posibles fuentes de contaminación, resulta necesario integrar sensores y variables meteorológicas complementarias. En particular, la incorporación de un anemómetro permitiría analizar la influencia de la velocidad y dirección del viento sobre la dispersión del material particulado, facilitando la identificación de las posibles fuentes responsables de los incrementos de concentración registrados. De igual manera, la integración de sensores de monóxido de carbono (CO) contribuiría a fortalecer el análisis de las emisiones vehiculares, con-

siderando que los procesos de combustión incompleta del parque automotor generan simultáneamente material particulado y CO, además de menores cantidades de CO₂.

Adicionalmente, resulta importante considerar el análisis de fenómenos meteorológicos, como la inversión térmica, debido a que estas condiciones atmosféricas limitan la dispersión vertical de los contaminantes y favorecen la acumulación de material particulado cerca de la superficie.

Capítulo V

Análisis de costos y ventajas operativas

5.1. Costo asociado al uso del método gravimétrico

En la Tabla 5.1 se presenta el costo relacionado con los equipos, materiales y elementos de protección personal requeridos para la aplicación del método gravimétrico mediante el Impactador Harvard. Este análisis considera de forma exclusiva los gastos directos asociados a la operación básica del método, sin incluir la adecuación del laboratorio ni otros costos de infraestructura externa.

Tabla 5.1

Costos estimados de equipos y materiales para una campaña anual mediante el método gravimétrico.

Descripción	Costo (S/.)
<i>Equipos</i>	
Impactador Harvard	15,000.00
Balanza analítica	8,000.00
Medidor de flujo de aire de la bomba de vacío	5,600.00
<i>Material crítico de muestreo</i>	
Caja de filtros (365 unidades)	8,760.00
<i>Elementos de protección personal</i>	
Guantes (consumo anual estimado)	384.00
Mandiles (consumo anual estimado)	280.00
Subtotal equipos	28,600.00
Subtotal materiales de muestreo	8,760.00
Subtotal EPP	664.00
Costo total anual estimado	38,024.00

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 5.2 muestra los costos referenciales del personal técnico y profesional responsable de la operación del equipo y del tratamiento de los filtros. Estos valores corresponden a una dedicación parcial anual y se estiman a partir de remuneraciones de referencia en el contexto nacional.

Tabla 5.2

Costos de personal asociado a la operación del método gravimétrico (campana anual en Perú, dedicación parcial).

Descripción	Dedicación	Cálculo	Costo anual (S/.)
Profesional responsable	20 % (32 h/mes)	S/ 2 900/mes $\times$ 12 meses $\times$ 0,20	6,960.00
Técnico de campo	30 % (48 h/mes)	S/ 1 900/mes $\times$ 12 meses $\times$ 0,30	6,840.00
Técnico de laboratorio	25 % (40 h/mes)	S/ 1 350/mes $\times$ 12 meses $\times$ 0,25	4,050.00
Costo total anual de personal			17,850.00

Nota. Elaboración propia a partir de sueldos mensuales de referencia, considerando una jornada de 160 horas/mes y dedicación parcial del personal.

El costo total estimado para la aplicación del método gravimétrico utilizando el impactador Harvard asciende aproximadamente a S/ 56,874.00 por campana anual. Este valor considera tanto los equipos y materiales requeridos para la operación (S/ 38,024.00) como la participación del personal técnico y profesional responsable (S/ 17,850). Cabe resaltar que el cálculo se basa en costos referenciales vigentes en el contexto nacional, sin incluir gastos indirectos asociados al mantenimiento de infraestructura o a la adecuación del laboratorio. En conjunto, estos resultados reflejan una estimación razonable del costo operativo anual del método, útil para fines comparativos y de planificación presupuestal.

Tabla 5.3

Resumen de costos estimados para la aplicación del método gravimétrico durante una campana anual.

Concepto	Costo anual (S/.)
Equipos	28,600.00
Materiales y consumibles	9,424.00
Personal profesional y técnico	17,850.00
Costo total estimado anual	55,874.00

Nota. Elaboración propia.

5.2. Costo asociado al sistema de monitoreo

5.2.1. Costos de hardware

La siguiente tabla presenta los elementos que conforman cada estación de monitoreo. Asimismo, se detallan los materiales y componentes utilizados en la implementación de cada estación.

Tabla 5.4

Componentes y costos por estación de monitoreo.

Descripción	Costo (\$/.))
Tarjeta de desarrollo TTGO LoRa	148.00
Sensor PM2.5 (PMS7003)	100.00
Sensor de temperatura y humedad DHT22	14.00
Controlador solar 10A	72.00
Batería 12V 7Ah	51.00
Panel solar 10W	69.00
Case para los sensores	50.00
Caja de PVC	12.00
Otros materiales	46.00
Costo por estación	502.00

A continuación, se presenta el cálculo del costo total del sistema desplegado correspondiente al hardware.

Tabla 5.5

Resumen de inversión en hardware.

Concepto	Cantidad	Costo Total (\$/.))
Costo por estación	1	502.00
Total 6 estaciones	6	3,012.00
Gateway principal	1	1,200.00
Costo total hardware		4,212.00

Nota. Elaboracion propia.

5.2.2. Costos de desarrollo de software

Tabla 5.6

Desarrollo de software y configuración del sistema.

Actividad	Horas	Tarifa (S/./h)	Costo Total (S/.)
Programación del dispositivo TTGO LoRa	25	40.00	1,000.00
Configuración de infraestructura:			
• Máquina virtual	5	40.00	200.00
• Gateway LoRa	5	40.00	200.00
• Base de datos	5	40.00	200.00
• Plataforma Node-RED	5	40.00	200.00
Desarrollo del dashboard web (Node-RED)	10	40.00	400.00
Total general	55		2,200.00

Nota. Elaboración propia.

5.2.3. Costos de licencias y suscripciones

Tabla 5.7

Licencias y servicios en la nube.

Servicio	Período	Costo (S/)
Google Cloud Platform (Máquina Virtual)	Anual	840.00
The Things Network (TTN)	Ilimitado	Gratuito
Total Licencias		840.00

Nota. Elaboración propia.

5.2.4. Costos de implementación y puesta en marcha

Tabla 5.8

Implementación y pruebas del sistema.

Actividad	Horas	Tarifa/Hora (S/.)	Costo Total (S/.)
Diseño del sistema	25	50.00	1250.00
Ensamble de hardware	20	40.00	800.00
Programación y configuración	20	40.00	800.00
Total Implementación	60		2850.00

Nota. Elaboración propia.

5.2.5. Costos de evaluación de los sensores para la medición de PM_{2.5}

Tabla 5.9

Costos asociados a la evaluación del desempeño de los sensores en la medición de PM_{2.5} frente a un equipo de referencia certificado.

Concepto	Costo (S/.)
Ensayos de evaluación del desempeño de los sensores frente a un equipo de referencia certificado	3,500.00
Total	3,500.00

Nota. Elaboración propia.

Cabe mencionar que, durante las pruebas de validación, se gestionó una solicitud de acceso ante la Municipalidad Distrital de Santiago para operar el equipo de referencia Dust Sentry. El objetivo principal fue realizar la adquisición de datos de contraste y coordinar las autorizaciones requeridas para instalar los sensores desarrollados en las proximidades de dicho equipo. Cabe destacar que todos los accesos y permisos institucionales fueron otorgados sin costo alguno.

No obstante, en esta sección se ha incorporado un costo referencial estimado en la Tabla 5.9 asociado a este proceso. El propósito de incluir este monto es reflejar de manera más fidedigna y realista el presupuesto general que implicaría el desarrollo, calibración y validación formal de las estaciones de monitoreo.

5.2.6. Costos de personal para la gestión del sistema de monitoreo

Estas actividades comprenden visitas a campo para la verificación del estado de las estaciones de monitoreo, así como la supervisión del funcionamiento de la interfaz web de usuario y de los componentes asociados al sistema. Adicionalmente, incluyen otras tareas necesarias para mantener las estaciones operativas, tales como la atención de incidencias, la revisión del flujo de datos y la realización de ajustes menores de configuración, con el fin de garantizar la integridad de los datos y la disponibilidad constante del sistema.

Tabla 5.10

Costos de personal asociados a la operación anual de las estaciones de monitoreo (dedicación parcial).

Descripción	Dedicación	Cálculo	Costo anual (S/.)
Técnico responsable de operación de las estaciones	25 % (40 h/mes, $\approx$ 1,3 h/día)	S/ 1600/mes $\times$ 12 meses $\times$ 0,25	4,800.00
Costo total anual de personal para operación de estaciones			4,800.00

Nota. Elaboración propia a partir de un sueldo mensual de referencia, una jornada de 160 horas/mes y un supuesto de dedicación parcial para la gestión de las estaciones de monitoreo.

5.2.7. Resumen General del Proyecto

Tabla 5.11

Costo total del proyecto.

Categoría	Costo (S/.)
Hardware del sistema	4,212.00
Desarrollo de software	2,200.00
Licencias y suscripciones	840.00
Implementación y pruebas	2,850.00
Costos de evaluación de los sensores	3,500.00
Personal de monitoreo	4,800.00
Costo total del proyecto	18,402.00

Nota. Elaboración propia.

5.3. Análisis de costos

5.3.1. Distribución de costos asociados a la operación del Impactador Harvard

Tabla 5.12

Distribución de costos del método gravimétrico.

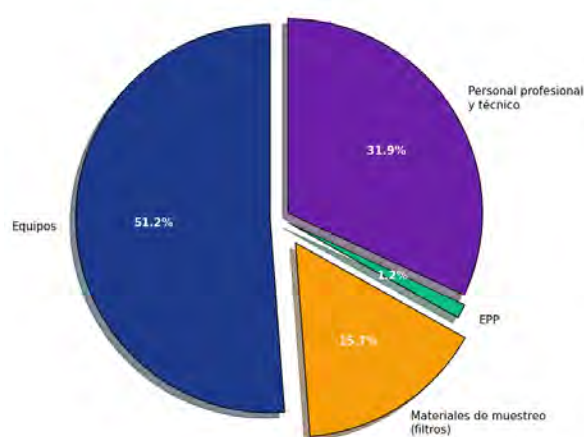
Categoría	Costo (S/.)	Porcentaje (%)
Equipos	28,600.00	51.2
Materiales de muestreo (filtros)	8,760.00	15.7
Elementos de protección personal (EPP)	664.00	1.2
Personal profesional y técnico	17,850.00	31.9
Total	55,874.00	100.0

Nota. Elaboración propia a partir del desglose de equipos, materiales, EPP y personal.

La Tabla 5.12 muestra que, del costo total del método gravimétrico, el 31.9 % corresponde a los costos asociados al personal profesional y técnico, el 15.7 % al consumo de filtros y el 1.2 % a los elementos de protección personal. En conjunto, aproximadamente el 48.8 % del presupuesto anual se destina a recursos humanos especializados y a materiales consumibles. Esta distribución evidencia que casi la mitad del gasto operativo se concentra en actividades recurrentes (mano de obra y reposición de insumos).

Figura 5.1

Distribución de costos detallada del método gravimétrico.



Nota. Elaboración propia.

5.3.2. Comparación de costos: Impactador Harvard vs. sistema de monitoreo desarrollado

Inicialmente, se realizó un análisis general del uso del método gravimétrico mediante el Impactador Harvard, considerando los costos asociados al equipamiento, materiales y personal requerido para una campaña anual de monitoreo. Entre los materiales empleados destaca el uso de filtros, componente esencial para estimar el valor de la concentración de material particulado, así como la participación de personal especializado en el procesamiento analítico y la gestión operativa del equipo.

De manera similar, se estimaron los costos correspondientes al sistema de monitoreo desarrollado en la presente investigación, conformado por seis estaciones de monitoreo distribuidas. Para ello, se consideraron los gastos relacionados con la implementación del hardware, desarrollo de software, verificación del desempeño y operación en campo.

Posteriormente, se efectuó una comparación global entre el costo total de implementar una estación basada en el Impactador Harvard, utilizando el método gravimétrico, y el costo total del sistema propuesto compuesto por seis estaciones de monitoreo distribuidas, tal como se presenta en la Tabla 5.13.

Tabla 5.13

Comparación de costos totales de los métodos de monitoreo.

Método	Costo estimado (S/.)
Impactador Harvard (método gravimétrico)	55,874.00
Sistema de monitoreo desarrollado (6 estaciones)	18,402.00
Diferencia absoluta	37,472.00
Ahorro relativo	67.1 %

Nota. Elaboración propia a partir de los costos totales anuales estimados para una campaña de monitoreo.

De la Tabla 5.13 se desprende que el método gravimétrico implica un costo considerablemente superior al del sistema de monitoreo propuesto. Cabe resaltar que, en esta comparativa inicial, el sistema desarrollado está conformado por una red de seis estaciones de monitoreo, en contraste con el método gravimétrico que contempla únicamente una sola estación. A pesar de esta notable diferencia en la cantidad de puntos de medición, el sistema desarrollado permite alcanzar un ahorro cercano al 67.1 % en los costos totales.

Con el fin de realizar una comparación más equitativa entre el Impactador Harvard y el sistema desarrollado, se consideró el escenario de operación de una única estación de monitoreo. En este caso, el costo anual estimado de una estación asciende a S/ 6,784.00. Al comparar este valor con el costo anual del método gravimétrico (S/ 55,874.00), se obtiene una reducción aproximada del 87.9 % en los costos de implementación y operación, lo que equivale a un ahorro absoluto cercano a S/ 49,090.00 por año. Esta diferencia evidencia el potencial del sistema propuesto para ampliar la cobertura del monitoreo con una inversión significativamente menor.

Tabla 5.14

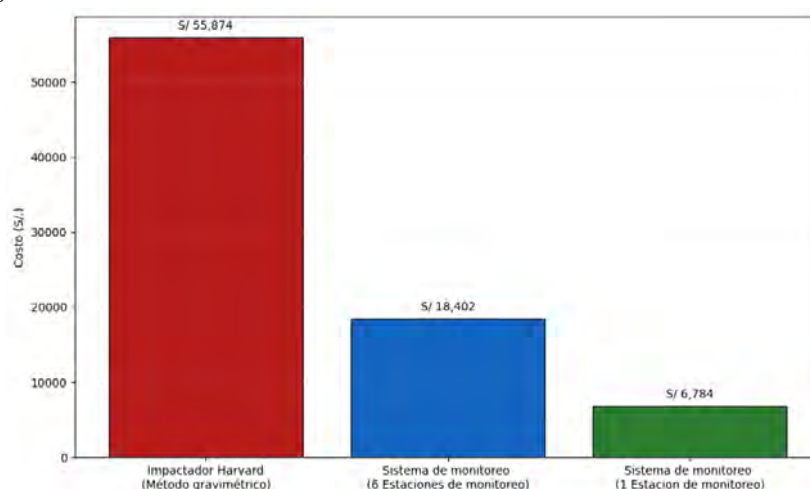
Estimación de costos anuales para una estación de monitoreo desarrollada y comparación con el método gravimétrico.

Categoría	Costo anual estimado (S/.)
Hardware de la estación	1,702.00
Desarrollo de software	367.00
Licencias y servicios en la nube	140.00
Implementación y pruebas	475.00
Evaluación de los sensores	3,500.00
Personal para la operación de las estaciones	1,800.00
Costo total anual del sistema propuesto (1 estación)	6,784.00
Costo anual del método gravimétrico	55,874.00
Ahorro absoluto	49,090.00
Ahorro relativo	87.9 %

Nota. Elaboración propia.

Figura 5.2

Costos anuales asociados a la implementación y operación del Impactador Harvard (método gravimétrico) y del sistema de monitoreo desarrollado.



Nota. Elaboración propia.

5.3.3. Comparación de costos: Aeroqual Dust Sentry vs Sistema de monitoreo desarrollado

Adicionalmente, se realizó una comparación entre el equipo de referencia *Dust Sentry* y las estaciones de monitoreo de bajo costo desarrolladas, destacando las diferencias en inversión requerida, complejidad de operación y potencial para ampliar la cobertura espacial del monitoreo PM_{2.5}.

Tabla 5.15

Comparación entre el equipo de referencia Dust Sentry y una estación de monitoreo.

Concepto	Dust Sentry (referencia)	Sistema de monitoreo
Cantidad de equipos	1 unidad	1 unidad
Costo total (S/.)	85,000.00	6,784.00
Cobertura espacial	Puntual	Puntual
Diferencia absoluta (S/.)	78,216.00	
Ahorro relativo (%)	92.0	

Nota. Elaboración propia.

Tabla 5.16

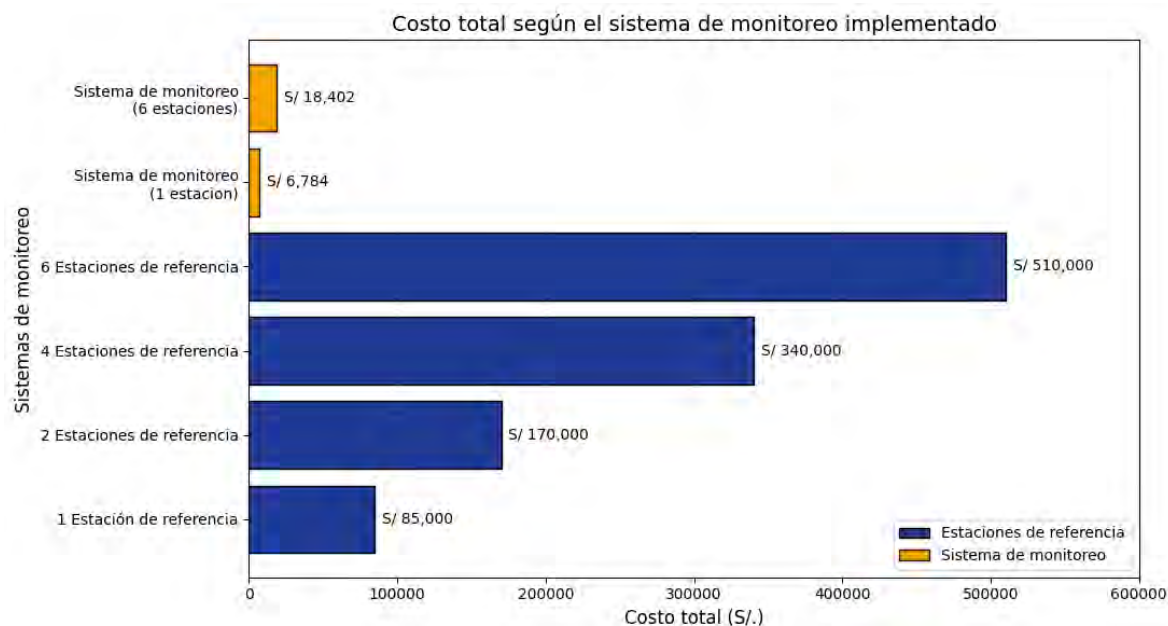
Comparación entre el sistema de referencia y el sistema de monitoreo para 6 estaciones.

Concepto	Dust Sentry (6 estaciones)	Sistema de monitoreo (6 estaciones)
Cantidad de equipos	6 unidades	6 unidades
Costo total (S/.)	510,000.00	18,402.00
Cobertura espacial	Distribuida	Distribuida
Ahorro absoluto (S/.)	491,598.00	
Ahorro relativo (%)	96.4	

Nota. Elaboración propia.

La Tabla 5.15 evidencia la significativa diferencia de costos entre el equipo de referencia *Dust Sentry* y el sistema de monitoreo desarrollado. En este sentido, se observa un ahorro absoluto de S/ 78,216.00, lo que representa un ahorro relativo del 92.0 % respecto al equipo de referencia.

Este resultado demuestra la viabilidad del uso de estaciones de monitoreo de bajo costo, ya que permiten reducir significativamente la inversión requerida y, en consecuencia, facilitan la ampliación de la cobertura espacial del monitoreo de material particulado PM_{2.5}.

Figura 5.3*Costo total según número de estaciones.**Nota. Elaboración propia.*

La Figura 5.3 muestra el costo total requerido según el número de puntos de monitoreo que se deseen implementar. Se observa un contraste abismal entre ambos sistemas: mientras que el costo de los equipos de referencia se dispara de manera drástica y exponencialmente superior en términos visuales y económicos al incrementar las unidades, el sistema desarrollado mantiene un impacto apenas perceptible. Por ejemplo, el despliegue de seis estaciones de referencia representa un costo astronómico de S/ 510,000.00.

En relación con los costos del sistema desarrollado, la inversión requerida para esas mismas seis estaciones asciende a tan solo S/ 18,402.00. Esta enorme disparidad evidencia una reducción financiera sin precedentes, alcanzando un ahorro relativo del 96.4 %.

Estos resultados ponen en evidencia que el uso de tecnologías de bajo costo rompe la barrera económica de los métodos tradicionales, permitiendo desplegar redes de monitoreo masivas y densas con una cobertura espacial exponencialmente mayor para el mismo presupuesto.

5.4. Ventajas operativas

En cuanto al proceso operativo, la medición de material particulado mediante el método gravimétrico resulta compleja y laboriosa, requiriendo personal especializado. Este procedimiento implica el retiro periódico de los filtros, su traslado al laboratorio, el acondicionamiento (secado) durante uno o dos días y su posterior pesaje mediante balanzas analíticas de alta precisión para determinar la masa de material particulado acumulado. Solo después de este proceso es posible obtener la concentración de $PM_{2.5}$, lo que limita la frecuencia de medición y aumenta los requerimientos de infraestructura y recursos humanos.

En contraste, las estaciones de monitoreo de bajo costo desarrolladas operan de manera autónoma y continua. Estas reportan la concentración de $PM_{2.5}$ cada 5 minutos, lo que permite observar la evolución de las concentraciones a lo largo del día. Adicionalmente, el sistema implementado genera de forma automática promedios diarios y presenta los resultados en una plataforma web, la cual clasifica la calidad del aire en categorías como buena, moderada o mala, de acuerdo con el Índice Nacional de Calidad del Aire (INCA). Asimismo, el sistema permite evaluar los niveles de concentración en concordancia con los lineamientos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), estableciendo umbrales de referencia para la protección de la salud frente a la exposición al material particulado.

Otra ventaja operativa relevante es su facilidad de instalación, ya que los dispositivos no requieren conexión a la red eléctrica convencional al estar alimentados por paneles solares. Esta característica permite su despliegue en ubicaciones diversas, incluso en zonas sin acceso a dicha infraestructura, lo que aporta una gran flexibilidad para situar los puntos de monitoreo según los criterios del estudio.

Finalmente, debido a su bajo costo, estas estaciones permiten una alta escalabilidad. Tal como se evidenció en el análisis de costos, la implementación de un sistema de monitoreo desarrollado representa una inversión anual de S/ 6,784.00 por estación, en contraste con el método gravimétrico tradicional, cuyo costo operativo asciende a S/ 55,874.00. Esto representa un ahorro económico del 87.9 %, lo que refuerza la viabilidad del sistema para el despliegue de redes de monitoreo más densas, eficientes y sostenibles en el tiempo.

Tabla 5.17

Comparación práctica entre el método gravimétrico de referencia y las estaciones de bajo costo para $PM_{2.5}$.

Aspecto	Método gravimétrico	Estaciones de monitoreo $PM_{2.5}$
Personal requerido	Requiere personal especializado para la operación del muestreador, manejo de filtros y análisis en laboratorio.	No requiere personal altamente especializado; la operación es mayormente autónoma y los datos se registran y transmiten automáticamente.
Obtención y frecuencia de datos	Entrega valores promediados cada 24 h, sin permitir observar la variación intra-diaria.	Permite registrar datos con alta resolución temporal (por ejemplo, cada 5 minutos), capturando la variación intra-horaria.
Esfuerzo operativo	Requiere retiro de filtros, transporte al laboratorio, secado y pesada, implicando mayor carga operativa.	Una vez instalados, los sensores requieren menor intervención para la generación continua de datos.
Costo y densidad de la red	El alto costo limita el número de puntos de monitoreo.	El menor costo permite implementar redes más densas y mejorar la cobertura espacial.
Visualización y uso de la información	Los resultados requieren procesamiento previo antes de su uso.	Los datos se visualizan de manera continua en una plataforma web, facilitando el monitoreo.

Nota. Elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se logró diseñar e implementar un sistema de monitoreo conformado por 6 estaciones inalámbricas de monitoreo capaces de cuantificar la concentración de material particulado $PM_{2.5}$, las cuales fueron diseñadas con autonomía energética mediante el uso de paneles solares y tecnología de comunicación LoRaWAN. El sistema permitió la adquisición, transmisión y visualización continua de datos, evidenciando un funcionamiento estable y adecuado para la evaluación de la calidad del aire en el área de estudio.
2. La selección de la tecnología de comunicación LoRaWAN fue la más apropiada, ya que permitió implementar exitosamente la transmisión de datos del sistema de monitoreo, logrando cobertura total del área de estudio y garantizando una comunicación confiable entre las estaciones de monitoreo y el gateway. La tasa de recepción de paquetes varió entre 91.7 % y 98.3 %, evidenciando un desempeño estable y robusto del enlace inalámbrico. Asimismo, los parámetros de calidad del enlace presentaron valores de RSSI entre -108 dBm y -80 dBm, y valores de SNR entre 4.2 dB y 10.2 dB, confirmando la fiabilidad de la comunicación en toda el área de monitoreo, incluso en las estaciones más alejadas del gateway.
3. Se diseñó y desplegó una interfaz web de usuario que integra la ubicación geográfica de las estaciones de monitoreo y permite visualizar las variaciones temporales de la contaminación, tanto a lo largo del día como en promedios diarios de $PM_{2.5}$. Esta plataforma automatiza la clasificación del estado del aire según el Índice de Calidad del Aire (INCA) y las directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS), lo que optimiza el acceso y la interpretación de la información ambiental generada por el sistema, consolidándose así como una herramienta eficaz para la gestión y toma de decisiones.
4. Para validar las mediciones de $PM_{2.5}$, se compararon inicialmente los datos de las estaciones de monitoreo con los del equipo certificado de referencia Dust Sentry. Tras el proceso de ajuste y calibración, las estaciones cumplieron e incluso superaron las métricas de evaluación recomendadas por la EPA, como se muestra en las Tablas 4.10 y 4.11 (páginas 111 y 112). Estos valores superaron los criterios mínimos establecidos por la EPA, lo que evidencia que las estaciones de monitoreo son capaces de medir concentraciones de $PM_{2.5}$ de manera comparable al

equipo de referencia y avala su uso para evaluar la calidad del aire en el área de estudio.

5. La evaluación económica consistió en una estimación proyectada de los costos de implementación y operación tanto del método gravimétrico tradicional como del sistema desarrollado, evidenciando que el prototipo generaría una ventaja financiera sustancial. Se estima un ahorro relativo anual del 87.9 %, lo que equivaldría a una reducción absoluta de S/. 49,090.00 por estación de monitoreo al disminuir el costo total anual de S/. 55,874.00 a solo S/. 6,784.00. A partir de estas proyecciones, se concluye que el sistema es económicamente viable y valida la transición hacia alternativas tecnológicas modernas que automatizan la operación y el registro del material particulado ($PM_{2.5}$) con una fracción del presupuesto convencional.
6. De los resultados obtenidos a través de las seis estaciones instaladas, se evidencia que la contaminación por $PM_{2.5}$ dentro del campus universitario presenta un comportamiento espacialmente homogéneo, registrando concentraciones similares en todos los puntos de muestreo. Esta uniformidad espacial sugiere que el contaminante se distribuye de manera regular en todo el entorno académico, registrando un coeficiente de variación de apenas 4.45 %, lo que evidencia que las mediciones poseen una baja dispersión .

RECOMENDACIONES

1. Se sugiere integrar un anemómetro con el objetivo de obtener la dirección y la velocidad del viento, lo cual resulta fundamental para identificar con mayor precisión las fuentes de contaminación, ya que permite analizar la dispersión del material particulado en función de las corrientes de aire.
2. Asimismo, se sugiere integrar un sensor de monóxido de carbono (CO), dado que este contaminante es un indicador fundamental de la combustión incompleta generada por el parque automotor. Al registrarse en grandes cantidades junto al $PM_{2.5}$ durante las horas de tráfico, la medición simultánea de ambos parámetros permitirá verificar y analizar la correlación directa entre las emisiones vehiculares periféricas y la calidad del aire dentro del campus universitario.
3. Se recomienda ampliar las pruebas de calibración y comparación mediante campañas de medición más prolongadas en diferentes épocas del año, con el fin de evaluar la correspondencia entre las lecturas del equipo Dust Sentry y las del sensor PMS7003. De esta manera, será posible verificar el desempeño y la estabilidad a largo plazo del dispositivo bajo diversas condiciones climáticas, permitiendo validar y consolidar los hallazgos obtenidos para asegurar la máxima confiabilidad de las mediciones.
4. Se recomienda respetar estrictamente las directrices establecidas por la EPA para la instalación y ubicación de los sensores durante su comparación con los equipos de referencia en los procesos de calibración. Para ello, deben considerarse criterios técnicos como la distancia a las fuentes de emisión, la altura de instalación y las posibles interferencias del entorno, con el fin de garantizar que las mediciones obtenidas sean representativas, precisas y confiables.

BIBLIOGRAFÍA

- Admin-Ogreen (2023). ¿cómo afecta el material particulado de industrias?
- Aix, M.-L., Schmitz, S., and Bicout, D. J. (2023). Calibration methodology of low-cost sensors for high-quality monitoring of fine particulate matter. *Science of The Total Environment*, 889:164063.
- Akbulut, S., Krupińska, B., Worobiec, A., Cevik, U., Taskın, H., Van Grieken, R., Samek, L., and Wilkojć, E. (2013). Gross alpha and beta activities of airborne particulate samples from wawel royal castle museum in cracow, poland. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295(2):1567–1573.
- Alfano, B., Barretta, L., Del Giudice, A., De Vito, S., Di Francia, G., Esposito, E., Formisano, F., Massera, E., Miglietta, M. L., and Polichetti, T. (2020). A review of low-cost particulate matter sensors from the developers’ perspectives. *Sensors*, 20(23):6819.
- Badura, M., Batog, P., Drzeniecka-Osiadacz, A., and Modzel, P. (2018). Evaluation of low-cost sensors for ambient pm2.5 monitoring. *Journal of Sensors*, 2018:5096540.
- Badura, M., Sówka, I., Batog, P., Szymański, P., and Dąbrowski, Ł. (2019). Sensor network for PM2.5 measurements on an academic campus area. *E3S Web Conf.*, 116:00004.
- Bustamante, B. and Ortega-Rosas, C. I. (2024). Partículas contaminantes y cambio climático: detonantes de alergias por pólenes y esporas. *ResearchGate*, 31(134):111–116.
- Chu, H.-J., Ali, M. Z., and He, Y.-C. (2020). Spatial calibration and PM2.5 mapping of low-cost air quality sensors. *Sci. Rep.*, 10:1–11.
- Clements, A., Duvall, R., Greene, D., and Dye, T. (2022). The enhanced air sensor guidebook. Technical Report EPA/600/R-22/213, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC.
- Connolly, R. E., Yu, Q., Wang, Z., Chen, Y.-H., Liu, J. Z., Collier-Oxandale, A., Papapostolou, V., Polidori, A., and Zhu, Y. (2022). Long-term evaluation of a low-cost

- air sensor network for monitoring indoor and outdoor air quality at the community scale. *Sci. Total Environ.*, 807:150797.
- Coutaud, U., Heusse, M., and Tourancheau, B. (2021). LoRa Channel Characterization for Flexible and High Reliability Adaptive Data Rate in Multiple Gateways Networks. *Computers*, 10(4):44.
- Duvall, R. M., Clements, A. L., Hagler, G., Kamal, A., Kilaru, V., Goodman, L., Frederick, S., Barkjohn, K. K. J., VonWald, I., Greene, D., and Dye, T. (2021). Performance testing protocols, metrics, and target values for fine particulate matter air sensors: Use in ambient, outdoor, fixed site, non-regulatory supplemental and informational monitoring applications. Technical report, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, NC 27711. Prepared by the U.S. Environmental Protection Agency, Oak Ridge Institute for Science and Education, Eastern Research Group, Inc., and TD Environmental Services, LLC.
- Estela, M. A. P. (2021). Monitoreo de material particulado (pm10) y variaciones climáticas en santiago de surco y san juan de miraflores, lima-perú, 2019.
- Felipe Brito, V. et al. (2022). Efectos sobre la salud humana de la exposición al aire contaminado por partículas pm10 y pm2, 5.
- Firtec (2023). Firtec - que es mqtt. [Online; accessed 24. Nov. 2023].
- Grupo Qaira, S. A. C. (2024). qAIRa Map. [Online; accessed 13. Sep. 2024].
- Gómez, M. M. G. (2021). Diseño e implementación de una red con sensores inalámbricos (wsn) utilizando protocolos open source basado en tecnología lorawan, para medir la contaminación del aire y los niveles de ruido en las extensiones de la universidad de guayaquil.
- Hernández, R. E. R. (2020). Prototipo de monitoreo de calidad de condiciones ambientales a bajo costo con tecnologías iot.
- Honeywell Sensing (2020). *HPM Series Particulate Matter Sensors Datasheet*. Honeywell. Document No. 32322550, Issue G.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2024). *Redes, Estaciones y Equipos de Medición de la Calidad del Aire*. INECC. Guía No. 3.
- Iqair (2023). Iqair world air quality report 2022 encuentra que solo el 5 [Online; accessed 16. Dec. 2023].

- Iyer, S. R., Balashankar, A., Aeberhard, W. H., Bhattacharyya, S., Rusconi, G., Jose, L., Soans, N., Sudarshan, A., Pande, R., and Subramanian, L. (2022). Modeling fine-grained spatio-temporal pollution maps with low-cost sensors. *npj Clim. Atmos. Sci.*, 5:1–8.
- Jain, S., Presto, A. A., and Zimmerman, N. (2021). Spatial Modeling of Daily PM_{2.5}, NO₂, and CO Concentrations Measured by a Low-Cost Sensor Network: Comparison of Linear, Machine Learning, and Hybrid Land Use Models. *Environ. Sci. Technol.*, 55(13):8631–8641.
- KapscoMoto (2025). 30a solar panel controller battery charge regulator 12v/24v auto with dual usb. [Online; accessed 1-Mar-2025].
- Kar, A., Ahmed, M., May, A. A., and Le, H. T. K. (2024). High spatio-temporal resolution predictions of PM_{2.5} using low-cost sensor data. *Atmos. Environ.*, 326:120486.
- Keyes, T., Domingo, R., Dynowski, S., Graves, R., Klein, M., Leonard, M., Pilgrim, J., Sanchirico, A., and Trinkaus, K. (2023). Low-cost pm_{2.5} sensors can help identify driving factors of poor air quality and benefit communities. *Heliyon*, 9(9):e19876.
- Kuan, F. (2024). ¿Qué es la tecnología LoRaWAN y cómo funciona? *MOKOSmart #1 Solución de dispositivo inteligente en China*.
- LILYGO (2025). T3 LoRa32 V1.6.1. [Online; accessed 14. Aug. 2025].
- Loomis, D., Huang, W., and Chen, G. (2014). The International Agency for Research on Cancer (IARC) evaluation of the carcinogenicity of outdoor air pollution: focus on China. *Chinese Journal of Cancer*, 33(4):189.
- LoRa Alliance (2015). *A Technical Overview of LoRa and LoRaWAN*, technical marketing workgroup 1.0 edition. LoRaWAN: What is it?
- LoRa Alliance Technical Committee (2022). Lorawan® regional parameters rp002-1.0.4. Technical report, LoRa Alliance. Authored by the LoRa Alliance Technical Committee, led by A. YEGIN (Actility) and O. SELLER (Semtech), Working Group Chair: D. KJENDAL (Senet), Editor: D. KJENDAL (Senet).
- Lu, Y., Giuliano, G., and Habre, R. (2021a). Estimating hourly pm_{2.5} concentrations at the neighborhood scale using a low-cost air sensor network: A los angeles case study. *Environmental Research*, 195:110653.

- Lu, Y., Giuliano, G., and Habre, R. (2021b). Estimating hourly PM_{2.5} concentrations at the neighborhood scale using a low-cost air sensor network: A Los Angeles case study. *Environ. Res.*, 195:110653.
- Macías, J. P. V. (2020). Diseño e implantación de red telemática de sensores inalámbricos para optimización de riego. Master's final project, Universidad de Sevilla. Departamento de Ingeniería Telemática, Sevilla, España. Deposit Date: 2021-04-15.
- Magdy, K. (2023). Arduino DHT22 Library Code Examples & Tutorial. *DeepBlue*.
- Met One Instruments, Inc. and Intecon (2023). Bam 1022: Monitor de masa de atenuación beta portátil en tiempo real. [Ficha técnica e imagen en Internet]. Grants Pass (OR): Met One Instruments; [citado 2026-02-20].
- Mikroe (2024). NB IoT 4 Click. [Online; accessed 2. Sep. 2024].
- Ministerio del Ambiente (2016). Resolución Ministerial N° 181-2016-MINAM. *Diario Oficial El Peruano*. Crea el Índice de Calidad del Aire (INCA) y el Sistema de Información de Calidad del Aire – INFO AIRE PERÚ.
- Ministerio del Ambiente (2019). Decreto supremo n.° 10-2019-minam. [Online; accessed 18. Jul. 2024].
- Moheddine, A., Patrone, F., and Marchese, M. (2022). UAV-based LoRaWAN flying gateway for the internet of flying things. *Int. J. Commun. Syst.*, 36(13).
- MokoLora (2023). LPWAN IoT: ¿Por qué LPWAN es necesaria en el mundo de IoT? [Online; accessed 19. Mar. 2025].
- Muñoz, R. R. T. (2020). Tecnologías de medición de contaminantes aéreos. *Bcn*.
- Nanchang Panteng Technology Co., L. (2024). Plantower technology. <https://www.plantower.com/en>. [Online; accessed 10. Nov. 2024].
- Narváez, K. S. N. (2020). Diseño y desarrollo de un prototipo de red de sensores iot utilizando tecnolog´lorawan para el monitoreo de parámetros ambientales en interiores y exteriores.
- NASA Power Project (2026). Nasa power data access viewer (dav), version 2.6.2. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>. Data obtained from NASA Langley Research Center's Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER) project. Accessed 2026-05-15.

- Noreen, U., Bounceur, A., and Clavier, L. (2017). A study of LoRa low power and wide area network technology. *ResearchGate*, pages 1–6.
- Omega Peru S.A. (2021). Filtros de disco de membrana de ptfe. [imagen en Internet]. Lima (PE): Omega Peru S.A. [citado 2026-02-08].
- Patel, M. Y., Vannucci, P. F., Kim, J., Berelson, W. M., and Cohen, R. C. (2024). Towards a hygroscopic growth calibration for low-cost pm_{2,5} sensors. *Atmospheric Measurement Techniques*, 17(3):1051–1060.
- Porras Gaviria, M. J. (2023). Evaluación de la exposición a PM2.5 y PM10 en interiores y exteriores en la Universidad Autónoma de Occidente. *Red UAO Home*.
- Qi, Y., Wei, S., Xin, T., Huang, C., Pu, Y., Ma, J., Zhang, C., Liu, Y., Lynch, I., and Liu, S. (2022). Passage of exogeneous fine particles from the lung into the brain in humans and animals. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 119(26):e2117083119.
- RAKwireless Technology Limited (2025). Web Management Platform – RAKwireless Learn. [En línea; consultado el 2 de marzo de 2025].
- Ramos, K. D. C. (2019). Determinación de material particulado menor a 10 μ m y 2.5 μ m, nitratos y sulfatos, y su relación con la disminución de la función pulmonar en vendedores ambulantes expuestos en el centro histórico del cusco.
- Recalde, C., Colmán, F., Rodríguez, A. R., Bernal, L. F., et al. (2021). Determinación y análisis de las concentraciones de material particulado medido por una red de monitoreo continuo para la ciudad de asunción.
- Ruiz, I. L. N., Castañeda, R. M. A., et al. (2020). Implementación red de sensores inalámbricos de bajo costo utilizando protocolo lorawan aplicada al monitoreo de material particulado, monóxido de carbono y dióxido de nitrógeno como indicadores de calidad de aire en exteriores.
- Ruiz Abad, P. A. (2018). Evaluación de la calidad del aire en la ciudad de huamanga a través de la determinación de materiales particulados pm10 por gravimetría con impactadores harvard.
- Sampieri, R. H. (2020). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. McGraw-Hill, 1 edition.
- Sebastián, F. (2016). Estudios mecánicos del efecto nocivo de las partículas urbanas de buenos aires sobre grupos etarios susceptibles y su modulación por simvastatina en tejidos pulmonar y cerebral.

- Semtech (2020). Lora and lorawan: A technical overview. Technical paper, Semtech. Proprietary.
- Sensirion (2021). *Sensor Specification Statement: How to Understand Specifications of Sensirion Particulate Matter Sensors*. Sensirion The Sensor Company. Technical Application Note.
- Sousan, S., Koehler, K., Hallett, L., and Peters, T. M. (2017). Evaluation of consumer monitors to measure particulate matter. *Journal of aerosol science*, 107:123–133.
- Suárez Salas, L., Álvarez Tolentino, D., Bendeزú, Y., and Pomalaya, J. (2017). Caracterización química del material particulado atmosférico del centro urbano de Huancayo, Perú. *Rev. Soc. Quím. Perú*, 83(2):187–199.
- Sy Corvo, H. (2024). Topologías de red: qué son, tipos y sus características, ejemplos. [Online; última edición el 6 de septiembre de 2024; acceso 24 de junio de 2025].
- Taylor, T. et al. (2024). Guías de usuario en pdf. Aeroqual Help Center - v1.4.
- Technology, R. (2025). Gateway. [Online; accessed 2. Jan. 2025].
- Torres, C. (2023). El distrito escolar unificado de los Ángeles y cca construyen la red de sensores de calidad del aire exterior en las escuelas más grande del país. Accedido el 13 de septiembre de 2024.
- Tryner, Jessica y Volckens, J. (2023). Comprendiendo sensores de pm de bajo costo: un “despiece” se encuentra con la ciencia de aerosoles. Presentación en conferencia. Descripción general del aseguramiento de calidad (QA) para sensores de material particulado.
- Ultralife Corporation (2024). Urb1270 - lifepo4 battery 12v 7.5ah. Mouser Electronics. Mouser Part No: 5169-URB1270.
- Van Poppel, M., Schneider, P., Peters, J., Yarkin, S., Gerboles, M., Matheeußen, C., Bartonova, A., Davila, S., Signorini, M., Vogt, M., Dauge, F. R., Skaar, J. S., and Haugen, R. (2023). SenseURCity: A multi-city air quality dataset collected for 2020/2021 using open low-cost sensor systems. *Sci. Data*, 10(322):1–16.
- Weather Atlas (2025). About Us | Weather Atlas. [Online; accessed 20. Jan. 2025].
- Who, W. H. O. (2021). Las nuevas directrices mundiales de la oms sobre la calidad del aire tienen como objetivo evitar millones de muertes debidas a la contaminación del aire. *World Health Organization: WHO*.

- WHO, W. H. O. (2022). La oms publica el primer informe mundial sobre prevención y control de infecciones (pci).
- WooCommerce, C. C. S. Y. (2020). Sigfox: ventajas y funcionalidades de la tecnología IoT - Productos IoT.
- World Health Organization (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. World Health Organization, Geneva.

ANEXOS

Anexo A: Hoja de datos del sensor PMS7003 modelo D7.

SC Technology Limited

SPECIFICATIONS

Dust Sensor D7

V4.0



SUMMARIZE

D7 Dust Sensor is one type of laser particle sensor module. It can measure the quantity of different size of dust and it can be converted to $\mu\text{g}/\text{m}^3$ according to the mathematical algorithm and output $\mu\text{g}/\text{m}^3$ directly. The range of particle can be measured from 0.3 to $10\mu\text{m}$. It can provide two types of optional signal output and has a unique start-up self-calibration function. The sensor consists of a laser emission module and a light detection lens. It is crossed and placed inside the structure. The sensor has good consistency, stability, small size and easy integration. The sensor can be embedded in various instruments or devices related to particulate matter concentration to provide accurate real-time data.

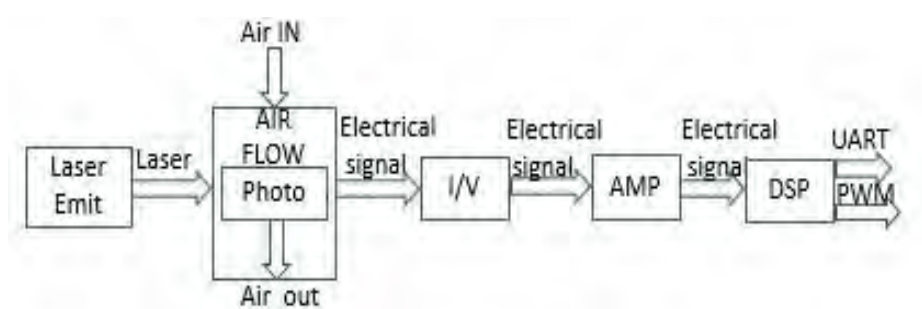
FEATURES

- ✧ Small size, 48*37*12mm
- ✧ High accuracy, digital display prioritized
- ✧ Smallest size of available measurement : $0.3\mu\text{m}$
- ✧ Use the dual-frequency data acquisition technology
- ✧ Unique laser calibration technology
- ✧ Two types of optional signal output: UART-TTL; PWM
- ✧ High sensitive ,quick response and provide continuous acquisition

Principle of particle measurement

IN the air cavity, when sampling particles pass through light beam , there will be light scattering phenomenon. Collect the scattered light, it will be converted into the electrical signal .The bigger particles will obtain stronger pulse single. Through peak value and pulse value, the microprocessor can calculate the equivalent grain size of particles of different size particles per unit volume and quantity and that is real-time data.

Block Diagram



Quality and Reliability

MTBF : 20,000 Power On hours (POH)

Assumption : Used in a normal office environment at room temperature.

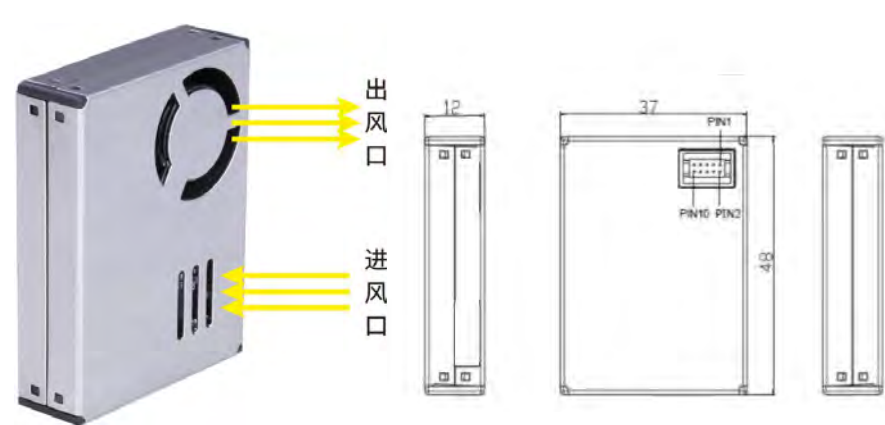
Component Life : 20,000h of Fan operating time

Assumption : Used in a normal office environment

Specifications

Items	Min	Typ	Max	Unit
Detection size	0.3	2.5	10	μm
Concentration range		1000		μg/m3
Resolution	-	1	-	μg/m3
Source Voltage	4.90	5	5.10	V
IO LEVEL	2.7	3.3	3.6	V
Current	-	-	70	mA
Response Time	0	5	10	S
Operating Temperature	-10	25	60	℃
Storage Temperature	-30	25	80	℃
Operating humidity (Non-Condensing)	5%	40%	80%	RH
Storage humidity (Non-Condensing)	0%	40%	95%	RH
Accuracy	PM1.0/PM2.5:0~35ug/m ³ :±5ug/m ³ ,35ug/m ³ ~500ug/m ³ :±15% of reading			
	PM10:0~100ug/m ³ :±25ug/m ³ ,101~500ug/m ³ :±25% of reading			
	(GRIMM,25±2℃,50±10%RH)			

PIN ASSIGNMENT

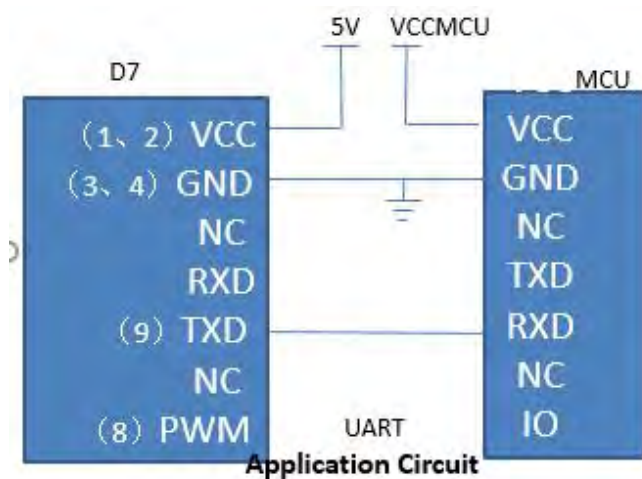


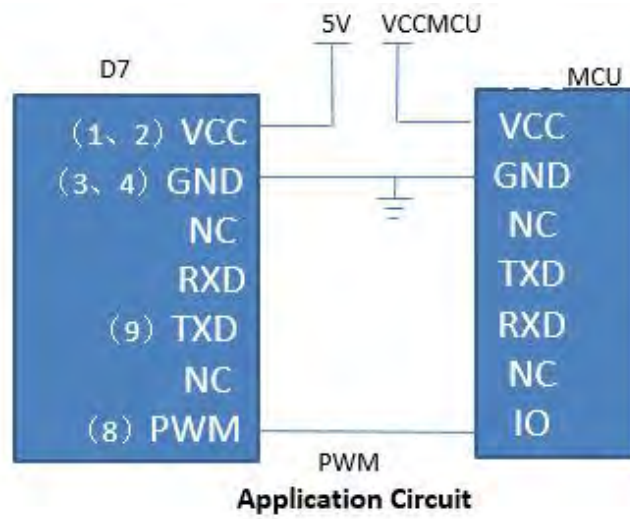
PIN1	VCC	POWER INPUT 5V
PIN2	VCC	POWER INPUT 5V
PIN3	GND	GROUNG
PIN4	GND	GROUNG
PIN5	NC	NC
PIN6	PWM	PWM OUTPUT (0~3.3V) reserverd
PIN7	RXD	PM2.5 UART INPUT (0~3.3V)
PIN8	NC	NC
PIN9	TXD	PM2.5 UART OUTPUT (0~3.3V)
PIN10	NC	NC

OUTPUT MODE

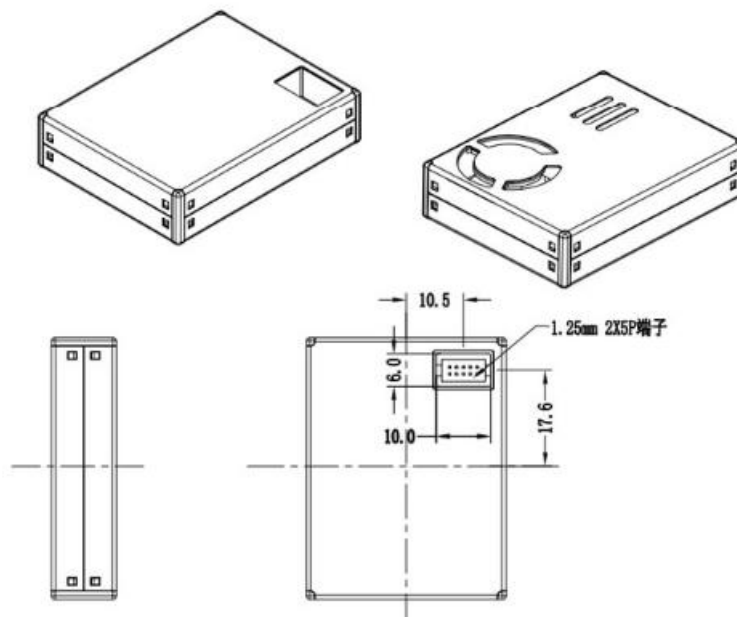
UART	default	3.3V TTL
PWM	default	3.3V TTL

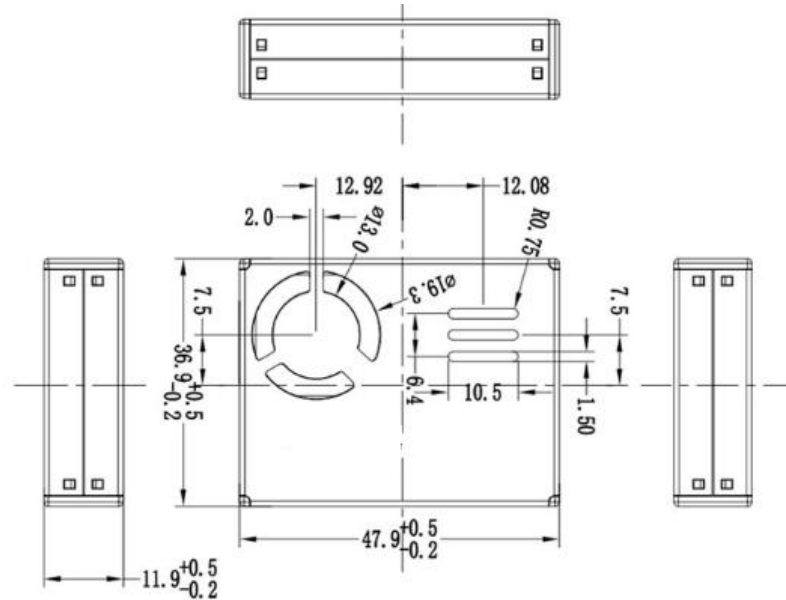
Application Circuit





Products Dimension





Caution

1. Conducting metal shell and internal power of sensor , be careful not to short with external circuit or chassis shell.
2. The sensor air inlet and outlet is exposed within a radius of 2 cm.
3. Equipment inlet and outlet hole sizes should be bigger than the sensor air inlet hole size.
4. TO avoid the sensor installed in cleaner air duct, should design independent space structure.
5. Do not let any liquid or foreign substances in the drive.
6. Do not open or remove the cover.
7. Do not dispose the sensor to the water or the high humidity.

UART OUTPUT MODE (Band Rate: 9600, 8N1)

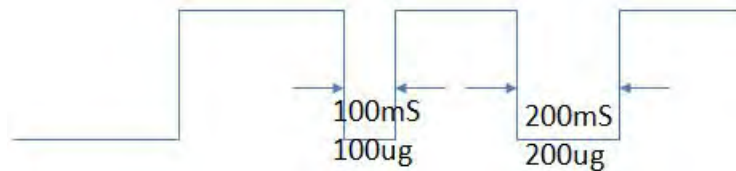
BYTE	BYTE-NAME	Description
Byte1	Header0	0x42
Byte2	Header1	0x4d
Byte3	F-Length0	Frame Length= 0X001C
Byte4	F-Length1	
Byte5	Data0-H	PM1.0 concentration
Byte6	Data0-L	
Byte7	Data1-H	PM2.5 concentration
Byte8	Data1-L	
Byte9	Data2-H	PM10 concentration
Byte10	Data2-L	
Byte11	Data3-H	PM1.0 concentration(same with Byte 4& 5)
Byte12	Data3-L	
Byte13	Data4-H	PM2.5 concentration(same with Byte 6& 7)
Byte14	Data4-L	
Byte15	Data5-H	PM10 concentration(same with Byte 8& 9)
Byte16	Data5-L	
Byte17	Data6-H	Reserved
Byte18	Data6-L	
Byte19	Data7-H	Reserved
Byte20	Data7-L	
Byte21	Data8-H	Reserved
Byte22	Data8-L	
Byte23	Data9-H	Reserved
Byte24	Data9-L	
Byte25	Data10-H	Reserved
Byte26	Data10-L	
Byte27	Data11-H	Reserved
Byte28	Data11-L	
Byte29	Data12-H	Reserved

Byte30	Data12-L	
Byte31	Checksum-H	Checksum =Byte1 + Byte2+.....+ Byte29+ Byte30
Byte32	Checksum-L	

PWM OUTPUT Mode

The PWM signal out from PWM PIN. PWM period is 1S. The low pulse time is Pm2.5 concentration.

For example:



Anexo B: Hoja de datos del equipo de referencia Dust Sentry.

Dust Sentry

Specification Sheet

Near reference real-time particle monitor

Designed for environmental professionals who need to monitor and manage multiple outdoor dust and particle size fractions, simultaneously, in real-time.

The Dust Sentry with PCX delivers simultaneous measurement of TSP, PM₁₀, PM₄, PM_{2.5} and PM₁. It is MCERTS certified for PM₁₀ and PM_{2.5} and South Coast AQMD 1466 pre-approved for PM₁₀.

The Dust Sentry with nephelometer measures one PM fraction depending on the cyclone separator selected and is MCERTS certified and South Coast AQMD 1466 pre-approved for PM₁₀.

aeroqual[®]



Benefits

- Set up and deploy in under 5 minutes - get live data flowing to your PC or mobile
- Minimize downtime and failure with a purpose-built outdoor monitor
- Eliminate flow checks with integrated flow sensing and automated control (PCX)
- Reduce site visits with two-way communications that allow you to calibrate, remotely troubleshoot, upgrade software, and change settings
- Avoid invalid data caused by incorrect wind sensor orientation with a fully integrated self-orientating met sensor (optional)
- Power up with quick and easy interface to solar and battery systems
- Act swiftly before an exceedance occurs with real-time alerts

What can it measure?

- Specific dust fractions, wind, weather and noise



Who is it for?

- Industrial site operators who need to manage dust and particulates from site activities, within regulatory or permitted limits:
 - Construction and remediation projects
 - Quarry and mine operators
 - Port and bulk handling terminals
 - Waste management sites
- Environmental consultants who want defensible data without the usual time and hassle of air monitoring projects
- Regulatory authorities who need to fill gaps in the regulatory PM monitoring network
- EHS managers who need to demonstrate that they are providing a safe environment for the people in their care
- Researchers who want to collect accurate, scientifically robust data without the cost of a reference PM monitor

Specifications | Dust Sentry

Particle module	Particulate Matter Size Fractions	Range	Display Resolution	LDL (2σ)	Precision	Accuracy	Zero Stability	Particle Size Range
PCX ¹	PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₄ , PM ₁₀ and TSP	0 to 30,000 µg/m ³	0.1 µg/m ³	0.1 µg/m ³	± 3% of reading	< 5% of reading	± 0.1 µg/m ³ over 24 hour period	0.1 µm to 40 µm
Nephelometer	PM ₁ , PM _{2.5} , PM ₁₀ or TSP	0 to 60,000 µg/m ³	0.1 µg/m ³	<1 µg/m ³	± 1% of reading	±(2 µg/m ³ + 5% of reading)	± 0.1 µg/m ³ over 24 hour period	0.1 µm to 40 µm
System Specifications								
Control system	Embedded PC with on board data storage (>5 years)							
Communications ²	Standard: WIFI, Ethernet (LAN) Optional modem: Cellular IP 4G LTE, Integrated high gain antenna							
Software	Talk to our sales team to learn more about Aeroqual Cloud plans.							
Averaging period	User selectable-averaging interval from 1 min to 24 hr							
Power requirements ³	100-260 VAC or 9-36VDC battery/solar: Power usage: 15 to 30 W max steady state (configuration dependent)							
Enclosure	Lockable IP65 GRP cabinet with integrated aluminum solar shield armor, mounting bracket and (PCX) built in temp/RH sensor							
Dimensions	Dust Sentry (PCX): 685 mm x 330 mm x 187 mm (27" x 13" x 7½") [HxWxD] Includes PM inlet Dust Sentry (Nephelometer): 843 mm x 330 mm x 187 mm (33" x 13" x 7½") [HxWxD] Includes PM inlet							
Weight ⁴	< 13 kg (28.6 lbs)							
Operating range	-10 °C to +45 °C (14 °F to 113 °F) Low temperature operation extendable with winterization pack							
Mounting	Pole, tripod and wall mounting brackets included. Optional tripod mount available.							
Factory integrated sensors ⁵	Gill WindSonic (ultrasonic wind sensor), Vaisala WXT536 (weather transmitter), Cirrus MK427 Class 1 (noise sensor), Novalynx Pyranometer (solar radiation), Airmar 200WX (weather station)							
Compatible tested sensors	A wide range of other sensors can be connected including: Victron SmartSolar MMPT 100-20 (solar charge controller), BSWA 308 (sound level meter), Svantek SV971A (sound level meter). Contact Aeroqual for more information.							
Inputs/Outputs ⁶	0-5V analog input, 4-20mA input, configurable relay output							
PM System Specifications								
Inlet	Omni-directional sample inlet with integrated heater							
Sample Flow	12 V brushless DC diaphragm with automated flow measurement and control system (PCX)							
Optics	PCX: 650 nm industrial laser, hemispherical-focusing OPC Nephelometer: 670 nm laser, near-forward scattering nephelometer							
Zero calibration	Auto-zero on start-up and at user-selected intervals							
Compliance								
In conformity with EC Directives 2014/30/EU and 2014/35/EU; FCC 47 CFR Part 15; RoHS 3 (EU2015/863), REACH								
Certified Modules			MCERTS			South Coast AQMD rule 1466		
Dust Sentry PM ₁₀ Nephelometer			Yes - Sira MC130235/02			Yes		
Dust Sentry PCX			PM ₁₀ PM _{2.5}			Yes N/A		

Temp | Humidity | Pressure | Differential Pressure | Vacuum | Gases | Particle | Air Flow
Moisture | Dissolved Oxygen | Radiation | Air Quality | Light / Lux | Distance | Vibration

Instrukart Holdings

Ph : +91 (40)40262020 | Mob : +91 88865 50506;

Email : info@instrukart.com | www.instrukart.com

Head Office: #18, Street-1A, Czech Colony, Sanath Nagar, Hyderabad -500018, INDIA.



Anexo C: Certificado de calibración del equipo Dust Sentry



PRODUCT CONFORMITY CERTIFICATE

This is to certify that the

Dust Sentry PCX

Manufactured by:

Aeroqual Ltd

460 Rosebank Road, Avondale
Auckland, 1026
New Zealand

has been assessed by CSA Group
and for the conditions stated on this certificate complies with:

MCERTS Performance Standards for Indicative Ambient Particulate Monitors, Environment Agency, August 2017, version 4

Certification ranges:

PM_{2.5} 0 - 75 µg/m³
PM₁₀ 0 - 150 µg/m³

Project No.: 80201275
Certificate No: CSA MC240434/00
Initial Certification: 28 March 2024
This Certificate issued: 28 March 2024
Renewal Date: 27 March 2029

Andrew Young
Environmental Team Manager

MCERTS is operated on behalf of the Environment Agency by

CSA Group Testing UK Ltd

Unit 6, Hawarden Industrial Park
Hawarden, Deeside, CH5 3US
Tel: +44 (0)1244 670 900



*The MCERTS certificate consists of this document in its entirety.
For conditions of use, please consider all the information within.
This certificate may only be reproduced in its entirety and without change
To authenticate the validity of this certificate please visit www.csagroupuk.org/mcerts*



Certificate Contents

Approved Site Application	2
Basis of Certification	2
Product Certified	3
Certified Performance	4
Description	6
General Notes	6

Approved Site Application

Any potential user should make sure, in consultation with the manufacturer, that the monitoring system is suitable for the intended application. For general guidance on monitoring techniques refer to the Environment Agency guidance available at www.mcerts.net

The indicative dust monitoring analyser(s) can be operated in one of two ways:

For qualitative measurements: Providing qualitative measurement data for the analysis of particulate pollution trends, and source identification studies based for example on pollution roses etc. Such application can rely on instrument factory calibration only.

For quantitative measurements: Providing measurement data with the uncertainty defined for indicative instruments (+/- 50%). This can be achieved on condition that each instrument used for measurement has been calibrated on the specific site where monitoring is taking place against a standard reference method for a period of two weeks and the resulting slope and intercept have been used for instrument calibration. Using non-standard filters and procedures for this purpose is not acceptable. To maintain the validity of data this calibration has to be repeated at least every twelve months or when the instrument is moved to a different site.

They **cannot** be used on national automatic monitoring networks for compliance reporting against the Ambient Air Quality Directives.

The field tests were carried out from the 6 May 2023 to the 18 July 2023 on two candidate 'Dust Sentry PCX' samplers, collocated with a Palas Fidas 200E instrument (the reference method). The field test location was at English Park, Cranford Street, St Albans, Christchurch, New Zealand. The serial numbers of the two 'Dust Sentry PCX' monitors were 'AQS-PCX-3' and 'AQS-PCX-5'.

Basis of Certification

This certification is based on the following test report(s) and on CSA Group's assessment and ongoing surveillance of the product and the manufacturing process:

K2 Environmental Ltd, test report ref. 'Y0360', 28 November 2023, Issue 1 - "Dust Sentry MCertification Requirement"

Certificate No: CSA MC240434/00
This Certificate issued: 28 March 2024

*This certificate may only be reproduced in its entirety and without change
To authenticate the validity of this certificate please visit www.csagroupuk.org/mcerts*



Product Certified

The 'Dust Sentry PCX' measuring system consists of the following parts:

- 650nm laser OPC (Optical Particle Counter)
- Omni-directional sample inlet with integrated heater
- Pump with active flow control (12V brushless DC diaphragm)
- Lockable IP65 cabinet (dimensions 685mm x 330mm x 187mm) with integrated aluminium solar shield armour and built in temp/RH sensor

Sensor type and firmware version

Sensor model number PCX v1.0 with firmware version v1.0.0

This certificate applies to all instruments fitted with serial number "Instrument Model-Date-2473" onwards.

Certificate No: CSA MC240434/00
This Certificate issued: 28 March 2024

*This certificate may only be reproduced in its entirety and without change
To authenticate the validity of this certificate please visit www.csagroupuk.org/mcerts*



Certified Performance

Test (<i>Laboratory</i>)	Results expressed as % of the certification range				Other results	MCERTS specification
	<0.5	<1	<2	<5		
Constancy of the sample volumetric flow			1.5			To remain constant within $\pm 3\%$
Tightness of the sampling system		0.93				Leakage not to exceed 2% of sampled volume

Certificate No: CSA MC240434/00
This Certificate issued: 28 March 2024

*This certificate may only be reproduced in its entirety and without change
To authenticate the validity of this certificate please visit www.csagroupuk.org/mcerts*



Test (Field)	Results expressed as % of the certification range				Other results	MCERTS specification
	<0.5	<1	<2	<5		
Intra-instrument uncertainty for the reference method						
PM ₁₀					0.67 µg/m ³	≤2.5µg/m ³
PM _{2.5}					0.67 µg/m ³	≤2.5µg/m ³
Intra-instrument uncertainty for the candidate method						
PM ₁₀						
All data (n=74)					1.64 µg/m ³	≤5µg/m ³ for all data as well as for the subsets:
≥ 30 µg/m ³ (n=8)					1.31 µg/m ³	< or ≥ 30 µg/m ³
< 30 µg/m ³ (n=66)					1.68 µg/m ³	
PM _{2.5}						
All data (n=74)					1.00 µg/m ³	≤5µg/m ³ for all data as well as for the subsets:
≥ 18 µg/m ³ (n=14)					1.35 µg/m ³	< or ≥ 30 µg/m ³
< 18 µg/m ³ (n=60)					0.90 µg/m ³	
Highest resulting uncertainty estimate comparison against data quality objective (Measurement Uncertainty)						
PM ₁₀						W _{CM} ≤50%
All data (n=74)					32.4%	W _{CM} ≤ W _{dpo}
Slope corrected (n=74, note 1)					13.9%	(W _{dpo})
≥ 30 µg/m ³ (n=8)					48.3%	Measurement uncertainty defined as 50% for indicative instruments)
Slope corrected (n=8)					35.4%	
PM _{2.5}						
All data (n=74)					36.1%	
Slope corrected (n=74, note 2)					18.5%	
≥ 18 µg/m ³ (n=14)					40.1%	
Slope corrected (n=14)					21.0%	
Maintenance Interval					6 weeks Note 3	≥2 weeks

Note 1 - for PM₁₀ this data was slope corrected for all data and for the dataset ≥30 µg/m³.

Note 2 - for PM_{2.5} this data was slope corrected for all data and for the dataset ≥30 µg/m³.

Note 3 - Maintenance - the manufacturer recommends a maintenance interval of 6 weeks (although the instrument performed for 10 weeks during the field trial with no maintenance required) and that users following the guidance in the user manual under section "6.5 Scheduled Maintenance" (page 69).

Certificate No: CSA MC240434/00
This Certificate issued: 28 March 2024

*This certificate may only be reproduced in its entirety and without change
To authenticate the validity of this certificate please visit www.csagroupuk.org/mcerts*



Description

The Dust Sentry with PCX is a laser-based particle monitor that provides continuous and simultaneous measurement of PM_{2.5} and PM₁₀ in a weather-proof, lockable enclosure designed for outdoor monitoring applications.

General Notes

1. This certificate is based upon the equipment tested. The Manufacturer is responsible for ensuring that on-going production complies with the standard(s) and performance criteria defined in this certificate. The manufacturer is required to maintain an approved quality management system controlling the manufacture of the certified product. Both the product and the quality management system shall be subject to regular surveillance according to 'Regulations Applicable to the Holders of CSA Group Testing UK Ltd Certificates'.
2. The design of the product certified is defined in the CSA Group design schedule for certificate no. CSA MC240434/00.
3. If a certified product is found not to comply, CSA Group should be notified immediately at the address shown on this certificate.
4. The certification marks that can be applied to the product or used in publicity material are defined in 'Regulations Applicable to the Holders of CSA Group Testing UK Ltd Certificates'.
5. This document remains the property of CSA Group and shall be returned when requested by CSA Group

Certificate No: CSA MC240434/00
This Certificate issued: 28 March 2024

*This certificate may only be reproduced in its entirety and without change
To authenticate the validity of this certificate please visit www.csagroupuk.org/mcerts*

Anexo D: Código de programación de la tarjeta de desarrollo.

```

1 #include <lmic.h>
2 #include <hal/hal.h>
3 #include <SPI.h>
4 #include "Plantower_PMS7003.h"
5 #include <DHT.h>
6
7 #define SAMPLE_COUNT 150           // Numero de muestras necesarias para transmitir
8 #define SAMPLE_INTERVAL 2*1000 // Intervalo entre muestras (en milisegundos)
9 #define PMS7003_RX 21
10 #define PMS7003_TX 22
11 #define DHT_PIN 25                 // Pin para sensor DHT22
12 #define DHT_TYPE DHT22            // Tipo de sensor DHT
13
14 Plantower_PMS7003 pms7003 = Plantower_PMS7003();
15 DHT dht(DHT_PIN, DHT_TYPE);
16
17 static osjob_t sendjob;
18 unsigned long lastSampleTime = 0;
19 boolean joined = false;
20
21 // Arrays para almacenar muestras
22 float pm1_samples[SAMPLE_COUNT] = {0};
23 float pm25_samples[SAMPLE_COUNT] = {0};
24 float pm10_samples[SAMPLE_COUNT] = {0};
25 float temperature_samples[SAMPLE_COUNT] = {0};
26 float humidity_samples[SAMPLE_COUNT] = {0};
27 uint8_t current_sample = 0;
28
29 // Claves LoRaWAN OTAA
30 static const u1_t PROGMEM APPEUI[8] = { 0x12, 0x3F, 0x32, 0x42, 0x42, 0x43, 0x33, 0x35
    };
31 static const u1_t PROGMEM DEVEUI[8] = { 0xC7, 0xEC, 0x06, 0xD0, 0x7E, 0xD5, 0xB3, 0x70
    };
32 static const u1_t PROGMEM APPKEY[16] = { 0x1E, 0x66, 0x1E, 0x88, 0x40, 0xA2, 0xCF, 0
    x65, 0x61, 0x20, 0x6A, 0xD0, 0xA7, 0xDC, 0x60, 0x3C };
33
34 // Mapeo de pines para ESP32
35 const lmic_pinmap lmic_pins = {
36     .nss = 18,
37     .rxtx = LMIC_UNUSED_PIN,
38     .rst = 23,
39     .dio = {26, 33, 32}
40 };
41
42 void os_getArtEui(u1_t* buf) { memcpy_P(buf, APPEUI, 8); }
43 void os_getDevEui(u1_t* buf) { memcpy_P(buf, DEVEUI, 8); }
44 void os_getDevKey(u1_t* buf) { memcpy_P(buf, APPKEY, 16); }
45
46 // Calcular promedio de muestras de tipo float
47 float calculate_float_average(float* samples) {
48     float sum = 0;

```

```

49     for (int i = 0; i < SAMPLE_COUNT; i++) {
50         sum += samples[i];
51     }
52     return sum / SAMPLE_COUNT;
53 }
54
55 void take_sample() {
56     // Leer sensor DHT22
57     float humidity = dht.readHumidity();
58     float temperature = dht.readTemperature();
59
60     // Validar lecturas del DHT22
61     if (isnan(humidity) || isnan(temperature)) {
62         Serial.println(" Error al leer sensor DHT22!");
63         return;
64     }
65
66     // Actualizar frame del sensor PMS7003
67     pms7003.updateFrame();
68     // Verificar si hay nuevos datos del PMS
69     if (pms7003.hasNewData()) {
70         float pm1 = pms7003.getPM_1_0_atmos() ;
71         float pm25 = pms7003.getPM_2_5_atmos() ;
72         float pm10 = pms7003.getPM_10_0_atmos() ;
73
74         // Almacenar muestras
75         pm1_samples[current_sample] = pm1;
76         pm25_samples[current_sample] = pm25;
77         pm10_samples[current_sample] = pm10;
78         temperature_samples[current_sample] = temperature;
79         humidity_samples[current_sample] = humidity;
80
81         // Imprimir depuracion
82         Serial.print("Muestra ");
83         Serial.print(current_sample + 1);
84         Serial.print(" - PM1.0: ");
85         Serial.print(pm1, 2);
86         Serial.print(", PM2.5: ");
87         Serial.print(pm25, 2);
88         Serial.print(", PM10: ");
89         Serial.print(pm10, 2);
90         Serial.print(", Temp: ");
91         Serial.print(temperature);
92         Serial.print(" C , Humedad: ");
93         Serial.print(humidity);
94         Serial.println("%");
95
96         current_sample++;
97
98         // Verificar si se completaron todas las muestras
99         if (current_sample >= SAMPLE_COUNT) {
100             current_sample = 0; // Reiniciar ndice
101             do_send(&sendjob); // Enviar datos
102         }
103     }
104 }
105

```

```

106 void onEvent(ev_t ev) {
107     switch(ev) {
108         case EV_JOINING:
109             Serial.println(F("Intentando unirse a red LoRaWAN (OTAA)..."));
110             joined = false;
111             break;
112
113         case EV_JOINED:
114             Serial.println(F("Unido a red LoRaWAN"));
115             joined = true;
116             LMIC_setLinkCheckMode(0);
117             break;
118
119         case EV_TXCOMPLETE:
120             Serial.println(F("Transmisi n completada"));
121             break;
122
123         case EV_JOIN_FAILED:
124             Serial.println(F("Intento de uni n fallido"));
125             break;
126     }
127 }
128
129 void do_send(osjob_t* j) {
130     if (!(LMIC.opmode & (OP_TXRXPEND | OP_TXDATA))) {
131         // Calcular promedios
132         float pm1_avg = calculate_float_average(pm1_samples);
133         float pm25_avg = calculate_float_average(pm25_samples);
134         float pm10_avg = calculate_float_average(pm10_samples);
135         float temp_avg = calculate_float_average(temperature_samples);
136         float humidity_avg = calculate_float_average(humidity_samples);
137         // Preparar payload - 16 bytes en total
138         uint8_t payload[16];
139         // Convertir valores de punto flotante(float) a enteros (int)
140         int32_t pm1_scaled = (int32_t)(pm1_avg * 100);
141         int32_t pm25_scaled = (int32_t)(pm25_avg * 100);
142         int32_t pm10_scaled = (int32_t)(pm10_avg * 100);
143         int16_t temp_scaled = (int16_t)(temp_avg * 100);
144         int16_t humidity_scaled = (int16_t)(humidity_avg * 100);
145
146         // Preparar payload con valores escalados
147         payload[0] = (pm1_scaled >> 24) & 0xFF;
148         payload[1] = (pm1_scaled >> 16) & 0xFF;
149         payload[2] = (pm1_scaled >> 8) & 0xFF;
150         payload[3] = pm1_scaled & 0xFF;
151         payload[4] = (pm25_scaled >> 24) & 0xFF;
152         payload[5] = (pm25_scaled >> 16) & 0xFF;
153         payload[6] = (pm25_scaled >> 8) & 0xFF;
154         payload[7] = pm25_scaled & 0xFF;
155         payload[8] = (pm10_scaled >> 24) & 0xFF;
156         payload[9] = (pm10_scaled >> 16) & 0xFF;
157         payload[10] = (pm10_scaled >> 8) & 0xFF;
158         payload[11] = pm10_scaled & 0xFF;
159         payload[12] = temp_scaled >> 8;
160         payload[13] = temp_scaled & 0xFF;
161         payload[14] = humidity_scaled >> 8;
162         payload[15] = humidity_scaled & 0xFF;

```

```

163
164     LMIC_setTxData2(1, payload, sizeof(payload), 0);
165     Serial.println(F("Enviando promedios:"));
166     Serial.print(F("Promedio PM1.0: "));
167     Serial.println(pm1_avg, 2);
168     Serial.print(F("Promedio PM2.5: "));
169     Serial.println(pm25_avg, 2);
170     Serial.print(F("Promedio PM10: "));
171     Serial.println(pm10_avg, 2);
172     Serial.print(F("Promedio Temperatura: "));
173     Serial.println(temp_avg);
174     Serial.print(F("Promedio Humedad: "));
175     Serial.println(humidity_avg);
176 }
177 }
178
179 void setup() {
180     Serial.begin(115200);
181
182     // Inicializar sensor DHT22
183     dht.begin();
184
185     // Inicializar sensor PMS7003
186     Serial2.begin(9600, SERIAL_8N1, PMS7003_RX, PMS7003_TX);
187     pms7003.init(&Serial2);
188     Serial.println("Inicializando sensores PMS7003 y DHT22...");
189
190     // Inicializar LMIC
191     os_init();
192     LMIC_reset();
193
194     // Configurar LMIC para AU915
195     for (int c = 0; c < 72; c++) {
196         LMIC_disableChannel(c);
197     }
198     for (int c = 8; c <= 15; c++) {
199         LMIC_enableChannel(c);
200     }
201
202     LMIC.dn2Dr = DR_SF9;
203     LMIC_setDrTxpow(DR_SF8, 14);
204 }
205
206 void loop() {
207     os_runloop_once();
208     // Tomar muestras en intervalos definidos
209     if (millis() - lastSampleTime >= SAMPLE_INTERVAL) {
210         take_sample();
211         lastSampleTime = millis();
212     }
213 }

```

Anexo E: Código de programación del nodo “factor de calibración” del flujo de Node-Red.

```

1 // Valores del factor lineal para corregir los valores de PM2.5
2 const a = pendiente;
3 const b = intercepto;
4
5 // Verifica que el objeto contiene las propiedades necesarias
6 if (msg.payload && msg.payload.uplink_message && msg.payload.end_device_ids) {
7
8     const decodedPayload = msg.payload.uplink_message.decoded_payload;
9     const fcnt = msg.payload.uplink_message.f_cnt;
10    const ident = msg.payload.end_device_ids.device_id;
11
12    // Lecturas originales
13    const temperature = decodedPayload.temperature;
14    const humidity = decodedPayload.humidity;
15    const pm1 = decodedPayload.pm1;
16    const pm25_raw = decodedPayload.pm25;
17    const pm10 = decodedPayload.pm10;
18
19    // Descartar el mensaje si todas las variables son cero
20    if (
21        temperature === 0 &&
22        humidity === 0 &&
23        pm1 === 0 &&
24        pm25_raw === 0 &&
25        pm10 === 0
26    ) {
27        return null;
28    }
29
30    // Aplicar factor lineal a PM2.5
31    const pm25 = a * pm25_raw + b;
32
33    // Construir el objeto final
34    msg.payload = {
35        temperature: temperature,
36        humidity: humidity,
37        pm1: pm1,
38        pm25: pm25,
39        pm10: pm10,
40        ident: ident,
41        fcnt: fcnt
42    };
43
44    return msg;
45
46 } else {
47     node.error("El mensaje recibido no tiene la estructura esperada.", msg);
48     return null;
49 }

```

Anexo F: Códigos de programación del flujo de Node-Red.

1.- Código de programación del nodo “insertar datos en la base de datos”.

```

1 // Declaración de variables
2 const temperature = msg.payload.temperature;
3 const humidity    = msg.payload.humidity;
4 const pm1         = msg.payload.pm1;
5 const pm25        = msg.payload.pm25;
6 const pm10        = msg.payload.pm10;
7 const Ident       = msg.payload.ident;
8 const fcnt        = msg.payload.fcnt;
9
10 // Crear la consulta SQL
11 msg.topic = '
12 INSERT INTO datos (time, PM1, PM25, PM10, Temperatura, Humedad, Fcnt, Ident)
13 VALUES (CURRENT_TIMESTAMP(), ${pm1}, ${pm25}, ${pm10}, ${temperature}, ${humidity}, ${
14     fcnt}, '${Ident}');
15
16 return msg;

```

2.- Código de programación del nodo “extraer datos”.

```

1
2 // Obtener fecha y hora actual
3 let ahora = new Date();
4 let fechaHoraActual = ahora.toISOString().slice(0, 19).replace('T', ' ');
5
6 // Obtener fecha y hora hace 24 horas
7 let hace24Horas = new Date(ahora.getTime() - 24 * 60 * 60 * 1000);
8 let fechaHoraAnterior = hace24Horas.toISOString().slice(0, 19).replace('T', ' ');
9
10 // Consulta SQL para obtener TODOS los datos de las últimas 24 horas
11 msg.topic = '
12 SELECT
13     Ident,
14     Fecha,
15     Hora,
16     PM1,
17     PM25,
18     PM10,
19     Temperatura,
20     Humedad
21 FROM datos
22 WHERE CONCAT(Fecha, ' ', Hora) >= '${fechaHoraAnterior}'
23     AND CONCAT(Fecha, ' ', Hora) <= '${fechaHoraActual}'
24     AND PM10
25     AND PM1
26     AND PM25
27     AND PM10
28 ORDER BY Fecha ASC, Hora ASC
29 ';

```

```

30
31 return msg;

```

3.- Código de programación del nodo “Promedio Estacion 1”.

```

1
2 // Obtener fecha actual en formato YYYY-MM-DD
3 let hoy = new Date();
4 let yyyy = hoy.getFullYear();
5 let mm = String(hoy.getMonth() + 1).padStart(2, '0');
6 let dd = String(hoy.getDate()).padStart(2, '0');
7 let fechaActual = `${yyyy}-${mm}-${dd}`;
8
9 // Consulta SQL
10 msg.topic = '
11 SELECT
12     Ident,
13     COUNT(*) AS cantidad_datos,
14     AVG(PM1) AS prom_PM1,
15     AVG(PM25) AS prom_PM25,
16     AVG(PM10) AS prom_PM10,
17     AVG(Temperatura) AS prom_Temp,
18     AVG(Humedad) AS prom_Humedad
19 FROM datos
20 WHERE DATE(Fecha) = '${fechaActual}'
21     AND Ident = 'estacion1'
22 GROUP BY Ident
23 ';
24
25 return msg;

```

3.- Código de programación del nodo “Insertar valor promedio PM2.5”.

```

1
2 const resultados = msg.payload;
3 const mensajes = [];
4
5 for (let dato of resultados) {
6     const cantidad = parseInt(dato.cantidad_datos, 10);
7
8     const sql = '
9         INSERT INTO promediodatos
10             (Time, avgPM1, avgPM25, avgPM10, avgTemp, avgHum, Ndatos, Estacion)
11         VALUES (
12             NOW(),
13             ${parseFloat(dato.prom_PM1)},
14             ${parseFloat(dato.prom_PM25)},
15             ${parseFloat(dato.prom_PM10)},
16             ${parseFloat(dato.prom_Temp)},
17             ${parseFloat(dato.prom_Humedad)},
18             ${cantidad},
19             '${dato.Ident}'
20         )

```

```
21     ';\n22\n23     mensajes.push({ topic: sql });\n24 }\n25\n26 return [mensajes];
```

3.- Código de programación del nodo “Estación 1 PROMEDIO DIARIO”.

```
1 msg.topic = '\n2 SELECT\n3   Time,\n4   avgPM1,\n5   avgPM25,\n6   avgPM10,\n7   avgTemp,\n8   avgHum,\n9   Ndatos,\n10  Estacion\n11 FROM promedioidatos\n12 WHERE Estacion = 'estacion1'\n13 ORDER BY Time ASC\n14 LIMIT 28\n15 ';\n16\n17 return msg;
```