



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE TELECOMUNICACIONES**

Diagnóstico de gases contaminantes en la capa límite de aire en la zona urbana de la ciudad de Riobamba mediante el uso de un sistema sensorizado.

**Trabajo de Titulación para optar al título de:
Ingeniero en Telecomunicaciones**

Autor:

Yuquilema Yaguachi, Joel Fernando

Tutor:

PhD. Leonardo Fabián Rentería Bustamante

Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARACION DE AUTORIA

Yo, **Joel Fernando Yuquilema Yaguachi**, con cédula de ciudadanía **060520238-1**, autor del trabajo de investigación titulado: **Diagnóstico de gases contaminantes en la capa límite de aire en la zona urbana de la ciudad de Riobamba mediante el uso de un sistema sensorizado**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto de los derechos de autor (a) de la obra referida será de mi entera responsabilidad, librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 20 de mayo de 2026



Joel Fernando Yuquilema Yaguachi

CI: 060520238-1

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, **PhD. Leonardo Fabián Rentería Bustamante**, catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería, por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: “Diagnóstico de gases contaminantes en la capa límite de aire en la zona urbana de la ciudad de Riobamba mediante el uso de un sistema sensorizado.”, bajo la autoría de **Joel Fernando Yuquilema Yaguachi**; por lo que se autoriza ejecutar los trámites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 27 días del mes de mayo de 2026.



PhD. Leonardo Fabian Renteria Bustamante

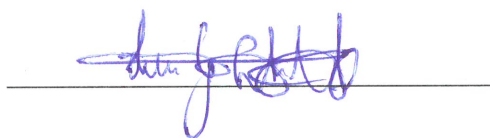
C.I: 1104064132

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación **Diagnóstico de gases contaminantes en la capa límite de aire en la zona urbana de la ciudad de Riobamba mediante el uso de un sistema sensorizado**, presentado por **Joel Fernando Yuquilema Yaguachi**, con cédula de identidad número **060520238-1**, bajo la tutoría de PhD. Leonardo Fabián Rentería Bustamante; certificamos que recomendamos la **APROBACIÓN** de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba a los 12 días del mes de junio de 2026.

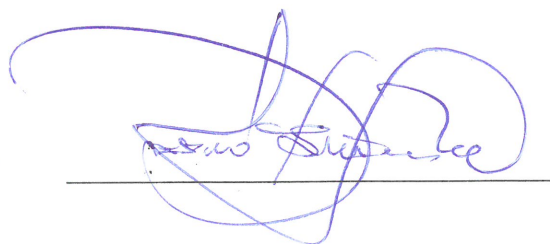
Luis Gonzalo Santillan Valdiviezo, Mgs.
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Manuel Antonio Meneses Freire, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Pedro Fernando Escudero Villa, PhD.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO





CERTIFICACIÓN

Que, **YUQUILEMA YAGUACHI JOEL FERNANDO** con CC: **0605202381**, estudiante de la Carrera **Telecomunicaciones**, Facultad de **Ingeniería**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**DIAGNÓSTICO DE GASES CONTAMINANTES EN LA CAPA LÍMITE DE AIRE EN LA ZONA URBANA DE LA CIUDAD DE RIOBAMBA MEDIANTE EL USO DE UN SISTEMA SENSORIZADO**", cumple con el 1% de similitud y 9% de Inteligencia Artificial, de acuerdo con el reporte del sistema Anti plagio **Compilatio**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 03 de junio de 2026



Validar únicamente en FirmaEC.
Firmado electrónicamente por:
**LEONARDO FABIAN
RENERIA BUSTAMANTE**

PhD. Leonardo Fabián Rentería Bustamante
TUTOR

DEDICATORIA

A Dios, por ser mi fortaleza y mi refugio en cada momento de este camino, por no abandonarme nunca y por cada prueba y bendición que me ha dado, las cuales me han ayudado a culminar esta etapa, todo es gracias a su voluntad.

A mi madre, Marina Yaguachi la mujer que más amo en este mundo al carácter que supo inculcarme a su voluntad de propios miedos para darme siempre lo mejor. Gracias por tu esfuerzo y sacrificio, por tus palabras, tus consejos y sobre todo por la confianza que has depositado en mí a lo largo de mi vida y especialmente en esta etapa universitaria. Eres un ejemplo para mí.

A mi padre, por el respaldo constante y el esfuerzo invertido en mi educación. Gracias por haber estado ahí y por brindarme las herramientas necesarias para lograr este objetivo.

A mi hermano Wilmer Yuquilema, por su apoyo y cariño incondicional durante todo este proceso, por estar en todo momento, por esas conversaciones y esas palabras que siempre llegaron en el momento justo.

A mis abuelitos, que siempre estuvieron ahí ofreciéndome sus consejos, su amor e inculcándome el amor a Dios, que es lo más valioso que he recibido.

A mis amigos y familia en general, por ser un pilar fundamental en este camino, por sus palabras, sus consejos y su apoyo en cada momento.

"Todo lo puedo en Cristo que me fortalece."

Filipenses 4:13

AGRADECIMIENTO

A Dios, por ser mi guía y mi fortaleza en cada etapa de este camino, por no soltarme nunca y por darme la claridad necesaria para seguir cuando todo parecía difícil.

A la Universidad Nacional de Chimborazo, por haberme formado no solo como profesional sino como persona. Llevo sus enseñanzas en el corazón.

Al Ing. Leonardo Rentería, mi tutor, por su guía, su dedicación y su paciencia a lo largo de todo este proceso. Gracias por estar siempre disponible, por los materiales, por el tiempo invertido y por creer en este trabajo desde el inicio.

Al Ing. Fernando Escudero, por su apoyo en el desarrollo de este trabajo de titulación, por sus observaciones y por el tiempo dedicado a orientarme en este proceso.

A la Ing. Valeria Díaz, coordinadora de la REMMAQ, por su colaboración y apertura durante el proceso de calibración realizado en la estación Belisario en Quito, así como al equipo técnico que facilitó las condiciones necesarias para llevar a cabo dicho proceso

A mi madre, por cada palabra, cada consejo y por esa confianza que nunca perdió en mí. Todo esto también es tuyo.

A mi padre, por su esfuerzo y respaldo que hicieron posible que llegara hasta aquí.

A mi abuelita, por ese amor incondicional que nunca me faltó.

A mis tíos y primos, por sus conversaciones su guía y su ayuda.

Y a mí mismo, por haberme levantado cada vez que quise rendirme, por haber seguido adelante a pesar de todo y por no haberme dado por vencido cuando fue más difícil. Esta meta también es mía.

ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA
DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR
CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DEL TRIBUNAL
CERTIFICADO ANTIPLAGIO
DEDICATORIA
AGRADECIMIENTO
ÍNDICE GENERAL
ÍNDICE DE TABLAS
ÍNDICE DE FIGURAS
RESUMEN
ABSTRACT

CAPÍTULO I.....	16
1. INTRODUCCIÓN.....	16
1.1 Antecedentes	16
1.2 Planteamiento del problema	17
1.3 Justificación	18
1.4 Objetivos.....	19
1.4.1 General	19
1.4.2 Específicos	19
CAPÍTULO II.....	20
2. MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Términos y definiciones	20
2.1.1 Calidad del aire	20
2.1.2 Contaminante atmosférico.....	20
2.1.3 Sensor de bajo costo	20
2.1.4 Calibración de sensores.....	21
2.1.5 Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire Ambiente (NECA)	21
2.1.6 Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV)	21
2.2 Capa Límite de aire	21
2.3 Índice Quiteño de la Calidad del Aire (IQCA)	22

2.4	Sistema Sensorizado.....	23
2.5	Contaminantes atmosféricos y su impacto en la calidad del aire	23
2.5.1	Panorama de la contaminación atmosférica en áreas urbanas	23
2.5.2	Material Particulado (PM2.5 y PM10).....	24
2.5.3	Dióxido de Nitrógeno (NO ₂).....	25
2.5.4	Monóxido de carbono (CO).....	26
2.5.5	Ozono Troposférico (O ₃).....	27
2.5.6	Dióxido de Azufre (SO₂).....	27
2.6	ESTADO DEL ARTE	27
CAPÍTULO III.		31
3.	METODOLOGÍA.....	31
3.1	Tipo de investigación	31
3.2	Técnicas de recolección de datos.	31
3.2.1	Análisis documental.	31
3.2.2	Instrumentos	32
3.2.3	Procedimiento de medición	32
3.2.4	Procesamiento y control de calidad de datos	32
3.3	Operacionalización de variables.	33
3.3.1	Variables Independientes	33
3.3.2	Variables dependientes	33
3.4	Población de estudio y tamaño de muestra	34
3.4.1	Muestra	34
3.4.2	Muestreo	34
3.5	Diagrama de fases del diagnóstico de contaminantes para evaluar la calidad del aire en la zona urbana de Riobamba.	35
3.6	Fase 1: Revisión bibliográfica e identificación de los gases contaminantes.	36
3.6.1	Búsqueda y selección de fuentes	36
3.6.2	Ejes temáticos del análisis	36
3.6.3	Resultado de la fase: contaminantes seleccionados	38
3.7	Fase 2: Diseño e implementación del sistema sensorizado.	39

3.7.1	Definición de las especificaciones del sistema	39
3.7.2	Selección de componentes electrónicos	39
3.7.3	Selección de sensores y componentes adicionales	40
3.7.4	Arquitectura general del sistema	41
3.7.5	Diseño del esquema electrónico	42
3.7.6	Diseño de la carcasa en 3D.....	43
3.7.7	Programación e implementación del sistema sensorizado	44
3.7.8	Montaje e implementación física	45
3.8	Fase 3 : Pruebas iniciales y calibración de sensores	46
3.8.1	Pruebas iniciales del sistema de calidad de aire	46
3.8.2	Sitio y protocolo de calibración	47
3.8.3	Diseño del experimento	48
3.8.4	Resultados de la calibración	48
3.8.5	Resumen final de ecuaciones.....	52
3.9	Fase 4: Protocolo de toma de datos en campo	53
3.9.1	Selección de puntos de monitoreo por parroquia	53
3.9.2	Verificación del Equipo	54
3.9.3	Inicialización del Sistema.....	55
3.9.4	Definición de Alturas de Vuelo	56
3.9.5	Ejecución de la Campaña de Vuelo	56
3.9.6	Integración y Procesamiento de Datos.....	57
CAPITULO IV.		59
4.	RESULTADOS.....	59
4.1	Análisis comparativo de la calidad de aire las cinco parroquias urbanas	59
4.1.1	Análisis de los datos	59
4.1.2	Identificación de la parroquia con mayor contaminación.....	60
4.1.3	Comparación entre parroquias	60
4.1.4	Comportamiento de las mediciones por parroquia	62
4.2	Análisis comparativo de la calidad de aire según la altura de vuelo.....	63

4.2.1	Identificación de la altura con mayor concentración de contaminantes	63
4.2.2	Comparación entre alturas de vuelo	64
4.2.3	Comportamiento de las mediciones por altura de vuelo.....	65
CAPÍTULO V.		67
5.	Conclusiones y Recomendaciones	67
5.1	Conclusiones	67
5.2	Recomendaciones	67
CAPÍTULO VI.		69
6.	BIBLIOGRAFÍA	69
CAPÍTULO VII.		74
7.	ANEXOS.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Escala de evaluación del IQCA según la Norma de Calidad del Aire Ambiente del Ecuador (NECA) [14].	22
Tabla 2. Revisión de sistemas de monitorización atmosférica, [11], [27], [29], [30], [31], [32].	29
Tabla 3. Variables Independientes.	33
Tabla 4. Variable Dependiente.	33
Tabla 5. Parámetros usados en la revisión bibliográfica.	36
Tabla 6. Contaminantes seleccionados para el monitoreo en Riobamba.	38
Tabla 7. Comparación de microcontroladores [35].	40
Tabla 8. Componentes seleccionados para el sistema sensorizado [36].	41
Tabla 9. Valores de calibración — PM2.5.	49
Tabla 10. Valores de calibración — PM10	50
Tabla 11. Valores de calibración — NO ₂ .	51
Tabla 12. Ecuaciones de calibración aplicadas al sistema.	53
Tabla 13. Alturas de vuelo seleccionadas y justificación de cada nivel de muestreo.	56
Tabla 14. Estructura de la base de datos unificada para el análisis estadístico.	58
Tabla 15. P-valor de la prueba de normalidad del IQCA por parroquia.	60
Tabla 16. Prueba de Kruskal-Wallis para el IQCA entre parroquias urbanas.	60
Tabla 17. Post-hoc de Dunn con corrección de Bonferroni para el IQCA entre parroquias	61
Tabla 18. Estadísticos descriptivos del IQCA por parroquia urbana.	61
Tabla 19. Prueba de Kruskal-Wallis para el IQCA según altura de vuelo.	64
Tabla 20. Post-hoc de Dunn con corrección de Bonferroni para el IQCA según altura de vuelo.	64
Tabla 21. Estadísticos descriptivos del IQCA por altura de vuelo.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Capas de la atmósfera baja y su interacción con la superficie terrestre [12].....	21
Figura 2. Distribución de material particulado PM10 y PM2.5 en zonas urbanas [44].....	24
Figura 3. Parroquias urbanas delimitadas de la ciudad de Riobamba [33].	34
Figura 4. Secuencia de trabajo estructurada por fases del proyecto de investigación.	35
Figura 5. Principio de funcionamiento del sistema sensorizado.	41
Figura 6. Diseño electrónico del sistema.	42
Figura 7. a) Diseño electrónico del sistema sensorizado, b) Placa PCB impresa	43
Figura 8. Representación tridimensional del diseño — vistas frontal, lateral y explosionada	43
Figura 9. Diseño 3D final impreso.	44
Figura 10. Secuencia lógica de programación del sistema sensorizado.	45
Figura 11. Entorno de programación Arduino IDE.	45
Figura 12. Diseño completo e implementado fijado al dron.	46
Figura 13. Verificación del funcionamiento del sistema sensorizado: a) Dispositivo encendido y operativo, b) Serial monitor por Bluetooth.	47
Figura 14. Sistema sensorizado en la estación de referencia Belisario durante el proceso de calibración.	48
Figura 15. Calibración del SDS011 para PM2.5: (a) serie temporal, (b) dispersión con recta de ajuste, (c) residuos	49
Figura 16. Calibración del SDS011 para PM10: (a) serie temporal, (b) dispersión con recta de ajuste, (c) residuos	50
Figura 17. Calibración del MICS-2714 para NO ₂ : (a) serie temporal, (b) dispersión con recta de ajuste, (c) residuos	51
Figura 18. Distribución de los 15 puntos de monitoreo en las parroquias urbanas de Riobamba: (1-3) Lizarzaburu, (4-6) Maldonado, (7-9) Velasco, (10-12) Veloz, (13-15) Yaruquíes.	54
Figura 19. Secuencia de preparación y verificación del sistema de monitoreo en campo: (a) armado del equipo, (b) revisión de componentes, (c) módulo de sensores, (d) posicionamiento del dron, (e) revisión final, (f) inicio de vuelo.	55
Figura 20. Proceso de inicialización del sistema: (a) selección del dispositivo ESP32_Estacion en el menú Bluetooth, (b) confirmación de conexión establecida con menú de modos de operación, (c) secuencia de arranque en terminal mostrando inicialización de módulos	55
Figura 21. Verificación de alturas de vuelo: (a) imagen aérea durante el muestreo, (b) lectura de altitud en la aplicación de control	57
Figura 22. Vistas aéreas de algunos sectores monitoreados: a) ESPOCH – Lizarzaburu, b) Sector Mayorista – Veloz, c) Parque del Diablo – Velasco, d) Sector La Campana – Lizarzaburu, e) Parque Central – Yaruquíes, f) UNACH – Maldonado.	57
Figura 23. Comportamiento del IQCA por parroquia urbana de Riobamba.	63
Figura 24. Comportamiento del IQCA según altura de vuelo del sistema sensorizado.	66

RESUMEN

En Riobamba existe escasa infraestructura de monitoreo dinámico de la calidad del aire, limitada a puntos fijos que no permiten caracterizar el comportamiento de los contaminantes en toda la zona urbana. Frente a esta necesidad, en el presente trabajo se desarrolló un sistema sensorizado portátil basado en el microcontrolador ESP32, capaz de medir PM2.5, PM10, NO₂ y SO₂, calcular el IQCA en tiempo real y transmitir datos de forma inalámbrica. El sistema fue acoplado a un dron para realizar mediciones a cinco alturas (20, 40, 60, 80 y 100 m) en 15 puntos distribuidos en las cinco parroquias urbanas del cantón. Se recolectaron 12 292 registros. La prueba de Kruskal-Wallis y el post-hoc de Dunn con corrección de Bonferroni confirmaron diferencias significativas entre parroquias y alturas de vuelo. Lizarzaburu presentó el IQCA promedio más alto con 30,70, mientras que Velasco registró las condiciones más favorables con 25,11. A menor altura de vuelo, mayores concentraciones de contaminantes, lo que es coherente con su acumulación cerca de la superficie. El 98,9% de las mediciones registraron valores por debajo de los límites establecidos por la norma NECA, lo que indica que la calidad del aire en la zona urbana de Riobamba se encuentra dentro de los rangos permisibles bajo las condiciones monitoreadas.

Palabras clave: calidad del aire, sistema sensorizado, dron, IQCA, capa límite atmosférica, Riobamba.

ABSTRACT

Riobamba has limited infrastructure for dynamic air quality monitoring, relying mainly on fixed monitoring stations that do not allow the characterization of pollutant behavior throughout the entire urban area. To address this limitation, a portable sensor-based system was developed using an ESP32 microcontroller, capable of measuring PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂, and SO₂ concentrations, calculating the Ecuadorian Air Quality Index (IQCA) in real time, and transmitting data wirelessly. The system was mounted on a drone to perform measurements at five flight altitudes (20, 40, 60, 80, and 100 m) across 15 monitoring points distributed among the five urban parishes of the canton. A total of 12,292 records were collected. The Kruskal–Wallis test and Dunn’s post-hoc test with Bonferroni correction revealed statistically significant differences among parishes and flight altitudes. Lizarzaburu exhibited the highest mean IQCA value (30.70), whereas Velasco recorded the most favorable air quality conditions (25.11). Pollutant concentrations were higher at lower flight altitudes, which is consistent with their accumulation near the surface within the atmospheric boundary layer. Furthermore, 98.9% of the measurements remained below the limits established by the National Environmental Air Quality Standards (NECA), indicating that air quality in the urban area of Riobamba remained within permissible levels under the monitored condition.

Keywords: air quality, sensor system, drone, IQCA, atmospheric boundary layer, Riobamba.



Reviewed by:
MsC. Edison Damian Escudero
ENGLISH PROFESSOR
C.C.0601890593

CAPÍTULO I.

1. INTRODUCCIÓN.

1.1 Antecedentes

La contaminación del aire es uno de los problemas ambientales más graves en todo el mundo, sobre todo en ciudades con mucho tráfico y actividad industrial. Según la Organización Mundial de la Salud, más del 90 % de la población mundial respira aire con niveles de contaminantes superiores a los recomendados. Esta situación es aún más preocupante en América Latina, donde hay pocas redes de monitoreo continuo [1].

Desde el punto de vista físico, los contaminantes del aire se acumulan y se dispersan sobre todo en la capa límite atmosférica, que es la parte de la troposfera más cercana a la superficie terrestre. La forma de esta capa depende de factores como la temperatura, la textura del suelo y la rotación de la Tierra. Estos elementos influyen en la mezcla del aire y, por lo tanto, en cómo se distribuyen los contaminantes en las ciudades [2].

En los últimos años, los sistemas de sensores de bajo costo se han vuelto una alternativa viable para el monitoreo de calidad de aire, ya que permiten obtener mediciones distribuidas en múltiples puntos simultáneamente a una fracción del costo de las estaciones convencionales. Estos sistemas combinan sensores electroquímicos, ópticos o de estado sólido con plataformas de datos y comunicación inalámbrica, lo que permite medir de forma continua variables como el material particulado, NO₂ y SO₂ [3]. Estudios recientes han comprobado su buen desempeño en campo al compararlos con estaciones de referencia, siempre que se usen métodos de calibración adecuados [4].

A pesar de estos avances, la mayoría de los estudios se enfocan en ciudades con suficiente infraestructura de monitoreo, por lo que ciudades intermedias como Riobamba se cuenta con escasa información técnica sobre la caracterización del aire, limitada a puntos muy localizados. Por eso, este estudio desarrolló un sistema de sensores aerotransportado para medir la concentración de gases contaminantes en la capa límite de la zona urbana de Riobamba [5].

1.2 Planteamiento del problema

La contaminación del aire es uno de los mayores riesgos ambientales en todo el mundo. La Organización Mundial de la Salud señala que más del 90 % de la población respira aire que supera los límites recomendados, lo que afecta la salud pública y los ecosistemas, sobre todo en ciudades con mucho tráfico y actividad industrial [1].

En Ecuador, la contaminación del aire supera en un 30 % los límites de la OMS. Sin embargo, solo Quito, Guayaquil y Cuenca tienen redes de monitoreo consolidadas. El resto del país no cuenta con infraestructura similar, lo que limita el diagnóstico de la calidad del aire y dificulta crear políticas locales basadas en datos reales [6].

Esta falta de monitoreo es especialmente grave en ciudades medianas como Riobamba. Allí, el crecimiento del número de vehículos y la expansión urbana han cambiado el aire local, pero no hay un sistema técnico para medir estos cambios. Sin mediciones continuas, no se pueden identificar fuentes de contaminación, analizar cómo se dispersan los contaminantes en la atmósfera ni entender el comportamiento del aire en distintas zonas urbanas [5].

Desde el punto de vista técnico y económico, las estaciones de monitoreo tradicionales son costosas, ya que cada una cuesta entre 5 000 y 30 000 euros. Esto dificulta su uso en municipios con presupuestos bajos. Por eso, los sistemas de sensores de bajo costo se han convertido en una alternativa viable, ya que combinan sensores pequeños, hardware abierto y comunicación inalámbrica para hacer mediciones en tiempo real y en varios lugares [7].

Estudios recientes han comprobado en campo que estos sistemas presentan un correcto funcionamiento cuando se comparan con estaciones de referencia, siempre que se usen métodos adecuados de calibración y filtrado [4]. Por eso, se propone diseñar e implementar un sistema de sensores aerotransportado para medir gases contaminantes en la capa límite de la zona urbana de Riobamba. El objetivo es generar datos técnicos que ayuden a evaluar la calidad del aire desde la ingeniería en telecomunicaciones.

1.3 Justificación

Esta investigación busca aportar datos claros y confiables sobre la contaminación del aire en la ciudad de Riobamba, donde la infraestructura de monitoreo dinámico es escasa y se limita a puntos fijos. Esta información es clave para que las autoridades puedan tomar decisiones informadas y proteger tanto el medio ambiente como la salud de las personas.

El sistema que se desarrolló es una opción accesible en términos de costo. Los equipos profesionales de monitoreo suelen ser caros, lo que dificulta que municipios con presupuestos limitados los adquieran. Por eso, el uso de hardware abierto y sensores electroquímicos de bajo costo representa una alternativa técnicamente viable y replicable en otras ciudades del país con condiciones similares.

El sistema sensorizado se acopló a un dron para realizar las mediciones a distintas alturas dentro de la capa límite atmosférica. El uso del dron como medio de transporte permitió cubrir alturas que las estaciones fijas no alcanzan, lo cual es útil en Riobamba, donde la altitud influye en la forma en que se dispersan los contaminantes. Con esto se logra una mejor caracterización del estado del aire en la ciudad y se obtienen elementos suficientes para llegar a una conclusión.

Desde el área de telecomunicaciones, el principal aporte es integrar la lectura de sensores, el procesamiento de datos y la transmisión inalámbrica en un solo dispositivo. El sistema es portátil, funcional y adaptable, y su diseño puede usarse en otros estudios de monitoreo ambiental.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

- Diagnóstico de gases contaminantes en la capa límite de aire en la zona urbana de la ciudad de Riobamba mediante el uso de un sistema sensorizado.

1.4.2 Específicos

- Revisar la bibliografía de los últimos cinco años sobre gases contaminantes y su efecto en la calidad del aire para definir los contaminantes a evaluar.
- Construir un sistema sensorizado de gases portátil haciendo uso de plataformas de hardware abierto y sensores
- Validar el funcionamiento del sistema sensorizado mediante pruebas de campo y calibración de sensores.
- Evaluar la calidad del aire en puntos específicos de la zona urbana de Riobamba.

CAPÍTULO II.

2. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos y los antecedentes de investigación que respaldan el diseño e implementación de un sistema para monitorear contaminantes atmosféricos mediante instrumentación electrónica en un vehículo aéreo no tripulado (UAV). El análisis de investigaciones previas ayudó a identificar las tecnologías de sensores más adecuadas para medir variables ambientales.

Con base en este análisis, se definieron los criterios para seleccionar los componentes electrónicos del sistema, dando prioridad a las mediciones y a la eficiencia energética durante el vuelo, ya que ambos son esenciales para el buen desempeño de la plataforma en ambientes de muestreo atmosférico.

2.1 Términos y definiciones

Para entender mejor esta investigación, es necesario conocer ciertos conceptos clave que se abordan a lo largo de todo el trabajo. A continuación, se detallan los términos más importantes que se van a utilizar:

2.1.1 Calidad del aire

La calidad del aire se refiere a cómo está la atmósfera según la cantidad de contaminantes que contiene. Estos contaminantes pueden afectar tanto la salud de las personas como el medio ambiente. Cuando la calidad del aire es buena, los niveles de contaminantes no representan un riesgo para la población [2].

2.1.2 Contaminante atmosférico

Sustancia presente en la atmósfera en concentraciones suficientes para generar efectos negativos sobre la salud, el ambiente o el bienestar humano [8].

2.1.3 Sensor de bajo costo

Dispositivo de medición cuyo precio de adquisición es significativamente inferior al de un equipo de referencia certificado para el mismo parámetro [7].

2.1.4 Calibración de sensores

Proceso que establece la relación matemática entre las lecturas de un sensor y los valores reales de la variable medida, utilizando un equipo de referencia certificado [9].

2.1.5 Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire Ambiente (NECA)

Norma técnica obligatoria en Ecuador que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en el aire ambiente, contenida en el TULSMA, Libro VI, Anexo 4 [10].

2.1.6 Vehículo Aéreo No Tripulado (UAV)

Aeronave operada de forma remota o autónoma sin piloto a bordo, utilizada en monitoreo ambiental para recolectar datos atmosféricos en distintas alturas y puntos geográficos [11].

2.2 Capa Límite de aire

La capa límite atmosférica, o capa límite planetaria, es la parte más baja de la troposfera y está en contacto directo con la superficie de la Tierra. Es fundamental porque ahí se producen las principales interacciones entre la atmósfera y la superficie del planeta [2].

La Figura 1 muestra la estructura de las capas de la atmósfera y destaca la capa límite atmosférica (boundary layer). Esta es la parte más baja de la troposfera y está influida por las condiciones de la superficie del planeta. Puede extenderse a menos de 3 km de altura.

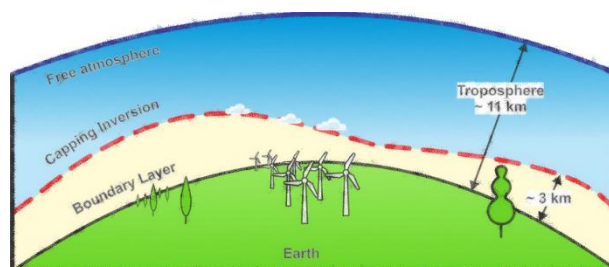


Figura 1. Capas de la atmósfera baja y su interacción con la superficie terrestre [12].

Durante el día, particularmente cuando hay buenas condiciones de radiación solar, la CLA se desarrolla ampliamente y va desde los 0 metros hasta aproximadamente 2 kilómetros dependiendo de la altitud del lugar. En cambio, durante la noche, cuando la superficie se

enfria, la CLA se vuelve mucho más delgada y solo alcanza unos 100 metros. Este cambio diario es clave para entender cómo se dispersan los contaminantes en las ciudades [13].

2.3 Índice Quiteño de la Calidad del Aire (IQCA)

El Índice Quiteño de la Calidad del Aire (IQCA) es una herramienta desarrollada por la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ) para traducir las concentraciones de contaminantes atmosféricos a una escala numérica comprensible para la ciudadanía y las autoridades [14, 15].

A diferencia del AQI de la EPA, el IQCA se fundamenta en los límites máximos permisibles de la Norma de Calidad del Aire Ambiente del Ecuador (NECA), contenida en el TULSMA, Libro VI, Anexo 4 [10]. Convirtiéndolo en el instrumento de referencia para la evaluación atmosférica en el contexto ecuatoriano.

El índice opera en una escala de 0 a 500, donde el valor 100 corresponde exactamente al límite máximo permitido por la NECA. Valores entre 0 y 100 indican cumplimiento de la norma nacional; valores superiores a 100 señalan excedencia y riesgo potencial para la salud [14]. La Tabla 1 presenta las seis categorías del IQCA con su código de colores oficial.

Tabla 1. Escala de evaluación del IQCA según la Norma de Calidad del Aire Ambiente del Ecuador (NECA) [14].

Rango	Categoría	CO	O3	NO2	SO2	PM2.5	PM10
0–50	Nivel deseable u óptimo	0–5000	0–50	0–100	0–62.5	0–25	0–50
51–100	Nivel aceptable o bueno	5001–10000	51–100	101–200	63.5–125	26–50	51–100
101–200	Nivel de precaución	10001–15000	101–200	201–1000	126–200	51–150	101–250
201–300	Nivel de alerta	15001–30000	201–400	1001–2000	201–1000	151–250	251–400
301–400	Nivel de alarma	30001–40000	401–600	2001–3000	1001–1800	251–350	401–500
401–500	Nivel de emergencia	>40000	>600	>3000	>1800	>350	>500

El valor final del IQCA corresponde al mayor valor calculado entre todos los contaminantes evaluados, reflejando así el de mayor riesgo en el período de medición [14].

2.4 Sistema Sensorizado

Un sistema sensorizado es una configuración tecnológica que integra múltiples sensores, dispositivos de procesamiento de datos y sistemas de comunicación para monitorear variables específicas del ambiente de manera continua y automatizada [3]. En el contexto del monitoreo de la calidad del aire, estos sistemas combinan sensores de gases contaminantes y de material particulado con microcontroladores, módulos de almacenamiento de datos y, en muchos casos, capacidades de transmisión inalámbrica de datos.

La gran ventaja de los sistemas sensorizados es que permiten obtener mediciones en tiempo real de múltiples parámetros simultáneamente. Además, al usar componentes de hardware de código abierto como Arduino o ESP32, estos sistemas pueden desarrollarse a una fracción del costo de los equipos profesionales tradicionales, lo que permite crear redes de monitoreo más densas y extendidas [16].

Es importante destacar que, aunque estos sistemas son mucho más económicos que los equipos de referencia profesionales requieren un diseño cuidadoso, una calibración adecuada y un mantenimiento regular para asegurar que los datos que generan sean confiables y útiles para la toma de decisiones [3].

2.5 Contaminantes atmosféricos y su impacto en la calidad del aire

2.5.1 Panorama de la contaminación atmosférica en áreas urbanas

La contaminación del aire es uno de los problemas de salud pública más graves del mundo. La Organización Mundial de la Salud informa que cada año ocurren cerca de 4,2 millones de muertes prematuras por la exposición a la contaminación del aire ambiente, y el 89 % de estas muertes ocurren en países de ingresos bajos y medios [17]. Además, el 99 % de la población mundial vive en lugares donde la calidad del aire no cumple con los estándares recomendados por la OMS [18].

En Ecuador, la situación es similar. Desde 2010, el Ministerio del Ambiente puso en marcha el Programa Nacional de Calidad del Aire y estableció redes de monitoreo en ciudades con más de 150.000 habitantes [19]. Los inventarios de emisiones en ciudades como Ambato, Riobamba, Latacunga, Santo Domingo, Manta, Portoviejo, Ibarra, Milagro, Esmeraldas, Loja, Azogues, Babahoyo, Quevedo, Quito y Cuenca muestran que el tráfico vehicular es la principal fuente de contaminación, seguido por las emisiones industriales [19].

En Riobamba, específicamente, el Proyecto Calidad del Aire III, publicado en 2012, posicionó a la ciudad en el segundo lugar a nivel nacional con un valor de CO₂ per cápita de 2,96 toneladas por habitante [5]. Estos niveles, que podrían incrementarse debido a la contaminación generada por algunas fábricas de la ciudad, suscitaron una alerta sobre la necesidad de implementar sistemas de monitoreo continuo. Estudios más recientes realizados entre 2018 y 2019 demostraron una asociación estadísticamente significativa entre la contaminación vehicular y el riesgo de padecer afecciones respiratorias en la población, especialmente en zonas de alta afluencia vehicular [5].

2.5.2 Material Particulado (PM_{2.5} y PM₁₀)

El PM₁₀ incluye partículas con un diámetro igual o menor a 10 µm, lo que las hace lo bastante pequeñas para ser inhaladas y afectar las vías respiratorias superiores. En las ciudades, sus principales fuentes son el polvo de construcción, las calles sin pavimentar y el desgaste de frenos y neumáticos [20].

Como se puede observar en la Figura 2, las partículas PM₁₀ y PM_{2.5} difieren principalmente en su tamaño y origen, y donde se concentran siendo las PM_{2.5} más finas y peligrosas para la salud.



Figura 2. Distribución de material particulado PM₁₀ y PM_{2.5} en zonas urbanas [44].

El PM10 incluye partículas con un diámetro igual o menor a 10 μm , lo que las hace lo bastante pequeñas para ser inhaladas y afectar las vías respiratorias superiores. En las ciudades, sus principales fuentes son el polvo de construcción, las calles sin pavimentar y el desgaste de frenos y neumáticos [20].

Las principales fuentes de PM10 incluyen el polvo de sitios de construcción, caminos sin pavimentar, actividades agrícolas, incendios forestales, emisiones industriales y el desgaste de frenos y neumáticos de vehículos. También puede provenir del polen y de fragmentos bacterianos [20].

El **PM2.5**, también llamado material particulado fino, está formado por partículas de menos de 2.5 μm . Estas pueden llegar hasta los alvéolos pulmonares y pasar al torrente sanguíneo. Es el contaminante más riesgoso para la salud [20].

El PM2.5 proviene principalmente de procesos de combustión, como los gases de escape de los vehículos y la quema de madera, carbón y otros combustibles. También se forma en la atmósfera mediante reacciones químicas con otros contaminantes, como el dióxido de azufre y los óxidos de nitrógeno [20].

La OMS actualizó en 2021 sus límites recomendados a 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ anual para PM2.5 y 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM10 [21]. Estudios recientes confirman que el 65% de ciudades a nivel mundial registran niveles crecientes de PM2.5 [22], y que su exposición prolongada se asocia con mortalidad prematura [8] [23].

En zonas urbanas como Riobamba, las partículas PM10 provienen principalmente del polvo suspendido en calles sin pavimentar, de actividades de construcción, de la erosión del suelo y del desgaste de frenos y neumáticos de vehículos [20].

2.5.3 Dióxido de Nitrógeno (NO₂)

El NO₂ es un gas tóxico producido principalmente por procesos de combustión. En zonas urbanas, el escape vehicular constituye su principal fuente de emisión [8] [19]. La OMS

establece que concentraciones superiores a 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en corto plazo generan inflamación respiratoria, y que la exposición prolongada afecta el desarrollo pulmonar en niños [21].

Estudios en 398 ciudades de 22 países confirmaron asociación entre NO_2 y mortalidad cardiovascular y respiratoria, sin umbrales seguros de exposición [23]. Adicionalmente, el NO_2 interviene en la formación de O_3 y $\text{PM}_{2.5}$ en la atmósfera, intensificando la contaminación en condiciones de alta temperatura y radiación solar [13].

Mediciones realizadas en el centro de Riobamba registraron concentraciones de NO_2 de 0.035 ppm, valores por debajo del nivel de alerta, pero que pueden fluctuar significativamente según el tráfico y las condiciones meteorológicas [5]. Dado que el NO_2 es el principal indicador de contaminación vehicular y que Riobamba carece de un sistema de monitoreo continuo, su medición resulta esencial para evaluar la calidad del aire urbano [19].

2.5.4 Monóxido de carbono (CO)

El monóxido de carbono (CO) es un gas sin color ni olor que se produce cuando los combustibles fósiles no se queman por completo. En las ciudades, la mayor parte del CO proviene de los autos, especialmente cuando hay mucho tráfico [19].

El CO es peligroso para la salud porque se une a la hemoglobina mucho más rápido que el oxígeno, lo que hace que la sangre lleve menos oxígeno a los órganos. La exposición prolongada se ha relacionado con problemas cardíacos y neurológicos [8]. Desde 1971, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) ha mantenido los límites de 9 ppm en promedio durante 8 horas y 35 ppm en 1 hora, sin cambios después de varias revisiones, lo que confirma que siguen siendo límites protectores [22].

Las concentraciones de CO reflejan la distribución espacial del tráfico y de factores como el viento, la topografía y las inversiones térmicas [24]. En 2009, las mediciones en el centro de Riobamba mostraron 2.58 ppm, por debajo del nivel de alerta, aunque este valor puede aumentar mucho en las horas pico [5].

2.5.5 Ozono Troposférico (O₃)

El ozono troposférico es un contaminante secundario que no se emite directamente, sino que se forma mediante reacciones fotoquímicas entre NO_x y compuestos orgánicos volátiles bajo radiación solar intensa. Sus concentraciones son más altas en horas de la tarde en días soleados y con vientos ligeros [25].

La exposición breve causa irritación respiratoria y empeora el asma. La exposición prolongada se asocia con desarrollo de asma en niños, problemas cardiovasculares y deterioro cognitivo [21]. A nivel global, la exposición urbana al O₃ aumentó en promedio 0.8% anual entre 2000 y 2019 en el 89% de las estaciones monitoreadas [22]. La EPA establece un límite de 70 ppb promedio en 8 horas como estándar de protección [25].

2.5.6 Dióxido de Azufre (SO₂)

El SO₂ es un gas incoloro de olor fuerte producido principalmente por la quema de combustibles fósiles, procesos industriales y erupciones volcánicas [4]. La exposición a concentraciones elevadas causa irritación de vías respiratorias y broncoespasmos, y estudios recientes confirman asociación con mortalidad respiratoria incluso a exposiciones de corto plazo [26]. La NECA establece límites de 60 µg/m³ anual y 125 µg/m³ en 24 horas [14], mientras que la OMS recomienda valores más estrictos de 40 µg/m³ anual [18].

Mediciones en Riobamba registraron concentraciones por debajo del nivel de alerta, aunque su monitoreo continuo es necesario considerando la influencia de la actividad volcánica del Tungurahua en la región [5].

2.6 ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, el uso de sistemas sensorizados de bajo costo para monitorear la calidad del aire ha crecido significativamente, ya que permiten obtener datos más precisos y accesibles en las ciudades. A continuación, se presentan los estudios más importantes relacionados con esta investigación.

Carrillo Amado creó una estación meteorológica de bajo costo con Arduino para monitorear la calidad del aire, utilizando sensores MQ-7, MQ-135 y MQ-131 para detectar gases como

CO, NH₃ y CH₄ [27]. Los sensores se calibraron mediante librerías específicas basadas en modelos matemáticos, lo que permitió recopilar datos de variables atmosféricas y de gases contaminantes de forma continua. Este estudio es un antecedente directo para esta investigación por su enfoque en hardware abierto y en sensores económicos para el monitoreo ambiental urbano.

En [28], se diseñó un dispositivo portátil para medir la contaminación de fuentes fijas, centrado en gases como PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ y SO₂. El sistema usó una plataforma ESP32 con un módulo microSD para almacenar datos localmente y funcionó durante 1,5 horas con una batería LiPo de 450 mAh. Este estudio es relevante porque analiza contaminantes similares a los de esta investigación y muestra que los sistemas portátiles son viables para el monitoreo en campo.

De la misma manera, en [30] se desarrolló un sistema de calidad del aire con sensores que incorpora los sensores MQ-135, MQ-7, MQ-131 y SDS011 en una plataforma ESP32. Para examinar los datos recopilados, el sistema se implementó en ambientes industriales durante dos semanas, empleando filtros por zona y por fecha. Las concentraciones de contaminantes variaron notablemente, especialmente en áreas con más actividad industrial, lo que demuestra la eficacia de estos sistemas para detectar patrones de contaminación en tiempo real.

En el ámbito del monitoreo aéreo, Villa et al. propusieron una plataforma de UAV de bajo costo, equipada con sensores electroquímicos, para detectar gases contaminantes en entornos urbanos [29]. El sistema demostró ser modular y adaptable, convirtiéndose en un referente en el diseño de arquitecturas de hardware para el monitoreo aéreo de la calidad del aire. Complementando este trabajo, Samad et al. realizaron una comparación entre sensores de bajo costo montados en UAV y estaciones de referencia fijas para la medición de material particulado, obteniendo una correlación de $R^2=0.91$ con la estación oficial [30]. Este resultado confirma que los sensores de bajo costo integrados en plataformas móviles ofrecen una precisión aceptable para estudios de calidad del aire a escala urbana.

Pochwała et al. crearon un sistema para mapear contaminantes atmosféricos y transmitir datos en tiempo real mediante el protocolo LoRa [11]. La plataforma, basada en un UAV de

ala fija con sensores de NOx y CO, cubrió un área de 2 km² en una sola misión. Fue uno de los primeros sistemas en emplear la comunicación LoRa en vuelo para el monitoreo ambiental [29]. Este antecedente es relevante para este trabajo por el uso de LoRa como alternativa de comunicación inalámbrica de largo alcance.

En el contexto local, Montero López et al. (2020) mostraron que existe una relación directa entre la contaminación ambiental y las afecciones respiratorias en la población de Riobamba [5]. El estudio, realizado entre diciembre de 2018 y enero de 2019, comparó dos sectores de la ciudad con distintos niveles de tráfico y encontró que el sector con mayor tráfico presentó más casos de afecciones respiratorias [5]. Se registraron 31.764 casos de infecciones respiratorias agudas en Chimborazo. Las principales afecciones fueron rinitis alérgica, asma bronquial, bronquitis y neumonía. Un dato importante es que no se observó relación entre el sexo y estas afecciones en ninguno de los grupos, lo que refuerza la idea de que la contaminación ambiental es el factor principal [5]. Los autores destacan el dióxido de nitrógeno como uno de los contaminantes más importantes en zonas de alto tráfico, por lo que debe incluirse en los sistemas de monitoreo [5].

La Tabla 2 resume los sistemas de monitoreo atmosférico más relevantes revisados en el presente estado del arte, donde se contemplan la metodología que ha sido usada, componentes de hardware y los resultados clave de los estudios realizados.

Tabla 2. Revisión de sistemas de monitorización atmosférica, [11], [27], [29], [30], [31], [32].

Autores	Metodología	Componentes de Hardware	Resultados Clave
Carrillo Amado	Estación meteorológica de bajo costo	Arduino, sensores MQ-7, MQ-135, MQ-131	Recopilación continua de gases y variables atmosféricas con hardware abierto
González et al. (2022)	Monitoreo de gases en vuelo y estacionario	UAV, sensores electroquímicos CO, O ₃ , NO, NO ₂	Sistema de bajo costo para zonas de difícil acceso
Estudio UAV 3D (2022)	Perfil vertical de PM cerca de vía urbana	Hexacóptero DJI Matrice 600, sensores PM y BC	PM disminuye con la altura (0–500 m)

Pochwała et al. (2022)	Mapeo espacial con transmisión en tiempo real	UAV de ala fija, sensores NOx y CO, LoRa	Cobertura de 2 km ² en una sola misión
Villa et al. (2016)	Plataforma UAV para gases contaminantes urbanos	Hexacóptero, sensores electroquímicos	Sistema modular y de bajo costo para monitoreo aéreo
Samad et al. (2021)	Comparación sensor UAV vs estación fija	UAV, sensor SDS011, datalogger	Correlación R ² =0.91 con estación oficial

CAPÍTULO III.

3. METODOLOGÍA.

En este capítulo se presenta la metodología aplicada al desarrollo de esta investigación, describiendo el tipo y el diseño de la investigación, las técnicas utilizadas para la recolección de datos, la población y la muestra de estudio, así como los métodos empleados para el análisis y el procesamiento de la información obtenida. El objetivo es establecer un marco metodológico claro que permita replicar este estudio y validar los resultados obtenidos en la evaluación de la calidad del aire en la zona urbana de Riobamba.

3.1 Tipo de investigación

La presente investigación es experimental y aplicada, ya que se diseñó, implementó y probó un sistema de sensores para medir gases contaminantes en la capa límite atmosférica, y se evaluó su funcionamiento en condiciones reales en distintos puntos de la zona urbana de Riobamba.

Es aplicada porque para su desarrollo se usan conocimientos sobre ingeniería, programación y electrónica, que al final nos llevará al tipo experimental, ya que se manipuló y analizó diferentes tipos de variables que ayudaron a cubrir con esa falta de información actualizada sobre la calidad del aire y su impacto.

3.2 Técnicas de recolección de datos.

En este proyecto de investigación se emplearon varias técnicas de recolección de datos, complementadas entre sí para respaldar la parte teórica y obtener información experimental. Las variables se registraron de manera directa y automática en tiempo real, lo que permitió recopilar datos continuos y cuantificables sobre las concentraciones de gases contaminantes y de material particulado en la zona urbana de Riobamba.

3.2.1 Análisis documental.

Se revisaron artículos científicos, libros, tesis, normas técnicas y documentos oficiales sobre la calidad del aire, sistemas sensorizados, técnicas de calibración y estudios previos en Ecuador, especialmente en Riobamba. La información se obtuvo de bases de datos académicas, como IEEE Xplore, ScienceDirect, Google Scholar y ResearchGate, así como

de repositorios universitarios. Solo se analizaron publicaciones de los últimos cinco años (2021-2025) para asegurar que la información fuera actual y relevante.

3.2.2 Instrumentos

Los principales componentes utilizados fueron: el microcontrolador ESP-32 como unidad central de control y procesamiento; el sensor MQ-131 para la medición de O₃; el sensor MICS-2714 para NO₂; el sensor SDS011 para material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀); el sensor MICS-5524 para CO; y el sensor TB600B para SO₂. Los datos recolectados por cada sensor se almacenaron en una tarjeta SD en formato CSV para su análisis posterior. El sistema fue alimentado por una batería LiPo, lo que garantizó la portabilidad y la autonomía del dispositivo durante las mediciones en campo.

3.2.3 Procedimiento de medición

Antes de empezar las mediciones en campo, se calibraron los sensores para asegurar la precisión de los datos. Mientras el sistema funcionaba, los sensores registraron lecturas periódicas simultáneas en puntos estratégicos de la zona urbana de Riobamba, considerando el tráfico y las condiciones meteorológicas. Los datos se guardaron en archivos CSV en la tarjeta SD, registrando la hora, temperatura, altitud, concentraciones

3.2.4 Procesamiento y control de calidad de datos

Los archivos en formato CSV se revisaron primero para identificar y eliminar registros incompletos o valores atípicos que pudieran afectar los resultados. Luego, la información depurada se procesó mediante métodos estadísticos y matemáticos para calcular concentraciones, identificar patrones de contaminación y comparar los datos con los límites establecidos por la OMS y la EPA. Registrar la hora, temperatura y la ubicación de cada medición ayudó a asegurar la trazabilidad y la validez de la información.

3.3 Operacionalización de variables.

3.3.1 Variables Independientes

Tabla 3. Variables Independientes.

Nombre	Descripción	Indicador	Técnica e instrumento
Parroquia urbana	Zona geográfica dentro del área urbana de Riobamba donde se realizó el vuelo	Nominal: Lizarzaburu, Maldonado, Velasco, Veloz, Yaruquíes	Georeferenciación
Altura de vuelo	Altura a la que opera el sistema sensorizado durante la medición	Numérica: 20, 40, 60, 80, 100 metros	Control del sistema de navegación del dron

3.3.2 Variables dependientes

Tabla 4. Variable Dependiente.

Nombre	Descripción	Indicador	Técnica e instrumento
Índice de Calidad del Aire (IQCA)	Índice compuesto que evalúa la calidad del aire exterior a partir de la concentración de gases contaminantes medidos en las zonas urbanas de Riobamba	Índice adimensional continuo	Medición directa mediante sensores específicos integrados al sistema de monitoreo.

3.4 Población de estudio y tamaño de muestra

Se identificaron las cinco parroquias urbanas del cantón Riobamba donde se realizó la recolección de datos, en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**Figura 3 mediante un mapa con colores diferenciados para cada zona de muestreo donde se realizó la recolección de datos:

- Maldonado,
- Veloz
- Lizarzaburu
- Velasco
- Yaruquíes

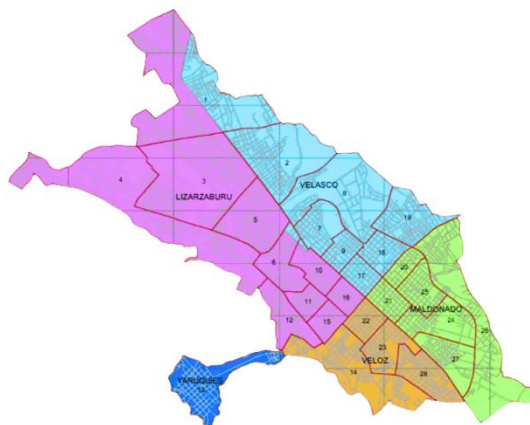


Figura 3. Parroquias urbanas delimitadas de la ciudad de Riobamba [33].

3.4.1 Muestra

La muestra en este estudio se compone de las concentraciones de gases contaminantes medidas en sitios estratégicos seleccionados dentro de las parroquias urbanas de Riobamba. Cada sitio fue elegido para representar diferentes áreas de la ciudad, garantizando una cobertura amplia y representativa de las variaciones en la calidad del aire

3.4.2 Muestreo

En este estudio se empleó un muestreo no determinístico para evaluar la calidad del aire en la zona urbana de Riobamba. El objetivo fue obtener una visión representativa de la contaminación en distintas áreas y en distintos puntos de la zona. En cada punto de muestreo

se midieron las concentraciones de Dióxido de nitrógeno (NO₂), dióxido de azufre (SO₂) y de material particulado fino y grueso (PM_{2.5} y PM₁₀), siguiendo las recomendaciones de medición para zonas urbanas.

3.5 Diagrama de fases del diagnóstico de contaminantes para evaluar la calidad del aire en la zona urbana de Riobamba.

La Figura 4 muestra el diagrama de fases del proyecto. Este esquema resume los pasos realizados en la investigación: identificar los contaminantes a monitorear, diseñar e implementar el sistema sensorizado y, por último, recolectar y evaluar los datos obtenidos.

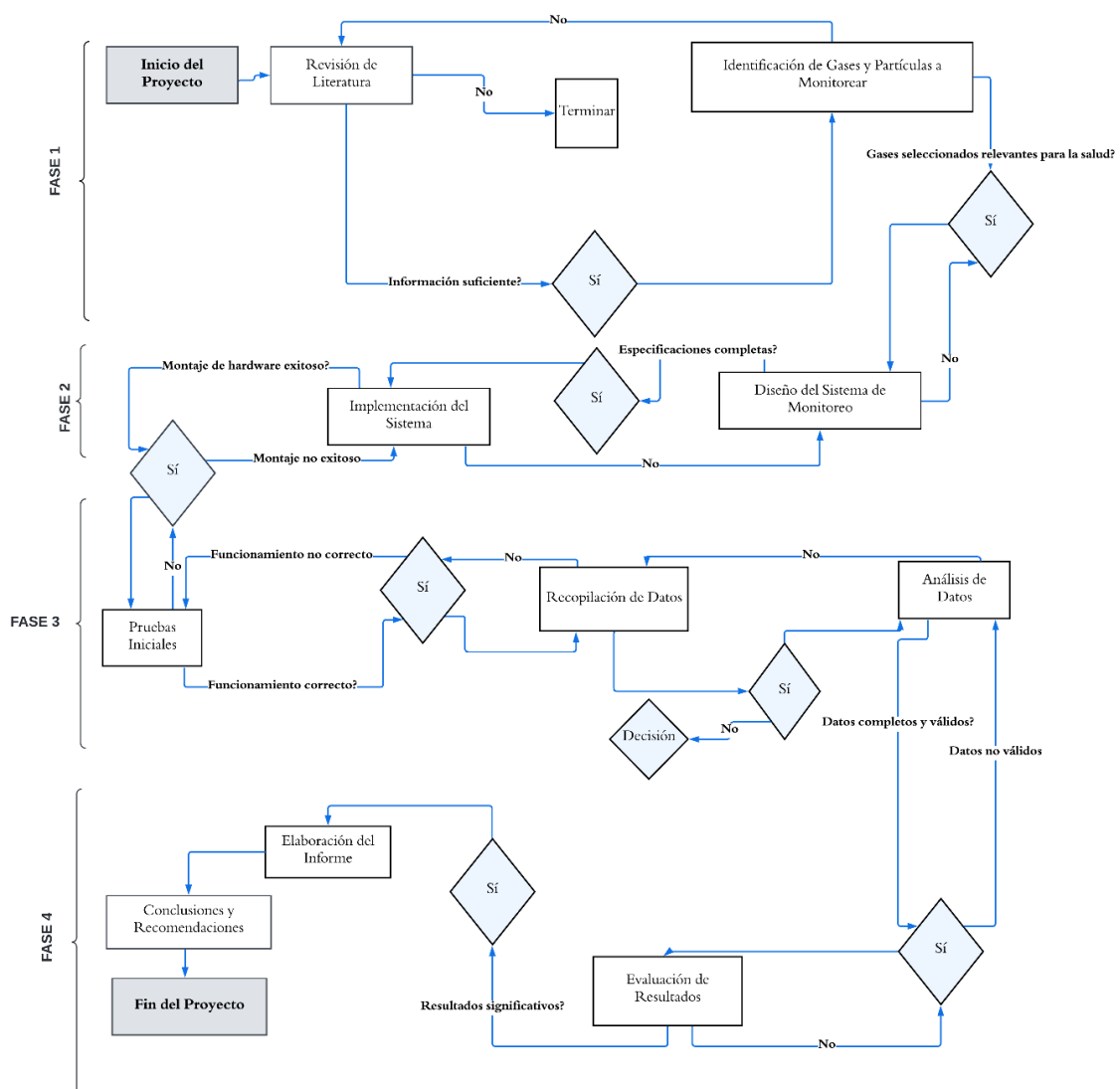


Figura 4. Secuencia de trabajo estructurada por fases del proyecto de investigación.

3.6 Fase 1: Revisión bibliográfica e identificación de los gases contaminantes.

Esta fase corresponde a uno de los objetivos específicos del trabajo. Su propósito fue armar la base teórica del proyecto e identificar cuáles eran los contaminantes que tenían que monitorearse en la zona urbana de Riobamba. Para lograrlo, se hizo una revisión de literatura científica reciente y también se consultó la normativa ecuatoriana e internacional vigente.

3.6.1 Búsqueda y selección de fuentes

La consulta se llevó a cabo entre enero de 2025 y enero de 2026, tomando como referencia publicaciones de los últimos cinco años (2021 – 2025) para que la información usada estuviera actualizada. Las búsquedas se hicieron en cuatro bases de datos académicas: IEEE Xplore, ScienceDirect, Google Scholar y ResearchGate. Además, se revisaron repositorios universitarios y documentos oficiales de la OMS, la EPA y el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica del Ecuador (MAATE).

Para las búsquedas se usaron palabras clave en español e inglés, como por ejemplo: calidad del aire, air quality monitoring, low-cost sensors, UAV-based air quality, atmospheric boundary layer, PM2.5, NO₂, sensor calibration y air pollution Ecuador. Se dio prioridad a artículos indexados con revisión por pares, normativas oficiales (TULSMA – Libro VI Anexo 4, Guías OMS 2021 y EPA) y tesis universitarias del área de monitoreo ambiental y telecomunicaciones. En la Tabla 5 se resumen los criterios usados.

Tabla 5. Parámetros usados en la revisión bibliográfica.

Criterio	Detalle
Período de la revisión	Enero 2025 – Enero 2026
Año de publicación de las fuentes	2021 – 2025 (últimos 5 años)
Bases de datos	IEEE Xplore, ScienceDirect, Google Scholar, ResearchGate
Idioma	Español e inglés
Palabras clave	<i>air quality, low-cost sensors, UAV, PM2.5, capa límite atmosférica</i>
Tipo de documentos	Artículos indexados, normativas, tesis

3.6.2 Ejes temáticos del análisis

Con la información revisada, el análisis se ordenó en cuatro ejes que sirvieron como base para todo lo que vino después. El desarrollo teórico detallado de cada eje está en el Capítulo II (secciones 2.3 y 2.4); aquí solo se resume el aporte al diseño metodológico.

a) Contaminantes con mayor presencia en zonas urbanas. Se revisaron las guías de calidad del aire de la OMS, actualizadas en 2021 [1], donde se fijan los nuevos límites recomendados: PM_{2.5} (5 µg/m³ anual), PM₁₀ (15 µg/m³ anual), NO₂ (10 µg/m³ anual), O₃ (60 µg/m³ en 8 h) y SO₂ (40 µg/m³ en 24 h). Estos valores son bastante más estrictos que los de versiones anteriores, lo que muestra que cada vez se reconoce más el daño que causa el aire contaminado, incluso cuando los niveles son bajos. Esto se complementó con estudios recientes que relacionan estos contaminantes con problemas respiratorios y cardiovasculares [8], [23].

b) Contaminación atmosférica en Riobamba. A nivel local, los estudios revisados muestran que la calidad del aire en Riobamba se ve afectada sobre todo por el tráfico vehicular, la actividad industrial y fuentes naturales como el volcán Tungurahua. Montero López et al. (2020) [3] realizaron un monitoreo y obtuvieron mediciones en el centro de la ciudad entre diciembre de 2018 y enero de 2019, donde encontraron concentraciones de CO de 2.58 ppm, NO de 0.18 ppm, NO₂ de 0.035 ppm y SO₂ de 0.027 ppm. Estos valores están por debajo del nivel de alerta, pero igual demuestran que la presencia de contaminantes es constante, sobre todo por la combustión vehicular. En ese mismo estudio se reportaron 31 764 casos de infecciones respiratorias agudas en la provincia de Chimborazo, lo que evidencia una relación entre la mala calidad del aire y la salud de la población.

c) Sistemas de monitoreo de bajo costo con hardware abierto. En los últimos años, los sistemas sensorizados de bajo costo se han vuelto una alternativa interesante para el monitoreo ambiental, ya que son accesibles y se pueden usar de forma distribuida. Castell et al. [7], explicaron el concepto técnico de "sensor de bajo costo" y mostraron que estas plataformas pueden aportar al monitoreo si se calibran bien. Schilt et al. (2023) [4] probaron en campo un nodo sensorizado para material particulado y confirmaron que estos equipos generan datos representativos cuando se los compara con estaciones de referencia. En cuanto al monitoreo desde el aire, se revisó también el trabajo de Villa et al. [11], cuya revisión es referencia obligada para este enfoque. Más reciente, Pochwała et al. (2022) [29],

desarrollaron un prototipo de UAV ecológico con transmisión LoRa en vuelo, lo que muestra que es viable hacer monitoreo aéreo de forma continua.

d) Normativa de referencia para evaluar los resultados. Para evaluar los resultados se trabajó con dos marcos normativos. A nivel nacional, la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire Ambiente (NECA), que está dentro del TULSMA, Libro VI, Anexo 4 [10], es la que fija los límites permitidos en Ecuador. A nivel internacional se tomaron como referencia las guías de la OMS 2021 [1], y los estándares de la EPA [24], [25]. Adicionalmente, se eligió el Índice Quiteño de la Calidad del Aire (IQCA) [14] como herramienta de evaluación, porque sus rangos están atados directamente a la normativa ecuatoriana y permite clasificar el estado del aire en seis categorías de forma clara.

3.6.3 Resultado de la fase: contaminantes seleccionados

Después de revisar toda la información y tomando en cuenta tanto las recomendaciones internacionales [1] como las condiciones propias de Riobamba [5], [19], se definieron cinco contaminantes prioritarios para monitorear en este trabajo. La selección incluye dos materiales particulados (PM2.5 y PM10), tres gases (NO₂, CO, SO₂) y un contaminante secundario (O₃). El criterio que justifica cada uno se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Contaminantes seleccionados para el monitoreo en Riobamba.

Contaminante	Tipo	Criterio principal de selección	Ref.
PM2.5	Primario	Es el contaminante con mayor impacto sanitario a nivel mundial; ya está documentado en Riobamba	[1], [5]
PM10	Primario	Asociado al polvo urbano, construcción y resuspensión por tráfico	[20], [8]
NO ₂	Primario	Principal indicador de contaminación vehicular en zonas urbanas	[16], [23]
CO	Primario	Indicador de combustión incompleta; relevante en zonas de alto tráfico	[8], [24]
O ₃	Secundario	Se forma por reacciones fotoquímicas a partir de precursores vehiculares	[34], [25]
SO ₂	Primario	Aportado por el volcán Tungurahua y por procesos industriales	[26], [8]

3.7 Fase 2: Diseño e implementación del sistema sensorizado.

En esta etapa se creó un sistema sensorizado para detectar gases contaminantes en la zona urbana de Riobamba. El trabajo incluyó definir las especificaciones técnicas, seleccionar los sensores y los componentes electrónicos, diseñar el esquema de conexiones, programar el microcontrolador y diseñar la carcasa protectora.

El sistema es un dispositivo portátil y autónomo que puede funcionar de forma independiente o integrarse en un dron, lo que permite recolectar datos en distintas condiciones y alturas

3.7.1 Definición de las especificaciones del sistema

Antes de diseñar el sistema, se definieron los requisitos mínimos que debía cumplir para que resultara adecuado para mediciones de campo. Se decidió que el dispositivo debía:

- Operar de forma autónoma sin depender de conexiones externas durante su funcionamiento
- Almacenar todos los datos capturados en una tarjeta microSD junto con la referencia temporal de cada medición
- Transmitir los datos en tiempo real mediante Bluetooth a un dispositivo móvil
- Tener peso y dimensiones que permitieran su uso tanto de forma manual como montado en un dron
- Resistir las condiciones ambientales propias de operación en exteriores como variaciones de temperatura, humedad y exposición al viento

Estas especificaciones marcaron el punto de partida para las decisiones tomadas tanto en el diseño electrónico como en el mecánico de la carcasa.

3.7.2 Selección de componentes electrónicos

3.7.2.1 Selección del microcontrolador.

Se establecieron varios criterios técnicos para la selección del microcontrolador, considerando que este componente actúa como la unidad central del sistema y debe ser capaz de gestionar la lectura simultánea de múltiples sensores, almacenar los datos en la tarjeta microSD y transmitirlos en tiempo real mediante Bluetooth, todo ello operando con una batería LiPo de capacidad limitada. Por ello, se priorizaron plataformas que integraran

conectividad inalámbrica, contaran con suficientes pines de entrada y salida, tuvieran bajo consumo energético y fueran compatibles con el entorno de programación Arduino IDE. A continuación, en la Tabla 7 se presenta la comparación entre tres plataformas evaluadas:

Tabla 7. Comparación de microcontroladores [35].

Característica	ESP32	Arduino Mega	Raspberry Pi 4
Procesador	Dual-core 32 bits, 240 MHz	8 bits, 16 MHz	Quad-core 64 bits, 1.8 GHz
RAM	520 KB	8 KB	1-8 GB
WiFi integrado	Sí	No	Sí
Bluetooth integrado	Sí	No	Sí
Pines GPIO	34	54	40
Protocolos	SPI, I2C, UART, ADC	SPI, I2C, UART	SPI, I2C, UART
Consumo energético	Bajo (240 mA máx.)	Medio (200 mA máx.)	Alto (600 mA - 3 A)
Compatible Arduino IDE	Sí	Sí	No nativa
Costo aproximado	\$5 - \$10	\$15 - \$25	\$35 - \$80
Peso aproximado	~5 g	~37 g	~45 g

Tras el análisis comparativo se seleccionó el ESP32 como microcontrolador del sistema. Su doble núcleo permitió separar las tareas de adquisición de datos de las de comunicación y almacenamiento, lo cual es fundamental para garantizar que ninguna lectura de sensor se pierda durante la transmisión Bluetooth. Adicionalmente, su conectividad WiFi y Bluetooth integrada eliminó la necesidad de módulos externos, reduciendo el peso y el consumo del sistema, aspectos críticos para su operación sobre el dron.

Estas especificaciones marcaron el punto de partida para las decisiones tomadas tanto en el diseño electrónico como en el diseño mecánico de la carcasa.

3.7.3 Selección de sensores y componentes adicionales

Después del análisis previo, se seleccionaron los sensores considerando su costo, disponibilidad en el mercado y características técnicas. La Tabla 8 muestra los componentes elegidos para el sistema.

Tabla 8. Componentes seleccionados para el sistema sensorizado [36].

Componente	Modelo	Función	Rango de operación	Comunicación
Sensor PM2.5 / PM10	SDS011	Material particulado	0 – 999.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	UART
Sensor NO ₂	MICS-2714	Dióxido de nitrógeno	0.05 – 10 ppm	Analógica (ADC)
Sensor CO	MICS-5524	Monóxido de carbono	1 – 1000 ppm	Analógica (ADC)
Sensor O ₃	MQ-131	Ozono troposférico	10 – 1000 ppb	Analógica (ADC)
Sensor SO ₂	TB600B	Dióxido de azufre	0 – 20 ppm	UART
Sensor T / P	BMP280	Temperatura y presión	–40 a 85 °C / 300 – 1100 hPa	I ² C
Almacenamiento	Módulo microSD	Registro local en CSV	—	SPI
Energía	Batería LiPo	Alimentación del sistema	3.7 V nominal	—

3.7.4 Arquitectura general del sistema

Para comprender de manera integral el funcionamiento del sistema sensorizado de monitoreo de calidad del aire, se ha estructurado su descripción en bloques funcionales. Cada bloque representa una etapa clave dentro del proceso, desde la adquisición de datos hasta su procesamiento y visualización, permitiendo así una lectura ordenada y clara de cómo interactúan los componentes del sistema.

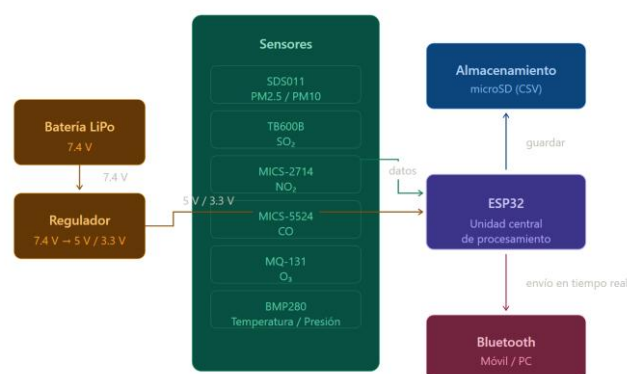


Figura 5. Principio de funcionamiento del sistema sensorizado.

En la Figura 5 se presenta la arquitectura del sistema sensorizado, se organizó en cinco bloques funcionales: alimentación, sensores, unidad central de procesamiento, almacenamiento y comunicación inalámbrica. La batería LiPo de 7.4 V alimenta a un regulador, encargado de entregar los voltajes adecuados al ESP32 y a los sensores (5 V y 3.3 V). Los sensores envían sus mediciones al ESP32 mediante UART, I²C o ADC, según el protocolo de cada uno. El ESP32 procesa los datos y los envía a dos destinos: la tarjeta microSD, donde se guardan localmente en formato CSV, y un módulo Bluetooth integrado, que permite la supervisión en tiempo real desde un dispositivo móvil o computador durante el vuelo.

3.7.5 Diseño del esquema electrónico

Una vez definidos los componentes, el siguiente paso consistió en determinar la forma en que se conectarían entre sí. Para ello, se evaluaron las dimensiones de cada sensor y se elaboró inicialmente un esquema en la plataforma cirKit, lo que permitió visualizar la disposición antes de continuar con el proceso. Este procedimiento se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

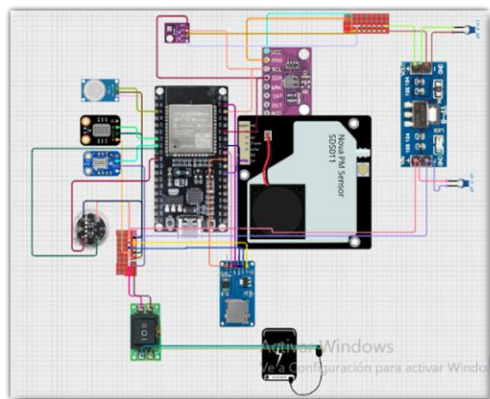


Figura 6. Diseño electrónico del sistema.

El ESP32 fue posicionado como la unidad central del sistema, encargada de recibir las señales de todos los sensores, procesarlas y escribirlas en la tarjeta microSD.

En la Figura 7a se presenta el diseño de la placa PCB desarrollada para el sistema. Durante su diseño se tuvo especial cuidado en que ningún componente compartiera líneas de alimentación que pudieran generar interferencias entre módulos, verificando además que los niveles de voltaje fueran compatibles entre sí. Se incorporó un regulador de voltaje para adaptar la tensión proveniente de la batería LiPo a los niveles requeridos por cada componente, así como resistencias de protección para los sensores, se muestra finalizado en impreso el diseño en la Figura 7b.

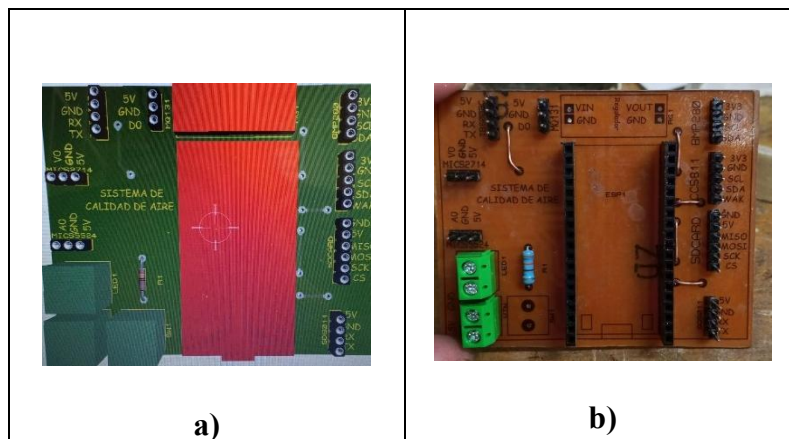


Figura 7. a) Diseño electrónico del sistema sensorizado, b) Placa PCB impresa

3.7.6 Diseño de la carcasa en 3D

Paralelamente al diseño electrónico, se trabajó en el diseño de la carcasa que alojaría todos los componentes durante el vuelo. Esta pieza cumple una función doble: por un lado protege la electrónica de las condiciones del entorno, y por otro garantiza que los sensores queden expuestos correctamente al flujo de aire para obtener lecturas representativas del ambiente.

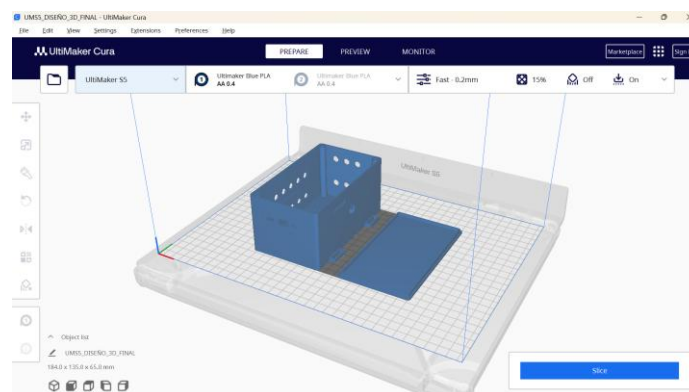


Figura 8. Representación tridimensional del diseño — vistas frontal, lateral y explosionada

El diseño como se puede observar en la Figura 8 se realizó en software de modelado tridimensional SolidWorks y renderizada y configurada en Ultimaker Cura, considerando desde el inicio las dimensiones reales de cada componente para asegurar un ajuste preciso. Se incorporaron aberturas en las zonas donde se ubican los sensores de gas y partículas para permitir el libre intercambio de aire, ranuras de ventilación para disipar el calor generado por los sensores MQ durante su operación, y puntos de anclaje en la base para fijar la carcasa al chasis del dron de manera segura y sin vibración excesiva.

Para la impresión se usó PLA, ya que es un material liviano, fácil de imprimir y con la rigidez necesaria para resistir las condiciones de vuelo sin deformarse. En la Figura 9 se muestra el resultado final de la pieza impresa.



Figura 9. Diseño 3D final impreso.

3.7.7 Programación e implementación del sistema sensorizado

El programa funciona en un ciclo que se repite cada 2 segundos. En cada ciclo se leen todos los sensores, se aplican las ecuaciones de calibración (obtenidas en la sección 3.8.5), se calcula el IQCA y se guarda una fila nueva en el archivo datos.csv de la microSD. Al mismo tiempo, los datos también se envían por Bluetooth para revisar las lecturas en tiempo real desde el celular. La Figura 10 muestra el flujo de ejecución del programa.

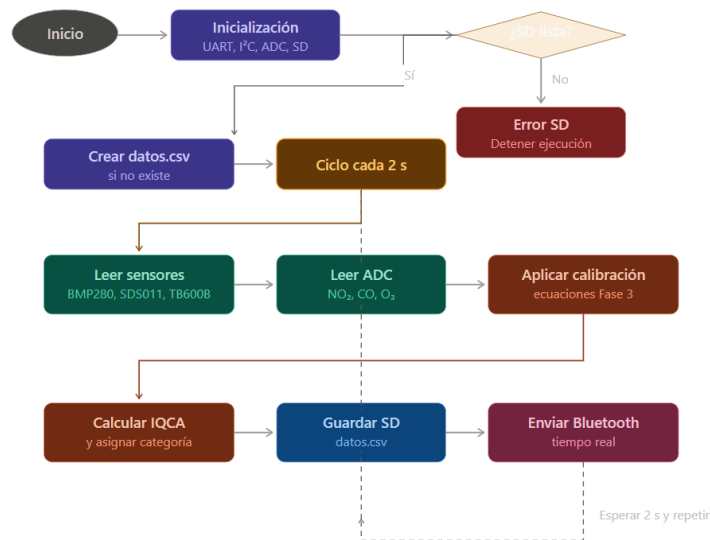


Figura 10. Secuencia lógica de programación del sistema sensorizado.

Para programar el ESP32 se trabajó en Arduino IDE como se presenta en la Figura 11, usando el framework de Arduino para ESP32 y lenguaje C++. Las librerías que se incluyeron en el código permiten manejar la comunicación con cada sensor, la escritura en la tarjeta microSD y el envío de datos por Bluetooth.

```

CODIGO CALIDAD DEL AIRE | Arduino IDE 2.7.7
ESP32 Dev Module

CODIGO CALIDAD DEL AIRE.ino
14
15 #include <HardwareSerial.h>
16 #include <Adafruit_SHT20.h>
17 #include <Adafruit_SHT20.h>
18 #include <SDS1A.h>
19 #include <SDS1A.h>
20
21 // --- Pines ---
22 #define RX_PIN_S02 16
23 #define TX_PIN_S02 17
24 #define RX_PIN_S03 25
25 #define TX_PIN_S03 26
26 #define RX_PIN_S04 33
27 #define TX_PIN_S04 34
28 #define RX_PIN_S05 36
29 #define TX_PIN_S05 37
30
31 // --- Variables ---
32
33 // --- Inicialización ---
34 HardwareSerial serialS02(2);
35 HardwareSerial serialS03(1);
36 Adafruit_SHT20 sht;
37 SDS1A sds = new SDS1A(SDS1);
38
39 // --- Main Loop ---
40 byte cmdS02[] = {0xFF, 0x01, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00};
41 float f_h02 = 0, f_co = 0, f_o3 = 0;
42 float timestamp = 0.00;
43 float ganancia = 10.0;
44 unsigned long tiempoInicio = 0;
45
  
```

Figura 11. Entorno de programación Arduino IDE.

3.7.8 Montaje e implementación física

Con el esquema electrónico validado y la carcasa fabricada, se procedió al ensamblaje del sistema. Los componentes fueron montados y conectados siguiendo el diagrama de conexiones, verificando continuidad eléctrica en cada etapa antes de avanzar a la siguiente. Una vez ensamblado el circuito completo, se realizaron pruebas de encendido para confirmar

que todos los módulos respondieran correctamente y que el ESP32 reconociera cada sensor sin errores.

Cuando todo funcionó correctamente de forma individual, se procedió al ensamblaje final dentro de la carcasa impresa y a la fijación del conjunto sobre el dron tal como se puede ver en la Figura 12 . Durante este proceso surgieron algunos ajustes menores en el diseño de la carcasa relacionados con la posición de ciertos componentes, los cuales fueron resueltos mediante modificaciones en el modelo 3D y una nueva impresión, hasta obtener el montaje definitivo.



Figura 12. Diseño completo e implementado fijado al dron.

3.8 Fase 3 : Pruebas iniciales y calibración de sensores

La tercera etapa del proyecto se centró en realizar una calibración de los sensores y pruebas iniciales para garantizar que el sistema funcione correctamente. Se recopilieron datos sobre la calidad del aire en las zonas urbanas de Riobamba una vez que el sistema funcione correctamente, se realizará un análisis de estos datos para garantizar su autenticidad y completitud. El proceso de recopilación y análisis se modificará para obtener datos útiles y confiables en caso de que se descubran datos inválidos o incompletos.

3.8.1 Pruebas iniciales del sistema de calidad de aire

Previo a la recolección de datos se realizaron pruebas iniciales de funcionamiento, esto con el objetivo de verificar de que los sensores respondieran correctamente a la presencia de contaminantes en el ambiente, sometiénolos a pruebas. Durante esta etapa los sensores operaron sin ningún tipo de corrección registrando así los valores en bruto cada segundo confirmando así que el dispositivo se encontraba en condiciones operativas adecuadas

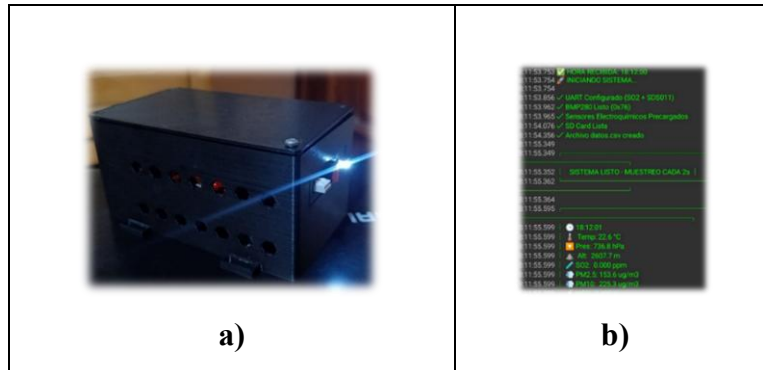


Figura 13. Verificación del funcionamiento del sistema sensorizado: a) Dispositivo encendido y operativo, b) Serial monitor por Bluetooth.

Como se observa en la Figura 13, se presenta pruebas de su funcionamiento primero en a) se presenta el dispositivo portátil ya encendido y funcionando como se puede ver y para su comprobación en la parte b) comienza a cargarse el firmware de este donde inicializa todos los sensores y tarjeta sd para verificar errores de reconocimiento de sensores y luego comienza con el muestreo.

3.8.2 Sitio y protocolo de calibración

La calibración se realizó en la Estación de Monitoreo Belisario de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ), por ser la estación oficial más cercana con certificación para los contaminantes de interés [14]. El sistema sensorizado se ubicó junto a los equipos de referencia y registró mediciones simultáneas durante 48 horas, emparejando los datos por marca de tiempo.



Figura 14. Sistema sensorizado en la estación de referencia Belisario durante el proceso de calibración.

3.8.3 Diseño del experimento

Para cada sensor se aplicó regresión lineal por mínimos cuadrados entre la lectura del sensor (x) y el valor reportado por el equipo de referencia (y), obteniendo la ecuación de ajuste de la forma:

$$y = a \cdot x + b$$

donde a es la pendiente y b el intercepto. La calidad del ajuste se evaluó con el coeficiente de determinación R^2 y el coeficiente de correlación r de Pearson.

3.8.4 Resultados de la calibración

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada sensor calibrado. Las gráficas de serie temporal, dispersión y residuos se agrupan por sensor para facilitar el análisis.

a) Sensor de partículas PM2.5

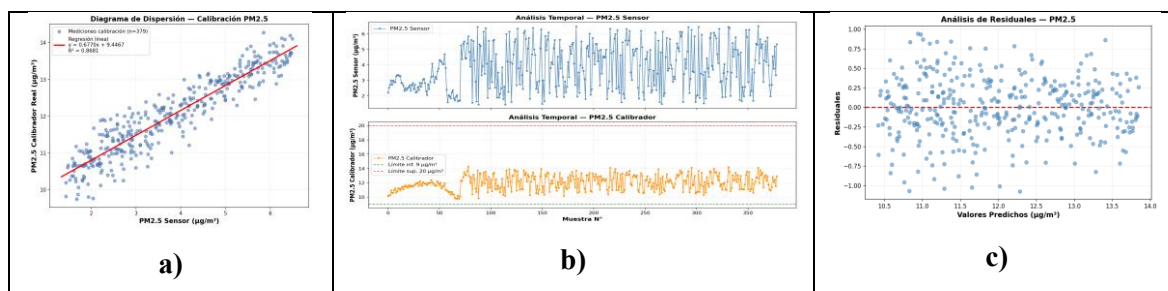


Figura 15. Calibración del SDS011 para PM2.5: (a) serie temporal, (b) dispersión con recta de ajuste, (c) residuos.

Tabla 9. Valores de calibración — PM2.5.

Parámetro	Valor
Pendiente (a)	0.677
Intercepto (b)	9.4467
R²	0.8681
r Pearson	0.9317

El sensor SDS011 para PM2.5 presentó un comportamiento estable durante el proceso de calibración, sin fluctuaciones abruptas en la serie temporal (Figura 15a). La gráfica de dispersión (Figura 15b) evidencia una relación lineal directa entre las lecturas del sensor y las del equipo de referencia, reflejada en la pendiente positiva ($a = 0.677$) y el coeficiente de correlación $r = 0.9317$. Este resultado indica que el sensor reproduce adecuadamente las variaciones de concentración de material particulado fino, manteniendo una respuesta proporcional y consistente. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.8681$ confirma un ajuste sólido, lo que valida la confiabilidad del modelo de calibración aplicado. Los residuos (Figura 15c) se distribuyen de manera aleatoria alrededor de cero, sin tendencia sistemática, demostrando que el modelo lineal describe correctamente la relación entre ambas mediciones y que los errores son principalmente aleatorios.

b) Sensor de Partículas PM10

El análisis temporal permite verificar la consistencia de las mediciones y detectar posibles derivas en las series de calibración:

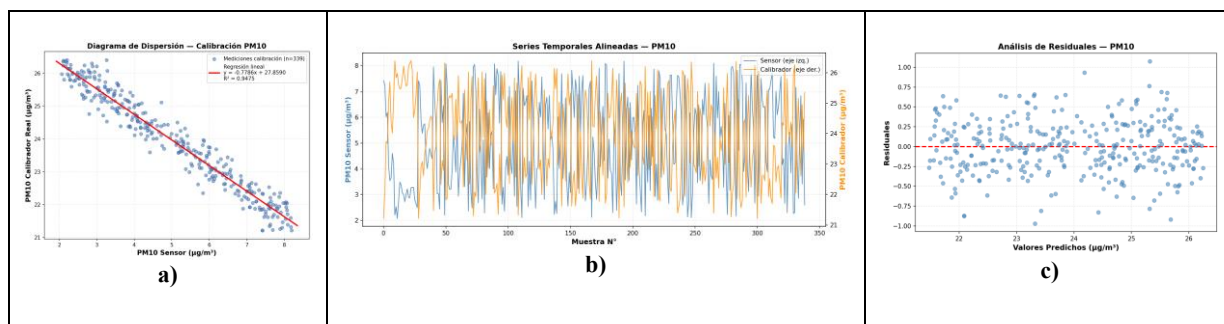


Figura 16. Calibración del SDS011 para PM10: (a) serie temporal, (b) dispersión con recta de ajuste, (c) residuos.

Tabla 10. Valores de calibración — PM10

Parámetro	Valor
Pendiente (a)	-0.7786
Intercepto (b)	27.859
R ²	0.9475
r Pearson	-0.9734

El sensor de PM10 mostró un comportamiento estable durante todo el periodo de calibración, sin derivas apreciables en la serie temporal (Figura 16a). La dispersión (Figura 16b) evidencia una relación lineal inversa con el equipo de referencia, lo que se refleja en la pendiente negativa ($a = -0.7786$) y el coeficiente de correlación $r = -0.9734$. Este resultado indica que el sensor responde de manera consistente a las variaciones de concentración, aunque su escala de salida está invertida respecto al patrón de referencia. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.9475$ confirma un ajuste excelente, lo que valida la confiabilidad del modelo de calibración aplicado. Los residuos (Figura 16c) se distribuyen aleatoriamente alrededor de cero, sin tendencia sistemática, lo que demuestra que el modelo lineal describe adecuadamente la relación entre ambas mediciones y que no existen errores estructurales en la calibración.

c) Sensor MICS-2714 — NO₂

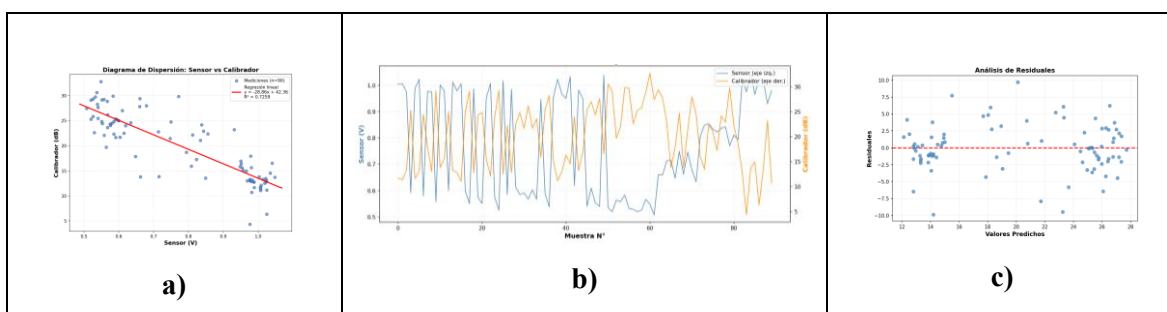


Figura 17. Calibración del MICS-2714 para NO₂: (a) serie temporal, (b) dispersión con recta de ajuste, (c) residuos.

Tabla 11. Valores de calibración — NO₂.

Parámetro	Valor
Pendiente (a)	-28.861
Intercepto (b)	42.3633
R ²	0.7259
r Pearson	-0.8520

El sensor MICS-2714 mostró una respuesta estable durante el periodo de calibración, sin fluctuaciones abruptas en la serie temporal (Figura 17a). La gráfica de dispersión (Figura 17b) evidencia una relación lineal inversa entre las lecturas del sensor y las del equipo de referencia, reflejada en la pendiente negativa ($a = -28.861$) y el coeficiente de correlación $r = -0.8520$. Este comportamiento indica que el sensor detecta adecuadamente las variaciones de concentración de NO₂, aunque su escala de salida está invertida respecto al patrón de referencia. El coeficiente de determinación $R^2 = 0.7259$ confirma un ajuste aceptable, suficiente para describir tendencias urbanas del contaminante. Los residuos (Figura 17c) se distribuyen de forma aleatoria alrededor de cero, sin patrones sistemáticos, lo que demuestra que el modelo lineal aplicado representa correctamente la relación entre ambas mediciones y que los errores son principalmente aleatorios.

d) Sensor de Dióxido de Azufre SO₂(TB600B)

El sensor TB600B es un sensor electroquímico de grado industrial que incorpora calibración interna de fábrica, entregando directamente la concentración de dióxido de azufre (SO₂) en partes por millón (ppm) mediante protocolo de comunicación UART. Dado que la tabla de

puntos de corte de la EPA para el cálculo del AQI utiliza partes por billón (ppb) como unidad de referencia para el SO₂, se aplicó únicamente la conversión de unidades correspondiente:

La confiabilidad del sensor está respaldada por su hoja técnica oficial del fabricante y por literatura científica que valida el uso de sensores electroquímicos industriales en monitoreo de calidad del aire, como [37] en Nature. Adicionalmente, durante las pruebas iniciales se verificó que el sensor respondía correctamente a variaciones de concentración en el ambiente

$$SO_2 (ppb) = SO_2 (ppm) \times 1000$$

No se aplicó ecuación de calibración adicional dado que el sensor cuenta con calibración certificada de fábrica, siendo sus lecturas directamente comparables con los valores de referencia establecidos por los estándares de calidad del aire.

e) Sensores no calibrados (CO y O₃)

El 98.9% de los registros del equipo de referencia para CO y O₃ presentaron concentraciones iguales o indistinguibles de cero durante toda la etapa de monitoreo. Bajo estas condiciones, la varianza de la variable independiente es prácticamente nula, lo que hace estadísticamente inviable ajustar cualquier modelo de calibración independientemente del método empleado. Un modelo construido sobre estos datos no capturaría una relación física real, sino únicamente la variabilidad del ruido instrumental [35]. En consecuencia, estas variables se excluyen del análisis cuantitativo y se reportan como señal cruda.

3.8.5 Resumen final de ecuaciones

La Tabla 12 resume todas las ecuaciones obtenidas, que se incorporaron directamente al programa del ESP32 (Figura 10, Sección 3.7.7) para que la calibración se aplique de forma automática en cada ciclo de muestreo.

Tabla 12. Ecuaciones de calibración aplicadas al sistema.

Sensor	Contaminante	Ecuación de calibración	R ²	r Pearson
SDS011	PM2.5	$y = 0.677 \cdot x + 9.4467$	0.8681	0.9317
SDS011	PM10	$y = -0.7786 \cdot x + 27.859$	0.9475	-0.9734
MICS-2714	NO ₂	$y = -28.861 \cdot x + 42.3633$	0.7259	-0.8520
TB600B	SO ₂	$y_{ppb} = 100 * x$	—	—
MICS-5524	CO	EXCLUIDO DEL ANALISIS	—	—
MQ-131	O ₃	EXCLUIDO DEL ANALIS	—	—

3.9 Fase 4: Protocolo de toma de datos en campo

En esta fase describe cómo se llevó a cabo la toma de datos en los diferentes puntos de monitoreo de la ciudad. Luego de que en la fase 3 se realizó todo el proceso de calibración del sistema, se tomaron decisiones importantes como la de no incluir los contaminantes CO y O₃, y se integraron las ecuaciones del IQCA en la programación del dispositivo. Con el sistema ya validado y funcionando correctamente, se procedió a planificar y ejecutar la campaña de medición en campo.

3.9.1 Selección de puntos de monitoreo por parroquia

Para definir los puntos de monitoreo, primero se analizó cómo está conformado el área urbana del cantón Riobamba, la cual se divide en cinco parroquias: Lizarzaburu, Maldonado, Velasco, Veloz y Yaruquies (ver Figura 3). Con base en esta distribución territorial se seleccionaron tres puntos de monitoreo por parroquia, buscando que cada uno fuera representativo del entorno urbano de su sector.

Los criterios que se tomaron en cuenta para elegir cada punto fueron: que el lugar permitiera el despegue y aterrizaje seguro del dron, que no existieran obstáculos aéreos como cables de alta tensión, que el entorno fuera representativo de la parroquia y que hubiera espacio abierto suficiente para operar el equipo sin inconvenientes.

En la Figura 18 se presentan los 15 puntos de monitoreo distribuidos en las cinco parroquias urbanas del cantón.

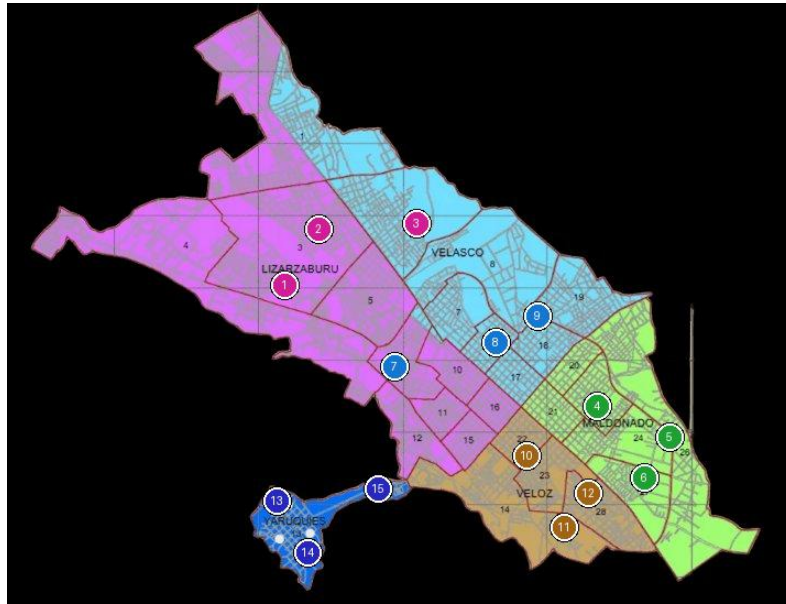
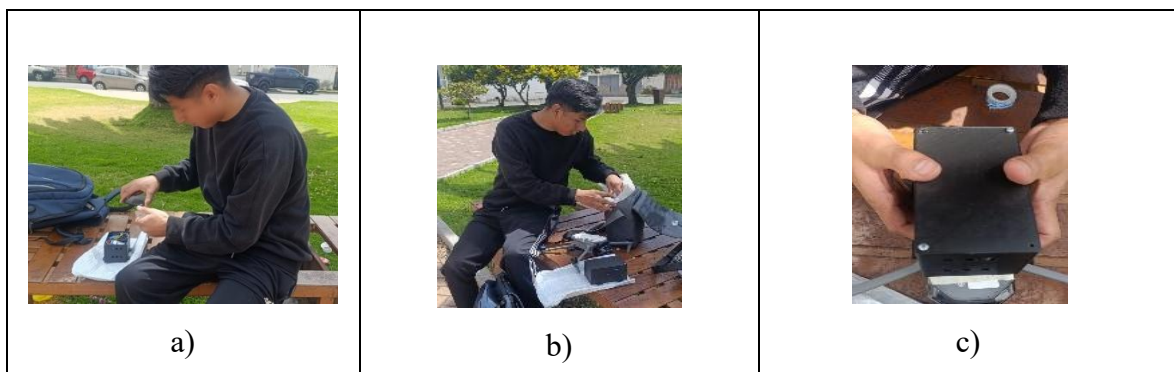


Figura 18. Distribución de los 15 puntos de monitoreo en las parroquias urbanas de Riobamba: (1-3) Lizarzaburu, (4-6) Maldonado, (7-9) Velasco, (10-12) Veloz, (13-15) Yaruquíes.

3.9.2 Verificación del Equipo

Antes de cada vuelo se revisó que todos los componentes del sistema estuvieran en óptimas condiciones. Esto incluyó verificar la carga de las baterías del dron y del dispositivo embebido, revisar la integridad física del dron, comprobar el funcionamiento de los sensores de calidad del aire y confirmar que la comunicación Bluetooth con el ESP32 estuviera disponible.

En la Figura 19 se muestra la secuencia de preparación del equipo realizada en campo antes de cada sesión de medición



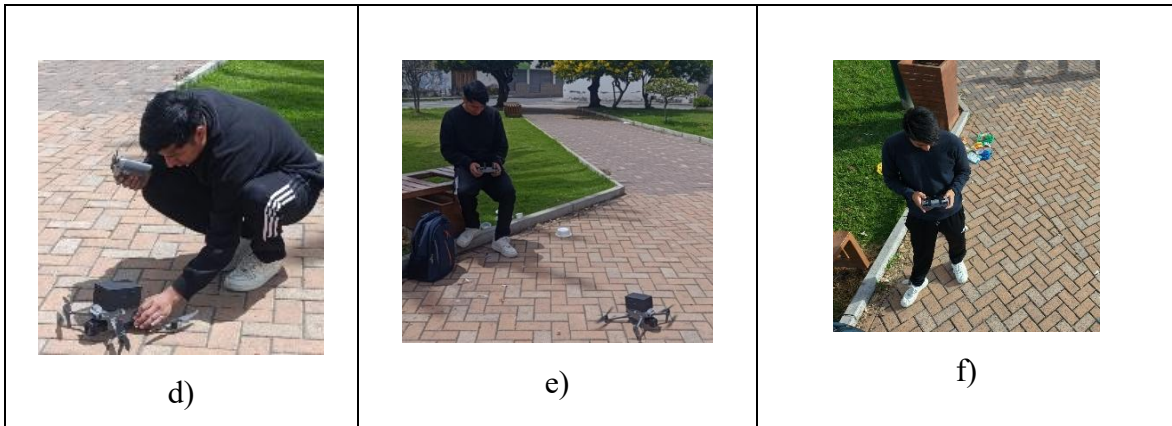


Figura 19. Secuencia de preparación y verificación del sistema de monitoreo en campo: (a) armado del equipo, (b) revisión de componentes, (c) módulo de sensores, (d) posicionamiento del dron, (e) revisión final, (f) inicio de vuelo.

3.9.3 Inicialización del Sistema

Para iniciar el sistema, el ESP32_Estacion necesita recibir la hora actual vía Bluetooth desde un teléfono o computadora. Una vez establecida la conexión, se envía la hora y el sistema comienza a inicializar todos sus componentes: configuración de la UART, arranque del sensor BMP280, precalentamiento de los sensores electroquímicos, verificación de la tarjeta SD y confirmación del intervalo de muestreo de 2 segundos. En la Figura 20 se puede observar todo este proceso, desde la selección del dispositivo Bluetooth hasta la confirmación de inicio de muestreo en la terminal.

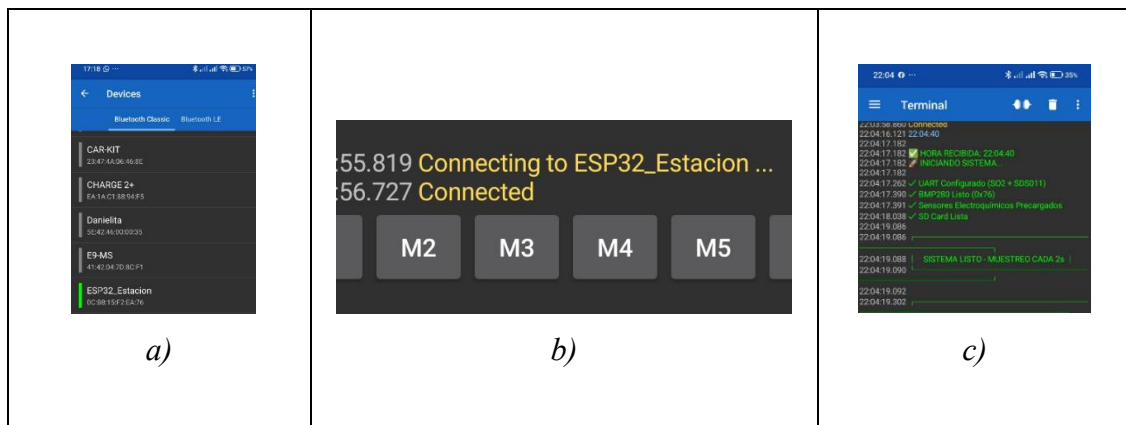


Figura 20. Proceso de inicialización del sistema: (a) selección del dispositivo ESP32_Estacion en el menú Bluetooth, (b) confirmación de conexión establecida con menú de modos de operación, (c) secuencia de arranque en terminal mostrando inicialización de módulos

3.9.4 Definición de Alturas de Vuelo

La contaminación del aire no se distribuye de manera uniforme en altura. Según [38], la concentración de contaminantes varía a lo largo del perfil vertical de la capa límite atmosférica, lo cual justifica que la caracterización de la calidad del aire no se realice únicamente a nivel del suelo sino también en diferentes alturas. Con base en esto, se tomó la decisión de realizar un experimento midiendo en cinco alturas diferentes, tomando como límite máximo los 100 metros, que corresponde a la altura máxima de vuelo permitida. En la Tabla 13 se presentan las cinco alturas seleccionadas con su justificación.

Tabla 13. Alturas de vuelo seleccionadas y justificación de cada nivel de muestreo.

Altura	Justificación
100 m	Altura máxima de vuelo permitida por normativa. Permite caracterizar la zona superior de dispersión de contaminantes.
80 m	Zona de transición donde los contaminantes comienzan a experimentar mayor dilución por efecto del viento.
60 m	Altura representativa de la zona de mezcla activa en entornos urbanos.
40 m	Corresponde aproximadamente a la altura promedio de las edificaciones en el área urbana de Riobamba.
20 m	Altura cercana al nivel de respiración en espacios abiertos, zona de mayor acumulación de contaminantes primarios.

3.9.5 Ejecución de la Campaña de Vuelo

Con las alturas ya definidas y justificadas, se procedió a realizar la toma de datos en los 15 puntos. Para verificar la exactitud de cada altura de muestreo se utilizó el altímetro del dron como referencia. El procedimiento consistió en elevar el dron hasta la altura objetivo, verificar la lectura en la aplicación, mantener posición estacionaria durante la toma de datos y desplazarse al siguiente nivel. En la Figura 21 se puede observar la imagen aérea durante el muestreo y la lectura de altitud registrada en la aplicación de control.

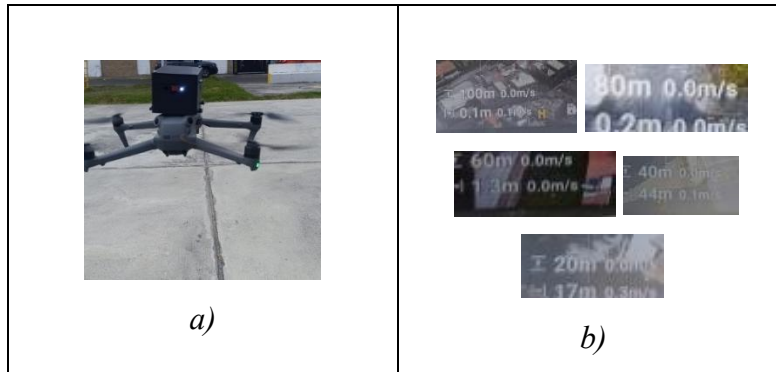


Figura 21. Verificación de alturas de vuelo: (a) imagen aérea durante el muestreo, (b) lectura de altitud en la aplicación de control

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan vistas aéreas de algunos sectores monitoreados, capturadas con la cámara del dron durante los vuelos de medición.

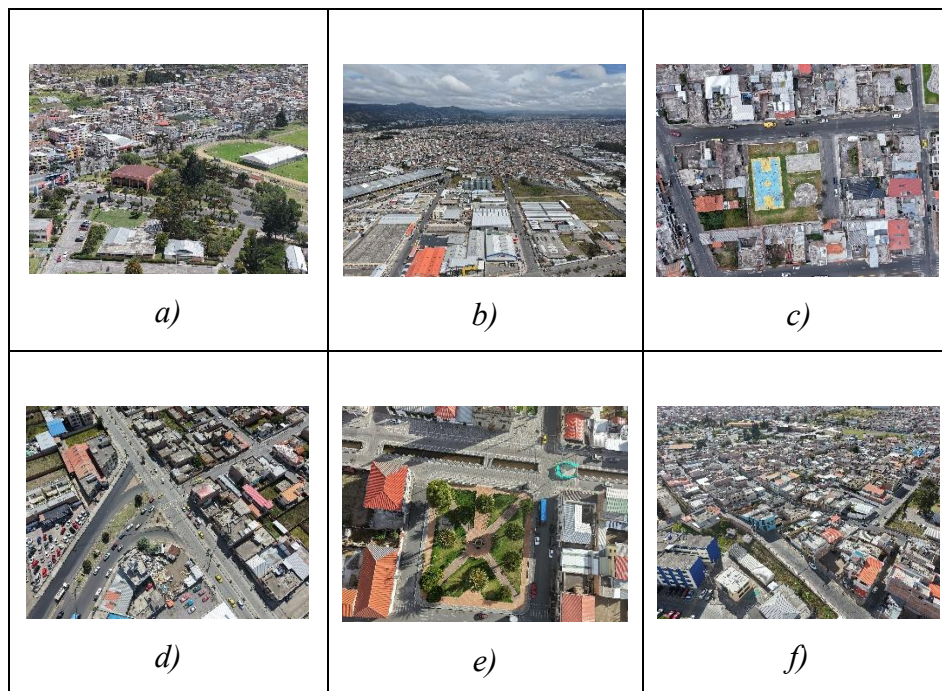


Figura 22. Vistas aéreas de algunos sectores monitoreados: a) ESPOCH – Lizarzaburu, b) Sector Mayorista – Veloz, c) Parque del Diablo – Velasco, d) Sector La Campana – Lizarzaburu, e) Parque Central – Yaruquies, f) UNACH – Maldonado.

3.9.6 Integración y Procesamiento de Datos

Luego de completar la toma de datos en todos los puntos y alturas, se unificaron todos los registros en una sola base de datos para su análisis estadístico en el software IBM SPSS

Statistics. Para facilitar el procesamiento, las variables categóricas fueron codificadas numéricamente de la siguiente manera: parroquias: 1 = Lizarzaburu, 2 = Maldonado, 3 = Veloz, 4 = Velasco, 5 = Yaruquies; alturas de vuelo: 1 = 100 m, 2 = 80 m, 3 = 60 m, 4 = 40 m, 5 = 20 m.

En la Tabla 14. Estructura de la base de datos unificada para el análisis estadístico. se presenta un ejemplo de cómo quedó estructurada la base de datos.

Tabla 14. Estructura de la base de datos unificada para el análisis estadístico.

Parroquia	Altura AGL	IQCA
1	1	22
1	1	26
1	1	26
1	1	23
2	2	26
3	3	27

Códigos: Parroquia: 1=Lizarzaburu, 2=Maldonado, 3=Veloz, 4=Velasco, 5=Yaruquies.

Altura AGL: 1=100m, 2=80m, 3=60m, 4=40m, 5=20m.

CAPITULO IV.

4. RESULTADOS

En la presente sección se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante el sistema sensorizado de monitoreo desarrollado, durante las pruebas ejecutadas en la zona urbana de la ciudad de Riobamba. Se describen los datos recopilados por los diferentes sensores de contaminación atmosférica, los cuales fueron integrados en un índice compuesto denominado Índice de Calidad del Aire (IQCA), variable principal sobre la que se fundamenta el análisis estadístico del presente estudio.

4.1 Análisis comparativo de la calidad de aire las cinco parroquias urbanas

Se realizó un estudio con el fin de entender cómo se comporta el IQCA en la zona urbana de Riobamba, que está conformada por sus cinco parroquias: Lizarzaburu, Maldonado, Velasco, Veloz y Yaruquíes.

4.1.1 Análisis de los datos

Ho: El IQCA en cada una de las parroquias urbanas de Riobamba sigue una distribución normal.

Hi: El IQCA en cada una de las parroquias urbanas de Riobamba no sigue una distribución normal.

Se aplicó la prueba de Kolmogorov-Smirnov debido a que el tamaño muestral en cada parroquia supera los 50 registros. Los resultados se presentan en la Tabla 15, donde se observa que los p-valores son menores a 0,05 en las cinco parroquias, por lo que se rechaza la hipótesis nula. Esto indica que los datos no siguen una distribución normal, razón por la cual se procedió con pruebas no paramétricas para el análisis comparativo.

Tabla 15. P-valor de la prueba de normalidad del IQCA por parroquia.

Parroquia	N.	Estadístico K-S	p-valor
Lizarzaburu	2 208	0.308	0.000
Maldonado	2 975	0.332	0.000
Velasco	3 513	0.169	0.001
Veloz	1 580	0.335	0.000
Yaruquies	2 016	0.259	0.000

4.1.2 Identificación de la parroquia con mayor contaminación

Se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis para verificar si el nivel de contaminación varía según la parroquia, ya que los datos no cumplen el supuesto de normalidad confirmado en la sección anterior.

Ho: Las distribuciones del IQCA en las cinco parroquias urbanas de Riobamba son iguales.

Hi: Al menos un par de distribuciones del IQCA son diferentes.

El estadístico H obtenido fue de 1369,731 con 4 grados de libertad y un p-valor de 0,000, por lo que se rechaza la hipótesis nula. Esto confirma que sí existe diferencia estadísticamente significativa en el IQCA entre las cinco parroquias. En la Tabla 16 se presentan los resultados.

Tabla 16. Prueba de Kruskal-Wallis para el IQCA entre parroquias urbanas.

Estadístico (H)	Grados de Libertad (gl)	p-valor
1369,73	14	0,000

4.1.3 Comparación entre parroquias

Para identificar entre qué parroquias específicas se presentan las diferencias, se aplicó el post-hoc de Dunn con corrección de Bonferroni. Los resultados se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17. Post-hoc de Dunn con corrección de Bonferroni para el IQCA entre parroquias

Sample 1 - Sample 2	Estadístico de prueba	Sig.	Sig. ajustada ³
Velasco - Veloz	-1294,869	,000	,000
Velasco - Yaruquíes	-1890,077	,000	,000
Velasco - Maldonado	2281,290	,000	,000
Velasco - Lizarzaburu	3268,904	,000	,000
Veloz - Yaruquíes	-595,208	<,001	,000
Veloz - Maldonado	986,421	,000	,000
Veloz - Lizarzaburu	1974,036	,000	,000
Yaruquíes - Maldonado	391,213	<,001	,001
Yaruquíes - Lizarzaburu	1378,828	,000	,000
Maldonado - Lizarzaburu	987,614		

Todas las comparaciones entre parroquias resultaron estadísticamente significativas con $p \leq 0,001$, lo que indica que cada parroquia presenta un comportamiento diferente en cuanto a los niveles de IQCA registrados. La única comparación con un valor de significancia ligeramente mayor fue Yaruquíes-Maldonado con $p = 0,001$, que sigue siendo significativa.

Para complementar este análisis, en la Tabla 18, se presentan los estadísticos descriptivos del IQCA por parroquia, los cuales permiten identificar con valores reales de contaminación el comportamiento de cada zona.

Tabla 18. Estadísticos descriptivos del IQCA por parroquia urbana.

Parroquia	N	Media	Mediana	Desv. estándar	Mínimo	Máximo
Lizarzaburu	2 208	30,70	27,00	9,79	20,00	77,00
Maldonado	2 975	28,12	27,00	6,46	20,00	87,00
Velasco	3 513	25,11	24,00	2,91	21,00	48,00
Veloz	1 580	26,28	26,00	3,86	21,00	52,00
Yaruquíes	2 016	26,29	27,00	3,11	19,00	48,00

Lizarzaburu registró la media más alta con 30,70 puntos y la mayor desviación estándar con 9,79, lo que indica que además de tener los valores más altos de contaminación, sus mediciones son las más variables, posiblemente asociado a la alta densidad de tráfico vehicular y actividad urbana de este sector. Maldonado alcanzó el valor máximo más alto con 87 puntos, lo que se asocia a eventos puntuales de contaminación elevada, probablemente relacionados con fuentes móviles o actividades específicas del sector durante el muestreo. Velasco presentó la media más baja con 25,11 puntos y la menor desviación estándar con 2,91, lo que indica que sus mediciones son bajas y estables, confirmándose como la zona con mejores condiciones de calidad del aire. Veloz y Yaruquíes mostraron valores muy similares con 26,28 y 26,29 respectivamente, sin diferencia práctica entre ellas a pesar de que el análisis estadístico confirmó que sí son significativamente diferentes.

4.1.4 Comportamiento de las mediciones por parroquia

En la Figura 23, se presenta el diagrama de cajas del IQCA en función de las cinco parroquias urbanas. Se observa que Lizarzaburu presenta las medianas más altas, mientras que Velasco registra la distribución más baja y compacta. Veloz y Yaruquíes tienen un comportamiento parecido, con medianas similares entre ellas. Maldonado, aunque tiene una mediana intermedia, es la que muestra los valores atípicos más extremos del grupo, con registros que superan los 80 puntos del IQCA, lo que se asocia a eventos puntuales de contaminación elevada. Estos resultados indican que Lizarzaburu concentra los niveles promedio más altos de contaminación del aire en la zona urbana de Riobamba, mientras que Velasco presenta las condiciones más favorables.

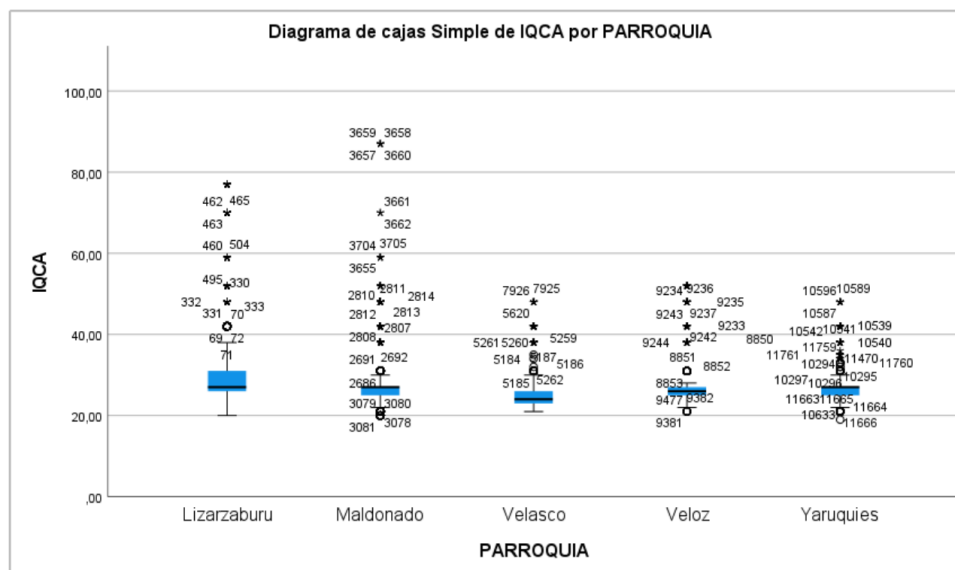


Figura 23. Comportamiento del IQCA por parroquia urbana de Riobamba.

El análisis de clasificación del IQCA mostró que la calidad del aire en la zona urbana de Riobamba se encuentra dentro de los rangos permisibles establecidos por la norma IQCA, ya que el 98.9% de las mediciones fueron clasificadas como óptimas. Solo el 1.1% se ubicó en la categoría bueno según la norma ICQA, principalmente en la parroquia Lizarzaburu, donde el 5.1% de las mediciones recibieron esta clasificación. Este resultado coincide con el análisis Kruskal-Wallis, que señaló a Lizarzaburu como la parroquia con el promedio más alto de IQCA. En cambio, Velasco y Yaruquíes sobresalieron al tener el 100% de sus mediciones en la categoría de óptimo.

4.2 Análisis comparativo de la calidad de aire según la altura de vuelo

4.2.1 Identificación de la altura con mayor concentración de contaminantes

Se realizó un análisis con la finalidad de determinar si la altura de vuelo del sistema sensorizado influye en los niveles de contaminación registrados. Para esto se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis, tomando como variable el IQCA y como factor la altura de vuelo, dado que los datos no cumplen el supuesto de normalidad.

H₀: Las distribuciones del IQCA a las distintas alturas de vuelo son iguales.

H₁: Al menos un par de distribuciones del IQCA a distintas alturas son diferentes.

El estadístico H obtenido fue de 107,031 con 4 grados de libertad y un p-valor de 0,000, por lo que se rechaza la hipótesis nula. Esto significa que sí existe diferencia estadísticamente significativa en el IQCA entre las distintas alturas de vuelo, es decir que la altura a la que vuela el dron sí influye en los niveles de contaminación registrados. En la Tabla 20 se presentan los resultados.

Tabla 19. Prueba de Kruskal-Wallis para el IQCA según altura de vuelo.

Estadístico (H)	Grados de libertad	p- valor
107,031	4	0,000

4.2.2 Comparación entre alturas de vuelo

Para identificar entre qué alturas específicas se presentan las diferencias, se aplicó el post-hoc de Dunn con corrección de Bonferroni. Los resultados se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20. Post-hoc de Dunn con corrección de Bonferroni para el IQCA según altura de vuelo.

Par	Est. de prueba	Sig.	Sig. ajustada
80 m – 20 m	-71,968	0,467	1,000
80 m – 60 m	-402,633	0,001	0,001
80 m – 40 m	-685,671	0,000	0,000
80 m – 100 m	823,670	0,000	0,000
20 m – 60 m	330,665	0,001	0,011
20 m – 40 m	613,703	0,000	0,000
20 m – 100 m	751,703	0,000	0,000
60 m – 40 m	-283,038	0,005	0,051
60 m – 100 m	421,037	0,000	0,000
40 m – 100 m	138,000	0,168	1,000

Se identificaron dos pares sin diferencia significativa: 80 m y 20 m ($p = 1,000$) y 40 m y 100 m ($p = 1,000$), lo que indica que estos niveles tienen un comportamiento similar en cuanto al IQCA registrado. La comparación 60 m y 40 m también resultó no significativa con $p = 0,051$. El resto de las comparaciones resultaron significativas con $p \leq 0,011$.

En la Tabla 21 se presentan los estadísticos descriptivos del IQCA por altura de vuelo, los cuales permiten identificar con valores reales de contaminación el comportamiento de cada nivel.

Tabla 21. Estadísticos descriptivos del IQCA por altura de vuelo.

Altura	Media	Mediana	Desv. estándar	Mínimo	Máximo
100 m	26,55	27,00	3,15	21,00	42,00
80 m	26,72	26,00	6,28	20,00	77,00
60 m	27,08	26,00	5,92	19,00	77,00
40 m	27,82	26,00	6,56	20,00	87,00
20 m	27,78	26,00	7,54	21,00	77,00

Las alturas de 40 m y 20 m registraron las medias más altas con 27,82 y 27,78 puntos respectivamente, confirmando que a menor altura mayor concentración de contaminantes. Las alturas de 100 m y 80 m presentaron las medias más bajas con 26,55 y 26,72, lo que es coherente con la dispersión natural de contaminantes a mayor altura. Destaca que 40 m registró el valor máximo más alto con 87 puntos, asociado a eventos puntuales de contaminación elevada cerca de la superficie. La mayor desviación estándar se registró en 20 m con 7,54, lo que indica que a esta altura las mediciones son más variables, posiblemente por la influencia directa de fuentes de contaminación a nivel del suelo.

4.2.3 Comportamiento de las mediciones por altura de vuelo

En la Figura 24 se presenta el diagrama de cajas del IQCA según la altura de vuelo. Se evidencia que a medida que disminuye la altura de vuelo, los valores medianos del IQCA tienden a aumentar, siendo las alturas de 20m y 40m las que registran medianas más elevadas y mayor dispersión. Este comportamiento es coherente con el principio físico de que los contaminantes atmosféricos se concentran en las capas más cercanas a la superficie terrestre, siendo las mediciones realizadas a mayor altura más representativas de condiciones de aire con menor concentración de contaminantes.

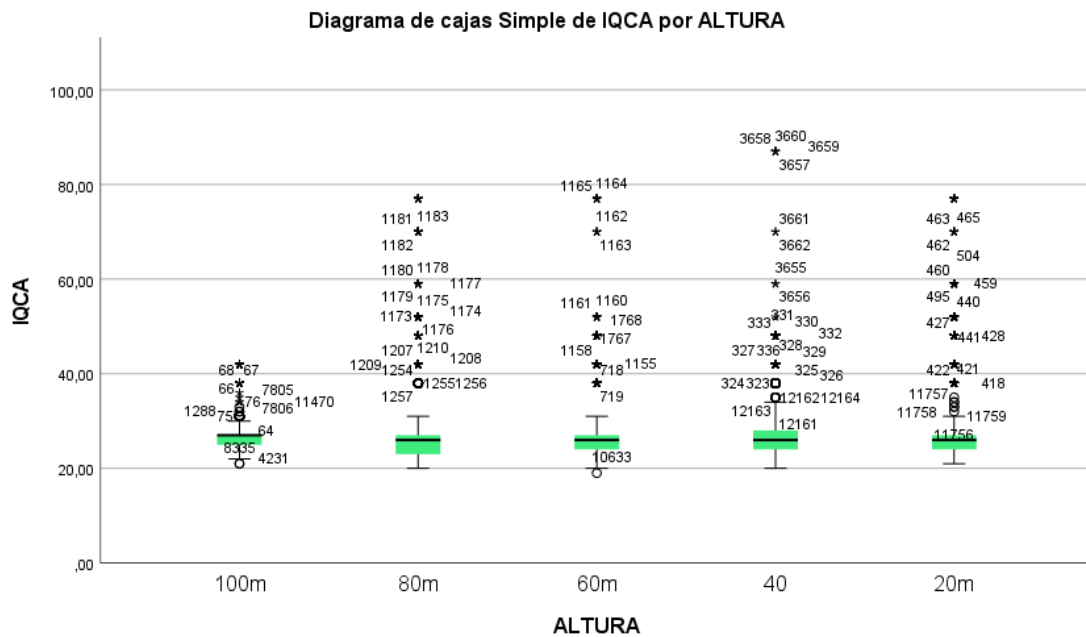


Figura 24. Comportamiento del IQCA según altura de vuelo del sistema sensorizado.

En todas las alturas se identificaron valores atípicos, representados con asteriscos y círculos en la Figura 24. Los valores más extremos se concentran en las alturas de 40 m y 20 m, con registros que superan los 80 puntos del IQCA, lo que se asocia a eventos puntuales de contaminación elevada durante el muestreo. A 100 m y 80 m los valores atípicos son menos frecuentes y de menor magnitud, lo que confirma que a mayor altura la calidad del aire es más estable y uniforme.

CAPÍTULO V.

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- De la revisión bibliográfica de los últimos cinco años se identificaron PM2.5, PM10, NO₂ y SO₂ como contaminantes prioritarios para monitorear en Riobamba, ya que cuentan con límites establecidos en la norma NECA y efectos documentados en la salud. El CO y O₃ fueron descartados debido a las limitaciones técnicas de los sensores en las condiciones climáticas de la ciudad.
- Se desarrolló e implementó un sistema sensorizado portátil basado en el microcontrolador ESP32, capaz de medir los contaminantes seleccionados y calcular el IQCA en tiempo real. El proceso de calibración mediante regresión lineal permitió validar la confiabilidad del sistema. Se recolectaron 12 292 registros en los 15 puntos de monitoreo distribuidos en las cinco parroquias urbanas a cinco alturas de vuelo, de los cuales el 98,9% registraron valores por debajo de los límites de la norma NECA.
- Mediante la prueba de Kruskal-Wallis y el post-hoc de Dunn con corrección de Bonferroni se confirmaron diferencias significativas entre parroquias y alturas de vuelo. Lizarzaburu registró el IQCA promedio más alto con 30,70 y Velasco el más bajo con 25,11. A menor altura de vuelo se registraron mayores concentraciones de contaminantes, lo que es coherente con su acumulación cerca de la superficie y confirma que el uso del dron como plataforma de monitoreo aporta información que una estación fija no puede obtener.

5.2 Recomendaciones

- Al trabajar con sensores electroquímicos para medir CO y O₃, es necesario considerar que pueden arrojar lecturas inexactas ante la presencia de otros gases en el ambiente o en condiciones de bajas temperaturas. Para trabajos futuros se recomienda validar estos módulos en ambientes controlados o implementar filtros físicos y de software para reducir estas interferencias.

- Aunque los niveles de contaminación registrados no representan un escenario de alarma, Lizarzaburu presentó los valores más altos del estudio, posiblemente asociados al volumen de tráfico vehicular del sector. Por eso resulta oportuno impulsar campañas de concientización ciudadana que inviten a reducir el uso de vehículos particulares en horas pico o trayectos cortos.
- Para que los datos recopilados tengan un impacto real en la comunidad, se recomienda desarrollar una plataforma web accesible con un mapa interactivo por parroquias, que permita tanto a las autoridades de Riobamba como a los ciudadanos consultar la calidad del aire de forma continua y transparente.

CAPÍTULO VI.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Organización Mundial de la Salud., «Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud.,» 2024. [En línea]. Available: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health). [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [2] S. Kotthaus, J. A. Bravo-Aranda, M. Collaud Coen, J. L. Guerrero-Rascado y others, «Atmospheric boundary layer height from ground-based remote sensing: a review of capabilities and limitations,» *Atmospheric Measurement Techniques*, vol. 16, p. 433–479, 2023.
- [3] F. Concas, J. Mineraud, E. Lagerspetz, S. Varjonen y others, «Low-Cost Outdoor Air Quality Monitoring and Sensor Calibration: A Survey and Critical Analysis,» *ACM Transactions on Sensor Networks*, vol. 17, p. 20, 2021.
- [4] U. B. B. B. R. M. P. K. P. M. Y. M. M. & S. P. Schilt, «Low-cost sensor node for air quality monitoring: Field tests and validation of particulate matter measurements.,» *Sensors*, vol. 23, n° 2, 2023.
- [5] I. L. Montero López, M. F. Vinueza Veloz, G. A. Castillo López, D. S. Ruano Ipiiales y N. Martín Barceló, «Afecciones respiratorias y contaminación ambiental en Riobamba, Ecuador,» *Correo Científico Médico (CCM)*, vol. 24, 2020.
- [6] «La contaminación del aire en Ecuador supera 30% el límite de OMS.,» *Revista MINERÍA.*, 18 Diciembre 2023.
- [7] N. D. F. R. S. P. V. M. L. U. F. B. B. D. & B. A. Castell, «Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?,» *Environment International*, n° 293-302, p. 99.
- [8] S. A. Meo y others, «Environmental pollutants particulate matter (PM2.5, PM10), Carbon Monoxide (CO), Nitrogen dioxide (NO2), Sulfur dioxide (SO2), and Ozone (O3) impact on lung functions,» *Journal of King Saud University - Science*, vol. 36, p. 103277, 2024.
- [9] Y. Zhang, Y. Chen, X. Wang y M. Li, «Smart Multi-Sensor Calibration of Low-Cost Particulate Matter Monitors,» *Sensors*, vol. 23, p. 3776, 2023.

- [10] Ministerio del Ambiente del Ecuador, «Norma de Calidad del Aire Ambiente (NECA). Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria (TULSMA), Libro VI, Anexo 4,» Quito, 2011.
- [11] T. F. Villa, F. Gonzalez, B. Miljjevic, Z. D. Ristovski y L. Morawska, «An Overview of Small Unmanned Aerial Vehicles for Air Quality Measurements: Present Applications and Future Prospectives,» *Sensors*, vol. 16, p. 1072, 2016.
- [12] L. Canché, L. San-Pedro, B. Ali y M. Rivero, «The atmospheric boundary layer: a review of current challenges and a new generation of machine learning techniques,» *Artificial Intelligence Review*, 2024.
- [13] Q. Li, Y. Yang, Y. Wang, J. Li y others, «The impacts of the atmospheric boundary layer on regional haze in North China,» *npj Climate and Atmospheric Science*, vol. 4, nº 9, 2023.
- [14] Secretaría de Ambiente del Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, «Informe de la Calidad del Aire de Quito 2013. Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ),» Quito, 2014.
- [15] Secretaría de Ambiente del Distrito Metropolitano de Quito, *Índice Quiteño de la Calidad del Aire (IQCA)*, s.f..
- [16] L. Y. Carrillo Amado, «Diseño e implementación de un sistema de adquisición de datos meteorológicos con Arduino,» 2020.
- [17] M. A. Morales y J. R. Torres, «Dispositivo para medir contaminación emitida por fuentes fijas,» *Revista Tecnológica*, vol. 15, p. 45–52, 2019.
- [18] World Health Organization, *WHO unveils updated global database of air quality standards*, 2025.
- [19] Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica de Ecuador, *Controlar la contaminación ambiental contribuye a mejorar la calidad de vida de la población*, 2024.
- [20] California Air Resources Board, *Inhalable Particulate Matter and Health (PM2.5 and PM10)*, 2024.
- [21] World Health Organization, WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, Geneva: World Health Organization, 2021.

- [22] P. Sicard, E. Agathokleous, S. C. Anenberg, A. De Marco, E. Paoletti y V. Calatayud, «Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective,» *Science of The Total Environment*, vol. 858, p. 160064, 2023.
- [23] J. S. Ji, L. Liu, J. Zhang y others, «NO₂ and PM_{2.5} air pollution co-exposure and temperature effect modification on pre-mature mortality in advanced age: a longitudinal cohort study in China,» *Environmental Health*, vol. 21, p. 97, 2022.
- [24] U.S. Environmental Protection Agency, «Integrated Science Assessment for Carbon Monoxide,» Research Triangle Park, NC, 2011.
- [25] U.S. Environmental Protection Agency, *Overview of Ozone (O₃) Air Quality in the United States*, 2024.
- [26] P. Orellano, J. Reynoso y N. Quaranta, «Exposición a corto plazo al dióxido de azufre (SO₂) y mortalidad por todas las causas y respiratoria: una revisión sistemática y un metanálisis.,» *Environment International*, pp. 1-5, 30 Enero 2021.
- [27] Y. R. C. Amado, «Sistema de Adquisición de Datos Meteorológicos para la Medición de la Calidad de Aire a través de Arduino,» Pamplona, Norte de Santander, 2020.
- [28] J. C. B. Bustamante, A. B. Sánchez y L. A. C. Madrid, *Diseño de sistema de medición de calidad de aire en espacio con fuentes fijas*, Medellín, 2022.
- [29] S. Pochwała, S. Anweiler, A. Deptuła y J. Augustyn, «Ecological Unmanned Aerial Vehicle Prototype with an Electric Drive and the Possibility of Continuous Air Quality Monitoring,» *Energies*, vol. 15, p. 765, 2022.
- [30] A. Samad, J. Kieser, I. Chourdakis y U. Vogt, «Developing a Cloud-Based Air Quality Monitoring Platform Using Low-Cost Sensors,» *Sensors*, vol. 24, p. 945, 2024.
- [31] J. González y others, «Electrochemical gas sensing module combined with Unmanned Aerial Vehicles for air quality monitoring,» *Sensors and Actuators B: Chemical*, vol. 363, p. 131815, 2022.
- [32] «Concept of Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for 3D Investigation of Air Quality in the Atmosphere—Example of Measurements Near a Roadside,» *Atmosphere*, vol. 13, p. 663, 2022.
- [33] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), *Mapa de parroquias urbanas del cantón Riobamba*, Riobamba, Ecuador: Instituto Nacional de Estadística y Censos, 2001.

- [34] U.S. Environmental Protection Agency, «Technical Assistance Document for the Reporting of Daily Air Quality – the Air Quality Index (AQI),» Research Triangle Park, NC, 2024.
- [35] P. Han, H. Mei, D. Liu, N. Zeng, X. Tang, Y. Wang y Y. Pan, «Calibrations of Low-Cost Air Pollution Monitoring Sensors for CO, NO₂, O₃, and SO₂,» *Sensors*, vol. 21, p. 256, 2021.
- [36] P. Arroyo, J. Gómez-Suárez, J. I. Suárez y J. Lozano, «Low-Cost Air Quality Measurement System Based on Electrochemical and PM Sensors with Cloud Connection,» *Sensors*, vol. 21, p. 6228, 2021.
- [37] A. L. y. P. Edwards, «Validate personal air-pollution sensors,» *Nature*, vol. 535, n° 7610, p. 29–31, 07 07 2016.
- [38] A. Kaszewski y others, «Ultra-Light Airborne Measurement System for Investigation of Urban Boundary Layer Dynamics,» *Sensors*, 2021.
- [39] M. J. Carliño, F. O. Segura y J. C. Iglesias, «5.-Contaminación ambiental y su influencia en la salud,» *ReNaCientE-Revista Nacional Científica Estudiantil-UPEL-IPB*, vol. 2, p. 75–90, 2021.
- [40] R. Ramírez Naranjo, «Contaminación atmosférica por material particulado en un territorio urbano y de montaña. Caso de estudio Valle de Aburrá, Colombia,» 2023.
- [41] G. F. R. Barros, *Diseño de sistema de monitoreo de calidad de aire en entornos industriales utilizando sensores de bajo costo con comunicación ESP-Mesh*, Guayaquil, Ecuador, 2023.
- [42] T. Boris, «Ingeniería Ambiental,» 3 Marzo 2021. [En línea]. Available: https://ingenieriaambiental.net/medicion-de-la-calidad-del-aire/#google_vignette. [Último acceso: 23 Enero 2026].
- [43] Comisión Ambiental de la Megalópolis, México, «Gobierno de México,» 24 Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.gob.mx/comisionambiental/articulos/particulas-suspendidas-caracteristicas-y-principales-fuentes?idiom=es>. [Último acceso: 25 Enero 2026].
- [44] Organización Panamericana de la Salud. (2024). , «Calidad del aire.,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.paho.org/es/temas/calidad-aire>. [Último acceso: 15 Enero 2026].

- [45] Ministerio de Salud Pública del Ecuador. , «Municipios saludables respiran vida.,» [En línea]. Available: <https://www.salud.gob.ec/municipios-saludables-respiran-vida/>. [Último acceso: 15 Enero 2026].
- [46] I. Gustin, «Globos atados de EONEF: monitoreo de la calidad del aire, conservación de la vida silvestre y detección de incendios forestales,» 12 February 2023. [En línea]. Available: <https://lampoonmagazine.com/article/2023/02/12/eonefs-tethered-balloons-air-quality-monitoring-wildlife-conservation-and-forest-fire-detection/>.
- [47] I. Panchana, «Evaluación de la calidad del aire urbano mediante sensores de bajo costo en ciudades intermedias.,» *Pulso Científico*, vol. 2, pp. 14-30, 2024.
- [48] R. S. S. Garcia, «SIMULACIÓN DE LA CAPA LÍMITE ATMOSFÉRICA NEUTRALMENTE ESTABLE,» 2020.

CAPÍTULO VII.

7. ANEXOS

- Código de programación completo del sistema sensorizado.

```
#include <HardwareSerial.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_BMP280.h>
#include "SD.h"
#include "SPI.h"
#include "BluetoothSerial.h"

#define RX_PIN_S02 16
#define TX_PIN_S02 17
#define RX_PIN_S03 25
#define TX_PIN_S03 26
#define PIN_N02 32
#define PIN_C0 33
#define PIN_Q3 36
#define SD_CS 5

HardwareSerial SerialS02(2);
HardwareSerial SerialS03(1);
Adafruit_BMP280 bmp;
SPIClass spi = SPIClass(VSPI);
BluetoothSerial SerialBT;

byte cmdSD2[] = {0xFF, 0x01, 0x86, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x79};
float f_n02 = 0, f_c0 = 0, f_q3 = 0;
float suavidad = 0.30;
float ganancia = 10.0;

unsigned long tiempoInicio = 0;
int hora_inicial = 0, minuto_inicial = 0, segundo_inicial = 0;
bool sistemaIniciado = false;

void printDual(String t) { Serial.print(t); SerialBT.print(t); }
void printlnDual(String t) { Serial.println(t); SerialBT.println(t); }
```

```
String obtenerFechaHora() {
    unsigned long seg = (millis() - tiempoInicio) / 1000;
    int s = (segundo_inicial + seg) % 60;
    int m = (minuto_inicial + (segundo_inicial + seg) / 60) % 60;
    int h = (hora_inicial + (minuto_inicial + (segundo_inicial + seg) / 60) / 60) % 24;
    char buf[9]; sprintf(buf, "%02d:%02d:%02d", h, m, s);
    return String(buf);
}
```

```
float cal_PM25(float r){ float v = 0.677f * r + 9.4467f; return v<0?0:v; }
float cal_PM10(float r){ float v = -0.7786f* r + 27.859f; return v<0?0:v; }
float cal_NO2(float V) { float v = -28.861f* V + 42.3633f; return v<0?0:v; }
float cal_SO2(float p) { return p * 1000.0f; }
```

```
int sub_PM25(float c){
    float v=(c<=50)?2.0f*c+50.0f; return(int)(v<0?0:v+0.5f);
}
int sub_PM10(float c){
    float v; if(c<=100)v=c; else if(c<=400)v=0.6667f*c+33.333f; else v=c-100.0f;
    return(int)(v<0?0:v+0.5f);
}
int sub_NO2(float ppb){
    float c=ppb*1.88f,v;
    if(c<=200)v=0.5f*c; else if(c<=1000)v=0.125f*c+75.0f; else v=0.1f*c+100.0f;
    return(int)(v<0?0:v+0.5f);
}
int sub_SO2(float ppb){
    float c=ppb*2.62f,v;
    if(c<=62.5f)v=0.8f*c; else if(c<=125)v=1.333f*c-66.667f; else v=0.125f*c+175.0f;
    return(int)(v<0?0:v+0.5f);
}
int calculQCA(float pm25,float pm10,float no2,float so2){
    int a=sub_PM25(pm25),b=sub_PM10(pm10),c=sub_NO2(no2),d=sub_SO2(so2);
    int mx=a; if(b>mx)mx=b; if(c>mx)mx=c; if(d>mx)mx=d; return mx;
}
String catIQCA(int i){
    if(i<= 50)return "Optimo"; if(i<=100)return "Bueno";
    if(i<=200)return "Precaucion"; if(i<=300)return "Alerta";
    if(i<=400)return "Alarma"; return "Emergencia";
}
```



```

        horaRecibida = "";
    }
} else {
    printlnDual(" ✘ Formato incorrecto. Use: HH:MM:SS");
    horaRecibida = "";
}
}
} else {
    horaRecibida += c;
}
}
delay(100);
}
}

```

```

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    SerialBT.begin("ESP32_Estacion");
    delay(1000);

    esperarHoraBluetooth();

    // UART sensores
    SerialSD2.begin(9600, SERIAL_8N1, RX_PIN_SD2, TX_PIN_SD2);
    SerialSDS.begin(9600, SERIAL_8N1, RX_PIN_SDS, TX_PIN_SDS);
    printlnDual(" ✓ UART Configurado (SD2 + SDS011)");

    // BMP280 — igual que el original, prueba 0x76 y 0x77
    Wire.begin(21, 22);
    if (!bmp.begin(0x76)) {
        if (!bmp.begin(0x77)) {
            printlnDual(" ✘ ERROR: BMP280 no detectado!");
        } else {
            printlnDual(" ✓ BMP280 Listo (0x77)");
        }
    } else {
        printlnDual(" ✓ BMP280 Listo (0x76)");
    }

    // ADC

```

```

analogReadResolution(12);
analogSetAttenuation(ADC_11db);
f_no2 = analogRead(PIN_NO2);
f_co = analogRead(PIN_CO);
f_o3 = analogRead(PIN_O3);
printlnDual("✓ Sensores Electroquímicos Precargados");

// SD
spi.begin(18, 19, 23, SD_CS);
if (!SD.begin(SD_CS, spi, 400000)) {
  printlnDual("✗ ERROR: SD Card no inicializada!");
} else {
  printlnDual("✓ SD Card Lista");
  if (SD.exists("/datos.csv")) {
    File f = SD.open("/datos.csv", FILE_WRITE);
    f.println("Hora,Temp(C),Pres(hPa),Alt(m),"
      "SO2_raw(ppm),PM25_raw,PM10_raw,NO2_raw(V),CO(V),O3(V),"
      "SO2_cal(ppb),PM25_cal,PM10_cal,NO2_cal(ppb),"
      "IQCA,Categoria,Dominante");
    f.close();
    printlnDual("✓ Archivo datos.csv creado");
  }
}

delay(1000);
printlnDual("\n _____
_____ ");
printlnDual(" | SISTEMA LISTO | ");
printlnDual(" _____
_____ \n");
}

void loop() {
  String horaActual = obtenerFechaHora();

  // _____ LEER _____ SENSORES
  _____
  float temp = bmp.readTemperature();
  float pres = bmp.readPressure() / 100.0;
  float altitud = bmp.readAltitude(1013.25);

```

```

// SO2
float so2 = -1.0;
while(SerialSO2.available()) SerialSO2.read();
SerialSO2.write(cmdSO2, 9);
delay(200);
if (SerialSO2.available() >= 9) {
  byte buf[9]; SerialSO2.readBytes(buf, 9);
  if (buf[0]==0xFF && buf[1]==0x86)
    so2 = ((buf[2]<<8)|buf[3]) / 1000.0;
}

// PM
float pm25=-1.0, pm10=-1.0;
if (SerialSDS.available() >= 10) {
  while (SerialSDS.available()>0 && SerialSDS.peek()!=0xAA) SerialSDS.read();
  if (SerialSDS.available()>=10 &&
      SerialSDS.read()==0xAA && SerialSDS.read()==0xC0) {
    byte b[8]; SerialSDS.readBytes(b, 8);
    pm25 = ((b[1]<<8)|b[0]) / 10.0;
    pm10 = ((b[3]<<8)|b[2]) / 10.0;
  }
}

// Electroquímicos
int raw_no2=analogRead(PIN_NO2), raw_co=analogRead(PIN_CO), raw_o3=analogRead(PIN_O3);
f_no2 = (raw_no2*suavidad) + (f_no2*(1.0-suavidad));
f_co = (raw_co *suavidad) + (f_co *(1.0-suavidad));
f_o3 = (raw_o3 *suavidad) + (f_o3 *(1.0-suavidad));
float v_no2 = (f_no2/4095.0)*3.3*2.0;
float v_co = (f_co /4095.0)*3.3*2.0*ganancia;
float v_o3 = (f_o3 /4095.0)*3.3*1.0*ganancia;

// — CALIBRACIÓN
float pm25_cal = (pm25>=0) ? cal_PM25(pm25) : -1;
float pm10_cal = (pm10>=0) ? cal_PM10(pm10) : -1;
float no2_cal = cal_NO2(v_no2);
float so2_cal = (so2 >=0) ? cal_SO2(so2) : -1;

// — IQCA
int iqca = -1;
String cat_str= "---", dom_str= "---";

```

```

if (pm25_cal>=0 && pm10_cal>=0 && so2_cal>=0) {
    iqca = calcIQCA(pm25_cal, pm10_cal, no2_cal, so2_cal);
    cat_str = catIQCA(iqca);
    dom_str = domIQCA(pm25_cal, pm10_cal, no2_cal, so2_cal);
}

printlnDual(" _____
_____ ");

printlnDual(" | 🕒 "); printlnDual(horaActual);
printlnDual(" | 🌡️ Temp: "); printlnDual(String(temp,1)); printlnDual(" °C");
printlnDual(" | 📏 Pres: "); printlnDual(String(pres,1)); printlnDual(" hPa");
printlnDual(" | 🏠 Alt: "); printlnDual(String(altitud,1)); printlnDual(" m");
printlnDual(" | --- CALIBRADO ---");
printlnDual(" | 🌬️ SO2: "); printlnDual(so2_cal >=0?String(so2_cal, 2):"---"); printlnDual(" ppb");
printlnDual(" | 🌀 PM2.5: "); printlnDual(pm25_cal>=0?String(pm25_cal,2):"---"); printlnDual(" ug/m3");
printlnDual(" | 🌀 PM10: "); printlnDual(pm10_cal>=0?String(pm10_cal,2):"---"); printlnDual(" ug/m3");
printlnDual(" | ⚡ NO2: "); printlnDual(String(no2_cal,3)); printlnDual(" ppb");
printlnDual(" | ⚡ CO: "); printlnDual(String(v_co,3)); printlnDual(" V");
printlnDual(" | ⚡ O3: "); printlnDual(String(v_o3,3)); printlnDual(" V");
printlnDual(" | --- IQCA ---");
if (iqca>=0) {
    printlnDual(" | 🇨🇷 IQCA: "); printlnDual(String(iqca)); printlnDual(" - ");
    printlnDual(cat_str); printlnDual(" ("); printlnDual(dom_str); printlnDual(")");
} else {
    printlnDual(" | 🇨🇷 IQCA: esperando datos PM...");
}
printlnDual(" _____
_____ \n");

```

```

File dataFile = SD.open("/datos.csv", FILE_APPEND);
if (dataFile) {
    dataFile.print(horaActual);           dataFile.print(",");
    dataFile.print(temp,2);              dataFile.print(",");
    dataFile.print(pres,2);               dataFile.print(",");
    dataFile.print(altitud,1);           dataFile.print(",");
    dataFile.print(so2 >=0?String(so2, 3):""); dataFile.print(",");
    dataFile.print(pm25>=0?String(pm25,1):""); dataFile.print(",");
}

```

```

dataFile.print(pm10>=0?String(pm10,1):"");      dataFile.print(",");
dataFile.print(v_no2,3);                      dataFile.print(",");
dataFile.print(v_co,3);                      dataFile.print(",");
dataFile.print(v_o3,3);                      dataFile.print(",");
dataFile.print(so2_cal >=0?String(so2_cal, 2):"");  dataFile.print(",");
dataFile.print(pm25_cal>=0?String(pm25_cal,2):"");  dataFile.print(",");
dataFile.print(pm10_cal>=0?String(pm10_cal,2):"");  dataFile.print(",");
dataFile.print(no2_cal,2);                    dataFile.print(",");
if (iqca>=0) {
  dataFile.print(iqca); dataFile.print(",");
  dataFile.print(cat_str); dataFile.print(",");
  dataFile.println(dom_str);
} else {
  dataFile.println(" ...");
}
dataFile.close();
}

delay(2000);
}

```