UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

INSTITUTO DE INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA

“Vehículo aéreo no tripulado para monitoreo remoto y en tiempo real de material particulado con rutinas de mapeo programables”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:

Doctor en Ciencias

PRESENTA:

Eladio Altamira Colado

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Daniel Cuevas González

CODIRECTOR DE TESIS:

Dr. Marco Antonio Reyna Carranza

INSTITUTO DE INGENIERÍA

Mexicali, Baja California Marzo del 2026

DEDICATORIA

A Dios, fuente de toda sabiduría, a Él sea toda la gloria por haberme permitido culminar esta obra, reconociéndome siempre como un instrumento Suyo.

A mis padres, quienes, con amor, esfuerzo y sacrificio, sembraron en mí la semilla que hoy da fruto.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, por apoyarme durante toda mi trayectoria académica, permitirme el privilegio de estudiar, y transmitirme sus valores.

Al director de esta tesis, el Dr. Daniel Cuevas González, y al codirector de esta tesis, el Dr. Marco Antonio Reyna Carranza, quienes sirvieron de guía para la realización y mejoras de este trabajo.

A mis compañeros Aarón, Óscar y Juan, por su crucial disposición y apoyo durante todo momento, dedicándome muchas horas de su valioso tiempo, y por ser un gran grupo de trabajo.

A mis docentes, por su disposición dentro y fuera del aula a siempre apoyarme con sus conocimientos y mis inquietudes.

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California por permitirme ingresar al programa de Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería (MYDCI).

Al Centro Deportivo de UABC por permitir el uso de sus instalaciones para la realización de los experimentos de este proyecto de investigación.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico brindado para permitirme realizar mis estudios de posgrado.

RESUMEN

La mala calidad del aire es una de las principales problemáticas ambientales y amenaza a la salud pública a nivel mundial. La exposición prolongada a aire de mala calidad puede causar enfermedades respiratorias, enfermedades cardiovasculares, e incluso la muerte prematura (Chen & Hoek, 2020; Wyzga & Rohr, 2015).

Para salvaguardar a la población, se monitorea constantemente la calidad del aire utilizando estaciones de monitoreo ambiental fijas para informar sobre los riesgos de permanecer al aire libre durante ciertos periodos del día. Sin embargo, el uso de estaciones fijas limita la resolución espacial y con ello la precisión de la información, además de requerir una alta densidad de puntos de muestreo para realizar un análisis preciso (Jumaah et al., 2021).

Se han utilizado vehículos terrestres como taxis y autobuses de ruta para conocer la calidad del aire en distintas ubicaciones utilizando un solo sensor (Apte et al., 2017). También se ha evaluado utilizar vehículos aéreos no tripulados como portadores de sensores de calidad del aire, pero estos presentan ciertas limitaciones que deben de ser tomadas en cuenta al darles a dichos vehículos esta aplicación, siendo la más importante la variación que produce la turbulencia aérea en las mediciones de material particulado (T. Villa et al., 2016).

En este trabajo se ha desarrollado un sistema basado en un vehículo aéreo no tripulado integrado con un sensor de calidad del aire con conexión a internet para comunicarse con una estación terrestre de manera remota. El vehículo además integra un mecanismo que permite distanciar el sensor de material particulado del dron para realizar mediciones válidas.

Los resultados muestran que el vehículo cuenta con un tiempo promedio de vuelo de 14 minutos y 14.57 segundos (IC95% [14 min 5.45 s, 14 min 23.68 s]) y una distancia de vuelo promedio de 3983.65 metros (IC95% [3941.95, 4025.36]) y se controla correctamente desde una estación terrestre por medio de internet. El vehículo tiene un error promedio de posicionamiento de 1.55 m (IC95% [1.23 m , 1.88 m]) al ser controlado por medio de coordenadas geográficas utilizando el módulo de sistema de posicionamiento global y su posición oscila en un radio de 0.7825 metros al estar suspendido en el aire.

El error en las mediciones de material particulado cuando el sensor se encuentra junto al dron (de 0 a 2 metros) es muy elevado (MAAPE = 1.51) y disminuye drásticamente a partir de una distancia de 3 metros entre el sensor y el dron (MAAPE = 0.22), alcanzando el menor error a partir de 7 metros (MAAPE = 0.02).

El sistema consume en promedio 1.09 megabytes de datos celulares cada segundo, y al estar suspendido en el aire oscila en un radio de 0.39125 metros en modo de vuelo manual y 0.6175 metros en modo de vuelo guiado. Además, el sistema detecta, almacena, y envía en tiempo real a la estación terrestre datos de concentración de calidad del aire.

Palabras clave —**Monitoreo ambiental, drones ambientales, material particulado, estela de flujo de rotores.**

ABSTRACT

Atmospheric pollution is one of the major environmental issues that threaten worldwide public health. Long-term exposure to polluted air can cause respiratory diseases, cardiovascular diseases and premature death (Chen & Hoek, 2020; Wyzga & Rohr, 2015).

To safeguard vulnerable populations, air quality is being constantly monitored using fixed environmental monitoring stations to inform about the risks of outdoors activities during certain times of the day. However, monitoring air quality using fixed monitoring stations limits spatial resolution of the air pollutants concentration data, which makes it necessary to use multiple stations to gather an acceptable spatial resolution (Jumaah et al., 2021).

Air quality sensors have been mounted on terrestrial vehicles such as route taxis and buses to measure the concentration of air pollutants on multiple locations using a single sensor (Apte et al., 2017). It has also been aimed at mounting air quality sensors on unmanned aerial vehicles (UAVs), however, UAVs present certain limitations that must be considered when using them on air monitoring applications, being the rotor downwash affecting particulate matter measurements one the most important (T. Villa et al., 2016).

During the development of this work, a UAV prototype mounted with an air quality sensor, as well as with constant internet connectivity to communicate remotely with a ground station. Additionally, the prototype includes a mechanism to distance the PM sensor from the UAV to obtain valid PM measurements.

The results of this work show that the prototype flies properly during a maximum average of 14 minutes and 14.57 seconds (CI95% [14 min 5.45 s, 14 min 23.68 s]) and a maximum average distance of 3983.65 meters (CI95% [3941.95, 4025.36]) and is correctly remotely controlled from a Ground Control Station (GCS) through internet. The accuracy error of the GPS-based position control of the prototype is on average 1.55 meters (CI95% [1.23 m , 1.88 m]) while being remotely controlled through geographic coordinates using the global position system and its position oscillates in a radio of 0.7825 meters while hovering.

PM measurements variability when the sensor is located close to the UAV (0 to 2 meters) is resulted in high mean arctangent absolute percentage error (MAAPE) (MAAPE = 1.51) and

drastically decreases at a distance of 3 meters between the sensor and the UAV (MAAPE = 0.22), achieving the lowest error at a distance beginning on 7 meters (MAAPE = 0.02).

Keywords —**Environmental monitoring, environmental drones, particulate matter, rotor downwash.**

ÍNDICE DE CONTENIDO TEMÁTICO

		Página
CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN		**1**
1.1	Introducción	**1**
1.2	Planteamiento del problema	**2**
1.3	Pregunta de investigación	**2**
1.4	Hipótesis	**3**
1.5	Objetivos	**3**
1.5.1	Objetivo general	**3**
1.5.2	Objetivos específicos	**3**
1.6	Justificación y contribución	**4**
1.7	Descripción de la metodología	**4**
1.8	Organización de esta tesis	**5**
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES		**6**
2.1	Panorama general de la calidad del aire a nivel global	**6**
2.2	Panorama general de la calidad del aire a nivel local	**7**
2.3	Inicios de la contaminación atmosférica	**8**
2.4	Incremento de la población mundial	**9**
2.5	La Edad Media	**9**
2.6	La Revolución Industrial	**10**
2.7	Trabajo relacionado	**10**
CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO		**12**
3.1	Contaminación atmosférica	**12**
3.1.1	Ozono	**12**
3.1.2	Monóxido de Carbono	**13**
3.1.3	Dióxido de Carbono	**13**
3.1.4	Dióxido de Nitrógeno	**13**
3.1.5	Dióxido de azufre	**14**
3.1.6	Material Particulado	**14**
3.2	Sistemas de Monitoreo de la calidad del aire	**16**
3.2.1	Clasificación de sensores de un SMCA de acuerdo con su movilidad	**17**
3.2.1.1	Sensor fijo	**17**
3.2.1.2	Sensor móvil	**18**
3.2.2	Clasificación de sensores de un SMCA de acuerdo con el tipo de sustancia que detectan	**19**
3.2.2.1	Sensores de gases	**20**
3.2.2.2	Sensores de MP	**20**
3.3	Vehículos aéreos no tripulados	**21**
3.3.1	Vehículos aéreos no tripulados de ala fija	**21**
3.3.2	Vehículos aéreos no tripulados multirotor	**21**
3.3.3	Grados de libertad del movimiento de una aeronave	**24**
3.4	Estela de los rotores de un dron	**24**

3.5 Autopilotos **25**
3.6 Plataforma ArduPilot **26**
3.7 Raspberry Pi **27**
3.8 Python **28**
3.8.1 Dronekit **28**
3.9 Internet de las cosas (IoT) **28**

CAPÍTULO 4. REVISIÓN DEL ESTADO TECNOLÓGICO **30**
4.1 Introducción al capítulo **30**
4.2 Metodología de la revisión **30**
4.2.1 Búsqueda en motores de búsqueda **30**
4.2.2 Definición de criterios de inclusión y exclusión **31**
4.2.3 Extracción de información **32**
4.3 Resultados de a revisión **32**
4.3.1 Aspectos generales **33**
4.4 Propuestas de modelos de utilidad **34**
4.4.1 Modelo de utilidad basado en carrete **34**

CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS **36**
5.1 Selección de materiales y componentes **36**
5.1.1 Armazón F450 **36**
5.1.2 Motores **37**
5.1.3 Hélices **37**
5.1.4 Autopiloto **38**
5.1.5 Computadora **41**
5.1.6 Módulo 4G/LTE **41**
5.1.7 Batería **42**
5.1.8 GPS (Sistema de posicionamiento global **43**
5.1.9 Sensor de MP **43**
5.1.10 Carrete **44**
5.2 Ensamblaje del dron **44**
5.3 Instalación de sistema operativo en computadora **45**
5.4 Conexión del autopiloto a la computadora **45**
5.4.1 Conexión física entre el autopiloto y la computadora **46**
5.5 Instalación de HAT 4G/LTE **46**
5.6 Conexión inalámbrica entre la computadora (dron) y la estación terrestre **48**
5.6.1 Uso de claves públicas para acceso remoto a terminal **48**
5.6.2 Generación de túnel SSH inverso **49**
5.7 Conexión con estación terrestre **50**
5.8 Pruebas de vuelo **51**
5.8.1 Prueba de vuelo manual **53**
5.8.2 Pruebas de precisión de posición durante vuelo automático **54**
5.8.3 Pruebas de tiempo y distancia máximos de vuelo **55**

5.9 Pruebas de medición de MP **56**
5.9.1 Prueba de medición con sensores en cámara de calibración con ambiente controlado **58**
5.9.2 Pruebas de medición simultáneas en exterior **59**

CAPÍTULO 6. RESULTADOS **63**
6.1 Ensamblaje y funcionamiento del dron **63**
6.2 Pruebas de vuelo **64**
6.2.1 Prueba de vuelo manual **64**
6.2.2 Pruebas de precisión de posición durante vuelo automático **66**
6.2.3 Pruebas de tiempo y distancia máximos de vuelo **66**
6.3 Pruebas de medición de MP **66**
6.3.1 Prueba de medición con sensores en cámara de calibración con ambiente controlado **66**
6.3.2 Pruebas de medición simultáneas en exterior **68**

CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS **71**
7.1 Evaluación de parámetros de vuelo **71**
7.2 Error de posicionamiento en vuelo automático y manual **72**
7.3 Efecto del dron en las mediciones de MP **72**
7.3.1 Consistencia de mediciones de ambos sensores en ambiente Controlado **72**
7.3.2 Variación de diferencia de mediciones de MP en exterior de acuerdo con la variación de la distancia entre el dron y el sensor **73**
7.4 Limitaciones **74**

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO **76**
8.1 Conclusiones **76**
8.2 Trabajo futuro **77**
8.3 Contribuciones **78**
8.3.1 Productos derivados del proyecto **78**
8.3.2 Productos adicionales **79**

REFERENCIAS **80**

ÍNDICE DE FIGURAS

Página

CAPÍTULO 1 PRESENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Etapas de metodología **4**

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES

2.1 Niveles de MP2.5 en $\frac{\mu g}{m^3}$ por entidad federativa **7**

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1 Comparación de tamaño de $MP_{2.5}$ y MP_{10} **15**
3.2 Comparación de penetración biológica entre MP_{10} y $MP_{2.5}$ **16**
3.3 SMCA que utiliza sensores fijos **18**
3.4 Sensor de calidad del aire colocado en un vehículo terrestre **19**
3.5 Funcionamiento general de un sensor de dispersión de luz **20**
3.6 Vehículo aéreo no tripulado de ala fija **21**
3.7 Sentido de giro de rotores en un cuadricóptero **22**
3.8 Vehículo aéreo no tripulado multirotor **23**
3.9 Ejes de movimiento y grados de libertad de una aeronave **24**
3.10 Flujo de aire turbulento por estela de flujo de rotor **25**
3.11 Autopiloto Pixhawk 1 **26**
3.12 Computadora Raspberry Pi 5 **27**
3.13 HAT 4G/LTE adjunto a una computadora Raspberry Pi 5 **29**

CAPÍTULO 4. REVISIÓN DEL ESTADO TECNOLÓGICO

4.1 Diagrama de flujo de selección de patentes a incluir en la revisión **32**
4.2 Vista frontal del modelo de utilidad basado en carrete **35**

CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Armazón F450 con rotores y hélices **36**
5.2 Motor sin escobillas A2212-920KV CW **37**
5.3 Hélices 9450 **38**
5.4 Vista frontal del autopiloto Pixhawk 1 (versión 2.4.8) **39**
5.5 Computadora Raspberry Pi 4 modelo B **41**
5.6 HAT 4G/LTE montado en Raspberry Pi 4 modelo B **42**
5.7 Batería LiPo utilizada **42**
5.8 Módulo GPS M8N **43**
5.9 Sensor PAS-OUT-01 **44**
5.10 Carrete utilizado **44**
5.11 Características del sistema operativo **45**
5.12 Arquitectura de comunicación autopiloto-arquitectura **46**
5.13 Diagrama de conexión del puerto UART2 del autopiloto hacia las terminales del puerto UART3 de la computadora **46**
5.14 Interfaz de plataforma Sixfab CORE. **47**
5.15 Interfaces de red activas en computadora Raspberry Pi 4B **48**

5.16 Diagrama de comunicación entre estación terrestre y dron **50**
5.17 Interfaz del software Mission Planner 1.3.82 durante una misión **50**
5.18 Control remoto FS-I6X **53**
5.19 Trayectoria de misión para pruebas de precisión geográfica **55**
5.20 Trayectoria de misión para pruebas de tiempo y distancia máximos de vuelo **56**
5.21 Diagrama de sistema para medición de MP **57**
5.22 Sistema para medición de MP **57**
5.23 Sistemas colocados dentro de cámara de calibración durante prueba de consistencia **58**
5.24 Ubicación de experimentos de evaluación del efecto del dron en las mediciones de calidad del aire **59**
5.25 Sistema “dron” colocado en el dron. **60**
5.26 Montaje inicial de pruebas de medición de MP **61**

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

6.1 Dron ensamblado **63**
6.2 Dron volando **63**
6.3 Estación terrestre mostrando al dron dirigiéndose hacia la ubicación geográfica objetivo. **64**
6.4 Valores de latitud y longitud a lo largo de 35 segundos mientras el dron mantuvo fija su posición durante el vuelo manual **65**
6.5 Curvas de respuesta de ambos sistemas de pruebas en cámara de calibración **67**
6.6 Gráficos Bland-Altman de ambos sistemas de pruebas en cámara de calibración **67**
6.7 Curvas de respuesta de mediciones de $MP_{2.5}$ **69**
6.8 Gráfico de Bland-Altman de mediciones de $MP_{2.5}$ **69**
6.9 Curvas de respuesta de mediciones de MP_{10} **70**
6.10 Gráfico de Bland-Altman de mediciones de MP_{10} **70**

ÍNDICE DE TABLAS

Página

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1 Efectos negativos a la salud por $MP_{2.5}$ y MP_{10} **15**

3.2 Comparación de vehículo aéreo no tripulado de tipo ala fija y tipo Multirotor **23**

CAPÍTULO 4. REVISIÓN DEL ESTADO TECNOLÓGICO

4.1 Criterios de inclusión y exclusión **31**

CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 Características principales del autopiloto Pixhawk 1 (versión 2.4.8) **40**

5.2 Descripción de los modos de vuelo mencionados durante las pruebas de vuelo **52**

5.3 Asignación de funciones al control remoto **54**

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

6.1 Resultados de pruebas de precisión de posición **66**

6.2 Resultados de pruebas de tiempo y distancia máximos de vuelo **66**

6.3 Valores de resultados de prueba en cámara de calibración. **67**

6.7 Resultados de pruebas de medición de MP en exterior **68**

CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Introducción

La contaminación del aire, llamada también contaminación atmosférica, es desde hace décadas una de las principales amenazas a la vida, y desde el 2005 es considerada la mayor problemática ambiental a nivel mundial (OMS, 2006; OMS, 2021).

La tecnología aplicada en el campo de la calidad del aire se encuentra en constante desarrollo desde hace más de una década y se pueden encontrar en el mercado diversos dispositivos capaces de cuantificar contaminantes atmosféricos (Kumar et al., 2015), así como se pueden encontrar dispositivos en etapa de desarrollo en la literatura científica y de patentes. Aunque se ha desarrollado tecnología en este campo, aún existen limitaciones con las que cuentan los dispositivos desarrollados como el tiempo de vuelo y la precisión en la geolocalización, además de las limitaciones que los propios sensores de calidad del aire presentan (T. Villa et al., 2016).

Una limitación que existe en los sensores de calidad del aire es que muchos de estos han sido desarrollados pensados para ser colocados en una ubicación fija, lo cual limita la resolución espacial y requiere la incorporación de múltiples sensores en distintas ubicaciones para lograr un monitoreo preciso de la calidad del aire (Jumaah et al., 2021). Una alternativa es el uso de sensores móviles los cuales permiten cuantificar contaminantes atmosféricos en distintas ubicaciones utilizando un mismo sensor (Apte et al., 2017; Whitehill et al., 2024).

Los sensores móviles pueden colocarse en personas para conocer su nivel de exposición al aire de mala calidad. De igual forma, en vehículos que se encuentren desplazándose constantemente a lo largo del día, por ejemplo, taxis y autobuses de ruta. Por este motivo, se ha considerado como alternativa el uso de vehículos aéreos no tripulados, también conocidos como “drones”, para portar sensores de calidad del aire y sensores de parámetros meteorológicos para lograr una mayor precisión al reportar datos de la calidad del aire de manera remota y en tiempo real, sin embargo, el uso de drones presenta una serie de nuevos retos que limitan su aplicación como el tiempo de vuelo, rango de alcance de control, y turbulencia descendiente generada por los rotores (Lambey & Prasad, 2021).

1.2 Planteamiento del Problema

Actualmente, la contaminación del aire se encuentra en niveles muy elevados y es reconocida como la mayor problemática ambiental que amenaza a la salud de todos los seres vivos del planeta. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), desde 2019, el 99% de la población global vive en lugares en los que el nivel de contaminación del aire se encuentra por encima de los límites establecidos. Además, Según la OMS y la Organización Panamericana de la Salud (PAHO), más de 12 millones de muertes globales fueron atribuidas a malas condiciones ambientales cada año desde 2016 hasta 2021 (PAHO & OMS, 2021; OMS, 2024), mientras que, de acuerdo con el Instituto de Efectos en la Salud (Health Effects Institute), 7.6 millones de muertes fueron atribuidas a exposición a aire de mala calidad en 2023 (Health Effects Institute, 2025).

Si no se atiende la mala calidad del aire, la población expuesta podría presentar problemas de salud que pueden provocar dos escenarios posibles (Cortez-Huerta et al., 2023): (1) costo de atención a personas en mal estado de salud por exposición a aire de mala calidad, y (2) muerte prematura.

Los drones, especialmente aquellos de tipo multirotor, representan una alternativa atractiva para monitorear la calidad del aire debido a su capacidad de desplazarse en tres dimensiones y de mantener una posición fija durante el vuelo, además de ser capaces de alcanzar ubicaciones peligrosas sin exponer la integridad del operador (T. Villa et al., 2016). Aunque se han realizado estudios del uso de drones para monitoreo de calidad del aire, aún existen vacíos importantes como la evaluación integral del desempeño operativo y la evaluación de la validez de las mediciones durante las misiones de monitoreo. Esto pone en duda la viabilidad operativa de drones desarrollados con materiales y componentes comerciales para realizar mediciones de calidad del aire en exteriores.

1.3 Pregunta de investigación

El desarrollo de este proyecto proporcionará la respuesta de la siguiente pregunta de investigación, la cual queda abierta al proponer el uso de drones para el monitoreo de la calidad del aire:

¿Cómo influye la turbulencia generada por las hélices de un dron en la medición de material particulado mediante el distanciamiento del sensor de material particulado?

1.4 Hipótesis

El distanciamiento de sensores de un dron mitiga la afectación de la turbulencia aérea haciendo que las mediciones no sean significativamente distintas que aquellas realizadas por otro sensor control.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo general

Desarrollar y evaluar un vehículo aéreo no tripulado con capacidad de control remoto y con rutinas de mapeo programables que proporcione mediciones válidas de concentración de material particulado.

1.5.2 Objetivos específicos

- Integrar y programar un dron con materiales y componentes comerciales con capacidad de control remoto y ejecución de rutinas programables.
- Evaluar el tiempo máximo de vuelo, distancia máxima de vuelo y el error de posicionamiento del sistema de navegación del dron mediante pruebas de vuelo automático.
- Integrar un mecanismo para distanciamiento de sensores de material particulado del dron para afrontar la turbulencia aérea generada por los rotores.
- Validar las mediciones de material particulado obtenidas por el dron comparándolas con las mediciones realizadas simultáneamente por otro sensor idéntico que sirva de control sin estar colocado en un dron.

1.6 Justificación y contribución

El desarrollo de un dron para monitoreo de la calidad del aire proporciona una alternativa innovadora frente a métodos tradicionales de medición que utilizan sensores fijos, permitiendo aprovechar sus ventajas como una mayor resolución espacial sin requerir una elevada densidad de monitores, además de evitar que el personal técnico asista a ubicaciones de riesgo como incendios, de igual forma, habilita el acceso a zonas de difícil alcance y prevendrá malas prácticas como la captura de información falsa por parte de un inspector humano para hacer caso omiso a las regulaciones vigentes (Kedys et al., 2024).

El desarrollo de proyectos de investigación enfocados en el monitoreo de la calidad del aire en la localidad permite contar con información actualizada para tomar las mejores decisiones para atender el estado del aire en Mexicali, mitigando sus efectos negativos y reduciendo los costos que genera.

Este proyecto evalúa los parámetros de vuelo de un dron controlable de manera remota con la capacidad de ejecutar rutinas automáticas y utiliza un mecanismo para distanciar sensores de material particulado del dron y así realizar medidas de material particulado comparables a aquellas realizadas por un sensor control libre de turbulencia aérea inducida por los rotores.

1.7 Descripción de la metodología

La metodología de este proyecto comprendió tres etapas, de las cuales la primera comprende la integración del hardware y software en el dron, la segunda comprende las pruebas de vuelas realizadas para evaluar los parámetros de vuelo del dron, y la tercera comprende las pruebas de medición de MP realizadas tanto de los sensores aislados en ambiente controlado como aquellas realizadas en exterior. La figura 1 muestra las etapas de la metodología.



Figura 1.1. *Etapas de metodología.*

1.8 Organización de esta tesis

Este documento se encuentra organizado de la siguiente manera: El capítulo 1 presenta la investigación, en donde se presenta el planteamiento del problema, la pregunta de investigación, la hipótesis, los objetivos, la metodología, la justificación y la contribución. El capítulo 2 describe los antecedentes de la contaminación atmosférica, el monitoreo de la calidad del aire, y los vehículos aéreos no tripulados, describiendo desde los orígenes hasta el panorama de la calidad del aire a nivel local y global. El tercer capítulo introduce y profundiza en los conceptos necesarios de comprender para lograr un adecuado entendimiento del desarrollo de este proyecto de investigación, abarcando conceptos como los distintos contaminantes atmosféricos, los sistemas de monitoreo de la calidad del aire, los vehículos aéreos no tripulados, así como el hardware, la tecnología, y las plataformas de código abierto utilizadas. El cuarto capítulo describe la metodología de una revisión de patentes que se realizó para conocer el estado tecnológico del campo del monitoreo de la calidad del aire asistido por drones protegido bajo la figura de patente, mostrando el alcance que estas invenciones tienen en este campo desde el monitoreo hasta el manejo y control de la calidad del aire. El capítulo 5 describe de manera detallada los materiales y los métodos utilizados para la ejecución de este proyecto de investigación. Además, el capítulo 5 muestra también todas las pruebas que fueron llevadas a cabo para lograr la evaluación del sistema realizado. En el sexto capítulo se muestran todos los resultados que fueron obtenidos de las distintas etapas que se presentan en la sección de metodología, mientras que el capítulo 7 los discute e interpreta, señalando también las limitaciones del proyecto. Finalmente, el capítulo 8 presenta los hallazgos alcanzados mediante la ejecución de este proyecto de investigación, mencionando también el trabajo futuro que se debe de llevar a cabo para que los objetivos de este proyecto de investigación sean logrados de una manera más eficiente y óptima.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1 Panorama general de la calidad del aire a nivel global

Desde la publicación de las directrices de calidad del aire de la OMS de 2005, la contaminación del aire es reconocida como la principal problemática ambiental que amenaza a la supervivencia de los seres vivos expuestos (OMS, 2006).

De acuerdo con el reporte Estado Mundial del Aire (SoGA, por sus siglas en inglés) de 2025 por el Health Effects Institute, 7.9 millones de muertes a nivel mundial fueron atribuidas a la mala calidad del aire, de las cuales, 6.8 millones (86%) fueron por enfermedades no transmisibles (Health Effects Institute, 2025). Además, de acuerdo con el reporte SoGA del 2024, la contaminación atmosférica fue el causante de 8.1 millones de muertes en todo el mundo en 2021 (Health Effects Institute, 2024). Las estimaciones difieren entre instituciones debido a diferencias en metodologías y fuentes de datos, por lo que los valores pueden variar ligeramente entre reportes.

La OMS indica que cerca de 7 millones de muertes son causadas por la mala calidad del aire cada año tras provocar enfermedades respiratorias y cardiovasculares (OMS, 2025a). Además, durante la 78va Asamblea Mundial de la Salud del 2025, se reafirmó que al menos el 99% de la población mundial respira aire cuyas concentraciones de contaminantes atmosféricos se encuentran por encima de los límites establecidos en las directrices de la OMS (OMS, 2025b).

En el reporte del 2025 sobre la calidad del aire por el banco mundial, se estimó que la contaminación del aire causa la muerte de 5.7 millones ‘sde personas al año y esto representa una muy significativa pérdida económica por el incremento en los costos de los sistemas de salud pública (The World Bank, 2025).

A pesar de que en años recientes se ha mejorado la calidad del aire en la mayoría de los países de ingresos altos, ha empeorado en los países de ingresos medianos y los países de ingresos bajos, entre los que se encuentra México (Rentschler & Leonova, 2023).

2.2 Panorama general de la calidad del aire a nivel local

De acuerdo con el Informe de la calidad del aire en la megalópolis de 2013 a 2022 publicado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), en 2019 se presentaron más de 48 mil muertes prematuras en México atribuibles a exposición al aire de mala calidad (INECC, 2023).

En Mexicali, la concentración de material particulado de diámetro aerodinámico igual o menor a 2.5 micrómetros ($MP_{2.5}$) alcanza a sobrepasar los $40\frac{\mu g}{m^3}$ durante el día, la cual se encuentra por encima del valor máxmo de $10\frac{\mu g}{m^3}$ establecido por la OMS en sus directrices (IQAir, 2025; OMS, 2021).

Recientemente, el Banco de México publicó un reporte que incluye datos de concentraciones promedio de $MP_{2.5}$, así como rangos de mínimos y máximos de las mismas en las distintas entidades federativas hasta 2024, en el que se puede observar que Baja California presentó las concentraciones más elevadas de $MP_{2.5}$ en el norte del país y la segunda concentración máxima del país, como se puede observar en la figura 2.1 (Banco de México, 2024).

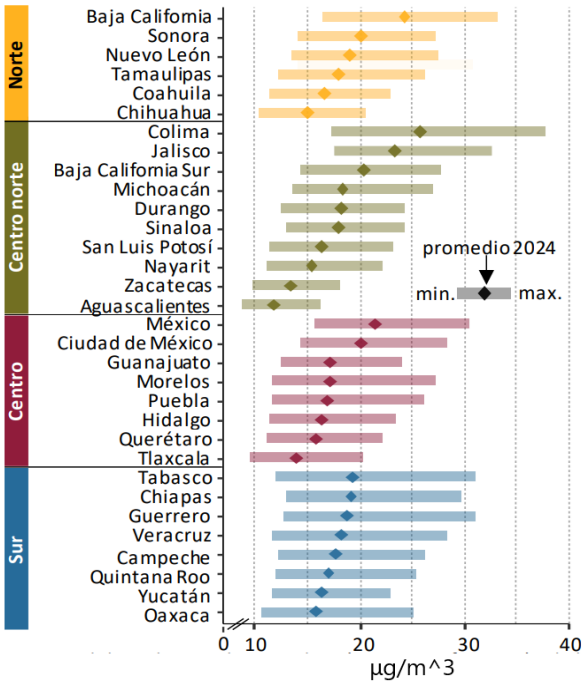


Figura 2.1. *Niveles de $MP_{2.5}$ en $\frac{\mu g}{m^3}$ por entidad federativa*

La Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Medio Ambiente establece en materia de contaminación atmosférica que es competencia del gobierno de cada entidad federativa, municipio y demarcación territorial de la Ciudad de México el establecimiento y la operación de sistemas de monitoreo, vigilancia, y control de calidad del aire, así como elaborar informes del estado del medio ambiente en su respectiva entidad, municipio o demarcación territorial de la Ciudad de México correspondiente (Ley General Del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente, 2024).

El último informe nacional de calidad del aire publicado por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático corresponde al año 2022, sin embargo, no contiene información del estado de Baja California, por lo que no existen informes con dicha información de los últimos 3 años (INECC, 2022).

Estudios han demostrado que la contaminación atmosférica de una ciudad varía con respecto a otras debido a que los contaminantes en diferentes localidades no necesariamente provienen de una misma fuente, por ejemplo, emisiones generadas por actividades humanas como la minería o la combustión de fósiles, así como el comportamiento de contaminantes atmosféricos debido a las condiciones meteorológicas tales como temperatura, humedad relativa, y radiación solar, las cuales también varían de acuerdo con la localidad. En ese sentido, realizar un inventario de emisiones por localidad es necesario para tomar medidas específicas y no copiar lo que otras localidades realizan (Benítez-García et al., 2014).

Aunque existe un inventario de emisiones del estado de Baja California, no existe uno actualizado, pues el que se puede encontrar en las bases de datos corresponde al año 2005 y este contiene únicamente información de gases de efecto invernadero (GEI) y no de material particulado (Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza, 2010).

2.3 Inicios de la contaminación atmosférica

La contaminación del aire generalmente es remontada a la revolución industrial la cual ocurrió desde la segunda mitad del siglo XVIII hasta la primera mitad del siglo XIX, sin embargo, las actividades humanas han tenido impacto ambiental desde hace miles de años (Goudie, 2013; Theilman, 2023).

Las primeras actividades humanas correspondientes a la agricultura y a la ganadería, por ejemplo, la tala de árboles, y la quema de madera, ya tenían un impacto atmosférico produciendo GEIs como el metano y el dióxido de carbono (Goudie, 2013).

Aunque antes de la revolución industrial la agricultura no generaba sustancias que fueran directamente dañinas para la salud, la generación de GEIs ya provocaba un incremento gradual de estos en la atmósfera (Theilman, 2023).

2.4 Incremento de la población mundial

La contaminación atmosférica está relacionada a la actividad humana, por lo que esta tiende a ser proporcional a la población mundial. Hace miles de años, el incremento de la población era bastante lento, sin embargo, a medida que se iban volviendo complejas las sociedades, se requería de una mayor cantidad de herramientas, las cuales eran fabricadas mayormente mediante la fundición de metales, lo cual emitía a la atmósfera dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno. Además de esto, la energía requerida para fundir metales era generada quemando madera, lo cual, como se mencionó anteriormente, genera GEIs (Fowler et al., 2020).

El incremento poblacional también provocaba una mayor deforestación en donde se construyeran sitios habitables, lo cual favorecía a la acumulación de GEIs en la atmósfera (Fowler et al., 2020; Goudie, 2013).

Debido a las bajas concentraciones de contaminantes atmosféricos, la mayoría de la población no notaba la contaminación generada por estas actividades, excepto por corrientes de humo que ocasionalmente eran observadas desde los sitios de producción energética (Fowler et al., 2020).

2.5 La Edad Media

Hasta la edad media fue que las sociedades comenzaron a tener conciencia del impacto ambiental que tenían las actividades mencionadas previamente, especialmente al observar una acumulación de humo en grandes ciudades generado principalmente por la

quema de leña, así como también en parte por la quema de carbón en los hogares (Goudie, 2013).

Además, durante esta época no se tenía conciencia sobre la acumulación de gases nocivos para la salud como el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre, pues estos no eran conocidos, sin embargo, eran producidos en los procesos de combustión involucrados en la quema de leña y carbón (Dee, 2021).

El continuo incremento de la población provocó una mayor deforestación, por lo que se comenzó a optar mayormente por la utilización de carbón mineral en lugar de leña como fuente de energía, lo cual, aunque disminuye la tala y deforestación, provoca una mayor emisión de contaminantes de azufre y carbono a la atmósfera (Goudie, 2013).

2.6 La Revolución Industrial

La industrialización llevada a cabo a finales del siglo XVIII y a inicios del siglo XIX llevó al incremento drástico de contaminantes en la atmósfera (Ruddiman, 2016).

A partir de esta parte de la historia se comenzaron a utilizar principalmente combustibles fósiles como fuente energética, asimismo se incrementaron las actividades antropogénicas que se realizaban previamente. Esto fue debido a que la industrialización de la sociedad llevó a un incremento poblacional, el cual a su vez incrementó la deforestación con la producción industrial y agrícola, agregando más GEIs a la atmósfera, así como los gases nocivos previamente mencionados (Fowler et al., 2020).

Se comenzaron también a generar nuevos contaminantes como los clorofluorocarbonos, los cuales provocan un adelgazamiento de la capa de ozono, de acuerdo con la investigación del Dr. Mario Molina, la cual le valdría en 1995 el premio nobel de química (Molina & Rowland, 1974).

2.7 Trabajo relacionado

En la literatura existe trabajo previo relacionado en el campo del monitoreo de material particulado asistido por drones, sin embargo, solo algunos de ellos toman en cuenta

la afectación por el flujo de aire turbulento generado por el dron, los cuales se presentan a continuación.

Aurell y Gullet (2024) en su trabajo colocaron dos sensores para medición simultánea de material particulado en distintas ubicaciones del dron, específicamente a un costado y arriba del dron, mostrando que no existe diferencia en los valores medidos en las distintas posiciones del sensor.

Villa et al. (2016) determinaron que la velocidad de viento más elevada producida por el movimiento de los rotores de un dron se produce a una distancia aproximada de 0.6 metros de estos, y decrece conforme la distancia aumenta.

Crazzolara et al. (2019) utilizaron humo de bengala para visualizar cómo es el flujo de dicho humo al atravesar un dron comercial y detectar zonas libres de turbulencia aérea producida por los rotores del dron.

Wang T. et al. (2020) determinaron con un anemómetro la velocidad del viento a distintas distancias horizontales respecto al dron y propusieron corregir las mediciones utilizando regresión lineal posterior a realizar dichas mediciones.

Aunque estos trabajos relacionados caracterizan el flujo turbulento que producen los rotores del dron, no realizan mediciones de material particulado con el dron sin que estas sean interferidas por dicho flujo turbulento. En este trabajo se propone un mecanismo que permita el distanciamiento de un sensor de material particulado del dron desde la cara inferior del mismo y se evalúa la perturbación de las mediciones de material particulado a distintas distancias del dron.

CAPÍTULO 3. MARCO TEÓRICO

3.1 Contaminación atmosférica

Es necesario describir en esta tesis los principales contaminantes atmosféricos ya que constituyen una variable que será monitoreada y comparada entre distintos sistemas de medición. Conocer las propiedades físicas y químicas, así como las fuentes de las sustancias contaminantes permite comprender por qué algunos contaminantes como el material particulado se pueden ver afectados por el vuelo del dron. Por este motivo, el marco conceptual de los contaminantes atmosféricos permite apoyar a la interpretación de los resultados de las pruebas que más adelante se presentan.

La contaminación atmosférica consiste en la presencia en la atmósfera de sustancias denominadas "contaminantes atmosféricos". Los contaminantes atmosféricos de mayor interés, cuya concentración es por lo tanto continuamente monitoreada, son monóxido de carbono (CO), ozono (O_3), dióxido de carbono (CO_2), dióxido de azufre (SO_2), dióxido de nitrógeno (NO_2) y material particulado (MP), los cuales son emitidos a la atmósfera de manera natural pero cuya concentración en el ambiente se ha incrementado como producto de actividades antropogénicas (contaminantes cuantitativos), afectando así a la calidad del aire y provocando enfermedades y muerte prematura en los seres vivos expuestos. (Altieri & Keen, 2019; Cortez-Huerta et al., 2023; Jia et al., 2021; Shi et al., 2022; Silva et al., 2016; Somboonsin et al., 2023; OMS, 2024).

3.1.1 Ozono

El O_3 que se encuentra a nivel del suelo, también conocido como ozono troposférico, es un contaminante secundario, es decir, que se forma en la atmósfera a partir de reacciones químicas. Es un componente del esmog formado cuando la radiación solar provoca reacciones fotoquímicas de otros contaminantes como óxidos de nitrógeno (NO_x) y el CO emitidos por vehículos y procesos industriales. El O_3 alcanza sus niveles más elevados durante el día en periodos de clima soleado debido a su naturaleza fotoquímica (OMS, 2024).

3.1.2 Monóxido de carbono

El CO es un compuesto químico producido durante procesos de combustión incompleta de combustibles de carbono como la gasolina y el diesel, por ejemplo, por vehículos motorizados de combustión interna en mal estado (OMS, 2024).

El CO es capaz de ingresar al torrente sanguíneo a través del tejido pulmonar y dificulta la absorción de oxígeno a las células, produciendo así daños en los tejidos. La exposición a altos niveles de CO puede ser mortal (Chenoweth et al., 2021).

3.1.3 Dióxido de carbono

El CO_2 es un GEI y un contaminante atmosférico que se encuentra naturalmente en la atmósfera al ser producido durante procesos de combustión y la misma respiración, pero es perjudicial en concentraciones elevadas al ser producido por actividades antropogénicas y no solamente por medio de procesos naturales como la respiración (NASA, 2025).

Algunas de las actividades antropogénicas que producen CO_2 son la utilización de vehículos de combustión interna y reacciones industriales que involucren la quema de combustibles de carbono (NASA, 2025).

La afectación por acumulación de CO_2 es sencilla de entender sabiendo que este gas es convertido en oxígeno por seres vivos que realizan fotosíntesis, sin embargo, al introducir en la atmósfera una cantidad de CO_2 mayor de la que puedan procesar estos seres vivos genera un desequilibrio que provoca una acumulación de CO_2 en la atmósfera (Lüthi et al., 2008).

3.1.4 Dióxido de nitrógeno

El NO_2 es un compuesto químico gaseoso a temperatura ambiente y es un óxido ácido, lo cual implica que produce una solución acuosa ácida al reaccionar con agua. El NO_2, al igual que los otros óxidos ácidos, es responsable del fenómeno conocido como “lluvia ácida” (OMS, 2024).

Este compuesto es capaz de irritar las vías respiratorias y agravar enfermedades respiratorias en personas expuestas (EPA, 2025b). Además, como se mencionó anteriormente, el NO_2 es un precursor del ozono troposférico (Dickerson et al., 1982).

3.1.5 Dióxido de azufre

El SO_2, al igual que el NO_2, es un compuesto químico gaseoso perteneciente al grupo de los óxidos ácidos, por lo que es capaz de provocar lluvia ácida. Es principalmente producido por la quema de combustibles fósiles para generación de calor doméstico, procesos industriales, y generación de energía eléctrica (OMS, 2024).

Respecto a los efectos de salud provocados por exposición directa a dióxido de azufre, este es asociado con asma (NPS, 2024).

3.1.6 Material particulado

El MP, a diferencia de los gases que se mencionaron en las subsecciones anteriores, no es una sustancia, sino una mezcla de partículas sólidas y líquidas de distintas sustancias que pueden permanecer suspendidas en el aire ya que la influencia de la gravedad sobre ellas no es lo suficientemente fuerte para hacerlas atravesar las masas de aire que se encuentran entre ellas y el suelo (EPA, 2025b; Russell & Brunekreef, 2009). La composición del MP varía según su origen, sin embargo, los componentes más comunes del MP son: sulfatos, nitratos, cloruros, negro de carbón, y polvo de minería. El MP es clasificado de acuerdo con el diámetro aerodinámico de las partículas (debido a que la morfología de las partículas es irregular y no esférica), siendo el de 2.5 micrómetros ($MP_{2.5}$) y el de 10 micrómetros (MP_{10}) los más comunes en el marco regulatorio y de interés para la salud. (ANSES, 2019; EPA, 2025a; Oh et al., 2011; OMS, 2021, 2024; Yang et al., 2023)**.**

Uno de los motivos por lo que el MP es clasificado según el tamaño de partícula es que los efectos en la salud varían, así como sus fuentes de origen. Por ejemplo, debido a su tamaño, el $MP_{2.5}$ es capaz de ingresar a órganos del cuerpo que el MP_{10} no puede ingresar, provocando en estos estrés oxidativo y existe evidencia que indica que las partículas de menor tamaño son más peligrosas que las de mayor tamaño en cuanto a incremento de mortalidad y de efectos cardiovasculares y respiratorios (Lodovici & Bigagli, 2011). La figura 3.1 muestra una comparación del tamaño de partícula entre $MP_{2.5}$ y MP_{10} (EPA, 2025a; Russell & Brunekreef, 2009). La Tabla 3.1 muestra algunos de los principales efectos negativos en la salud ocasionados por MP_{10} y $MP_{2.5}$, mientras que la figura 3.2 muestra la comparación de penetración biológica entre MP_{10} y $MP_{2.5}$

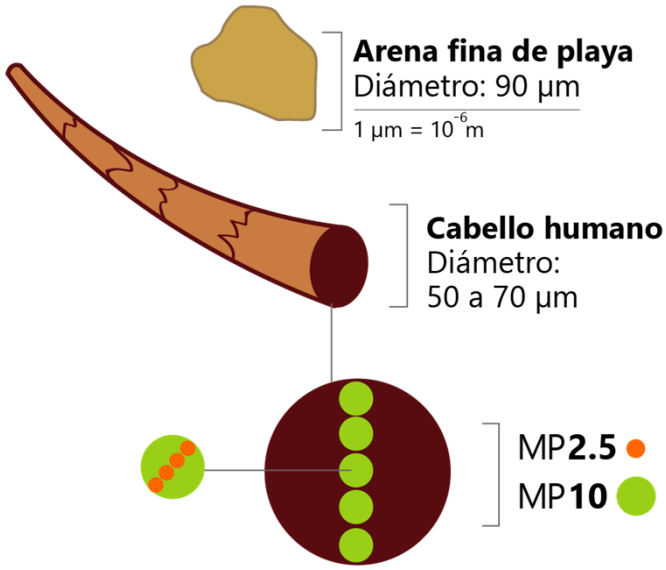


Figura 3.1. *Comparación de tamaño de $MP_{2.5}$ y MP_{10} (Área metropolitana Valle de Aburrá, 2021).*

Tabla 3.1. *Efectos negativos a la salud por MP_{10} y $MP_{2.5}$ (Kim et al., 2015).*

Partículas	**MP_{10}**	**$MP_{2.5}$**
Ubicación de depósito	Vía aérea extratorácica	Alcanzan los alvéolos y pueden ingresar al torrente sanguíneo
Efectos en la salud	Irritación de garganta, asma, bronquitis, exacerbación de enfermedad pulmonar obstructiva crónica, fallo cardiaco crónico	Daño alveolar, reducción de función pulmonar, cáncer de pulmón, enfermedades cardiovasculares

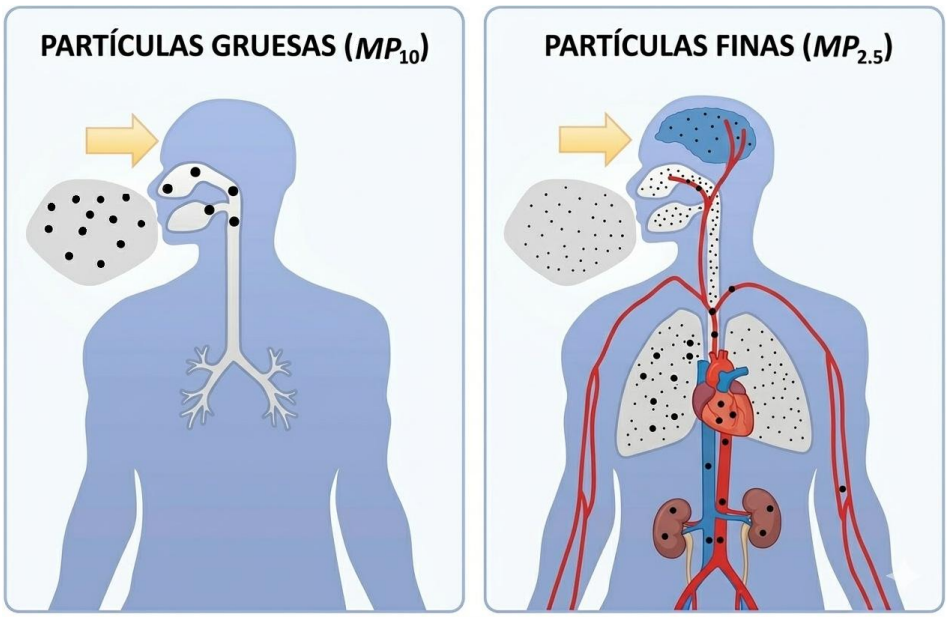


Figura 3.2. *Comparación de penetración biológica entre MP_{10} y $MP_{2.5}$.*

En cuanto a las fuentes de origen del MP, el $MP_{2.5}$, es emitido principalmente por fuentes de combustión (tráfico, quema de biomasa, y procesos industriales), mientras que el MP_{10} es emitido en mayor cantidad mediante procesos mecánicos (trituramiento, actividades de minería, y actividades de construcción) (EPA, 2025a).

3.2 Sistemas de monitoreo de la calidad del aire

Un sistema de monitoreo de la calidad del aire (SMCA) contiene uno o varios sensores capaces de detectar la concentración de contaminantes atmosféricos en una masa de aire.

Todos los sensores de un SMCA constan de un conjunto de elementos: (1) el elemento del sensor que responde al contaminante de interés y que varía de acuerdo con la cantidad de contaminante que se encuentra en un volumen de aire muestreado; (2) un transductor que convierte la respuesta del elemento 1 a señales eléctricas; (3) una fuente de alimentación como una batería (Snyder et al., 2013).

Los parámetros detectados por los sensores de un SMCA son monitoreados mediante una pantalla integrada en el SMCA o mediante un dispositivo externo como una computadora o un teléfono inteligente, y pueden ser almacenados (Soetedjo & Hendriarianti, 2023). Los

SMCA son fundamentales para llevar a cabo la elaboración de inventarios de emisiones que permitan tomar decisiones para mejorar la calidad del aire en una localidad (Feng & Liao, 2016).

3.2.1 Clasificación de sensores de un SMCA de acuerdo con su movilidad

Los sensores de un SMCA pueden ser clasificados según su movilidad en fijos y móviles. Cada uno de ellos presenta ventajas y desventajas que deben de ser tomadas en consideración según los objetivos del monitoreo de la calidad del aire (Whitehill et al., 2024).

3.2.1.1 Sensor fijo

Un sensor fijo permanece ubicado en una localización específica y detecta la concentración de contaminantes atmosféricos en su localización. Pueden ser colocados a nivel del suelo o a mayores elevaciones colocándolos en, por ejemplo, postes de luz y edificios de varias plantas. Las mediciones con sensores fijos pueden estimar la concentración de contaminantes atmosféricos hasta cierto radio desde la localización del sensor de acuerdo con el relieve y las condiciones meteorológicas(Whitehill et al., 2024). Para conocer con mayor precisión la calidad del aire en un área, se colocan varios sensores a lo largo del área en donde se desea medir, y la resolución espacial de las mediciones se ve favorecida al disminuir la distancia entre los sensores (Jumaah et al., 2021). Contar con una alta resolución espacial implica la utilización de un elevado número de sensores, lo cual incrementa los costos del monitoreo. Además, cada sensor fijo colocado en un área puede ser alimentado directamente desde la instalación eléctrica del sitio en donde se ubiquen. Asimismo, realizar mediciones con sensores fijos no tiene el problema de ser susceptible al ruido introducido por el movimiento del portador del sensor (Altamira-Colado et al., 2024). La figura 3.3 muestra un ejemplo de un SMCA que utiliza sensores fijos.



Figura 3.3. *SMCA que utiliza sensores fijos (ATI Techno Industries, 2019).*

En la sección X se indica la utilización de un sistema suspendido en el aire utilizado como referencia que opera como un sensor fijo de calidad del aire, ya que no genera turbulencia aérea y permanece estable durante las mediciones de MP.

3.2.1.2 Sensor móvil

Un sensor móvil de calidad del aire es portado por una persona capaz de desplazarse o por un vehículo terrestre, por ejemplo, autobuses, taxis, y bicicletas. Un ejemplo es el trabajo de Apte et al en 2017, en el que equiparon automóviles de Google Street View con sensores de alta precisión para medir la concentración de contaminantes como el dióxido de nitrógeno a nivel del suelo en Oakland, California, Estados Unidos (Apte et al., 2017). Utilizar un sensor móvil para monitorear la calidad del aire permite conocer la concentración de contaminantes atmosféricos en distintas ubicaciones sin la necesidad de utilizar varios sensores, lo cual vuelve el monitoreo más económico con respecto al monitoreo realizado por sensores fijos (Jumaah et al., 2021).

Debido a que un sensor móvil puede detectar la calidad del aire en distintas ubicaciones, la resolución espacial no es un problema y se ve limitada por la velocidad a la que pueda muestrear el dispositivo controlador del SMCA y las localizaciones que pueda alcanzar el portador (Zhang & Zhao, 2015).

Los sensores móviles colocados en vehículos terrestres y en personas capaces de desplazarse deben de ser alimentados por una batería y son susceptibles al ruido que pueda introducir el movimiento del portador (Altamira-Colado et al., 2024). Además, se encuentran limitados a la posición del portador, lo que implica que no pueden realizar medidas a elevaciones distintas del nivel del suelo (Altamira-Colado et al., 2024). La figura 3.4 muestra un ejemplo de un sensor colocado en un vehículo terrestre, en donde las líneas azules representan la transmisión inalámbrica de información.

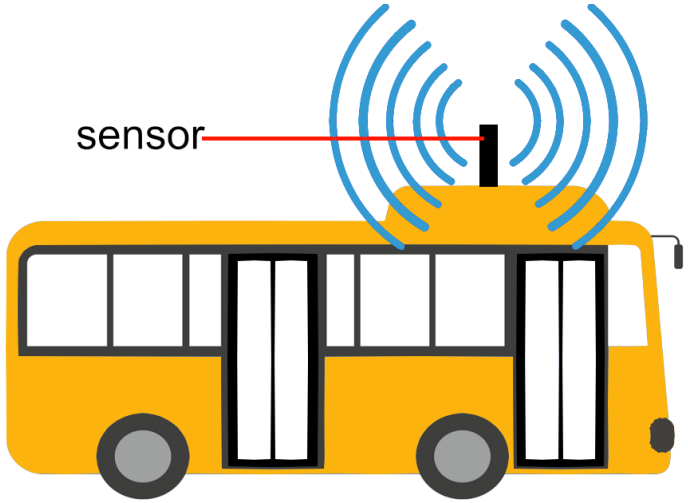


Figura 3.4. *Sensor de calidad del aire colocado en un vehículo terrestre.*

Se ha intentado colocar sensores de calidad del aire en vehículos aéreos, particularmente drones, de los cuales se hablará en subsecuentes secciones, sin embargo, estos podrían presentar una serie de limitaciones a tener en cuenta para el uso de estos en aplicaciones ambientales (Shouji et al., 2021).

3.2.2 Clasificación de sensores de un SMCA de acuerdo el tipo de sustancia que detectan

Los sensores de un SMCA también pueden ser clasificados de acuerdo con el tipo de contaminante que detectan, ya que la tecnología de detección varía en función de si se detectará la concentración de especies gaseosas o si se detectará la concentración de masa de MP de cualquier tamaño (Karagulian et al., 2019).

3.2.2.1 Sensores de gases

Debido a que los gases son sustancias conocidas, pueden ser detectados y cuantificados por medio de sus propiedades químicas y físicas. Los sensores de gases se basan en uno de estos principios: (1) La interacción entre el elemento sensible (por ejemplo, una celda electroquímica o un semiconductor de óxido metálico) y el gas; (2) la absorción de luz que puede ser desde visible hasta ultravioleta, o quimioluminiscencia (Snyder et al., 2013).

3.2.2.2 Sensores de MP

La cantidad de MP presente en una muestra de aire de volumen conocido es más simple de medir debido a que, como se mencionó anteriormente, el MP consiste en una mezcla de partículas sólidas y líquidas, las cuales dispersan la luz. Con base en el principio de dispersión de luz, la concentración de partículas puede ser detectada utilizando un emisor y un receptor de luz (Chicea et al., 2021).

Idealmente, el aire no dispersa la luz, por lo que deja pasar toda la luz que lo alcanza, sin embargo, la presencia de partículas sólidas y líquidas en el aire provoca que se disperse cierta cantidad de luz en función de la concentración de estas. De esta manera, entre menor sea la fracción de luz que llega al receptor desde el emisor de luz, mayor es la cantidad de partículas dispersantes de luz en el aire (BYJUS, s.f.; Chicea et al., 2021). La figura 3.5 ilustra de manera general el principio de funcionamiento de un sensor de dispersión de luz.

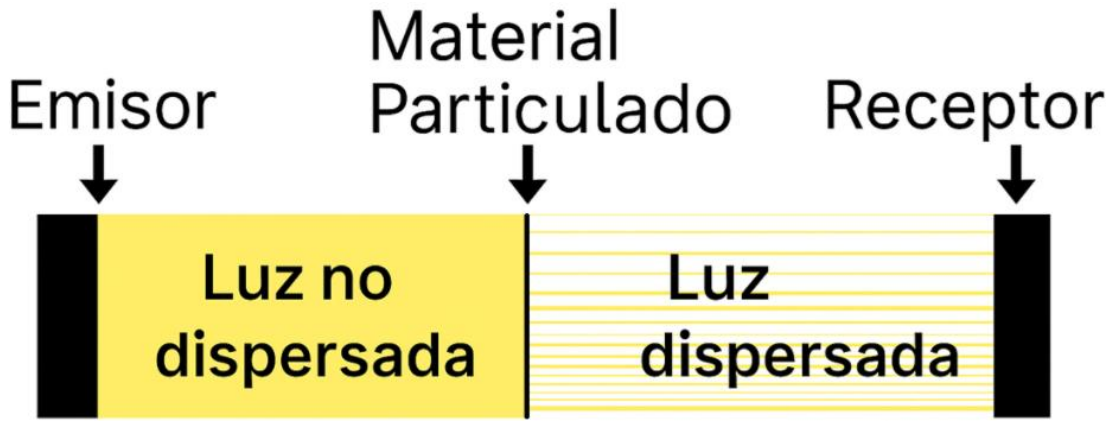


Figura 3.5. *Funcionamiento general de un sensor de dispersión de luz.*

3.3 Vehículos aéreos no tripulados

3.3.1 Vehículos aéreos no tripulados de ala fija

Los vehículos aéreos no tripulados de ala fija son capaces de volar por largas distancias debido a su eficiencia aerodinámica, y además de ser capaces de volar a alturas elevadas. El ala fija de este tipo de vehículos aéreos les permite planear, lo cual requiere un bajo consumo energético y se beneficia de la inercia del vuelo (Garg, 2022).

Por otro lado, los vehículos aéreos no tripulados de ala fija presentan ciertas limitaciones que deben ser tomadas en cuenta según el uso que se le va a dar. Una de las principales limitaciones que presentan estos vehículos es que requieren un amplio espacio tanto para despegar como para aterrizar, y no pueden mantenerse fijos en una ubicación durante el vuelo (Altamira-Colado et al., 2024). Además, requieren de un espacio amplio para cambiar de dirección, por lo que no pueden hacerlo de manera abrupta. Esto requiere que el piloto de un vehículo aéreo de ala fija cuente con experiencia en el manejo de este tipo de vehículos debido a la complejidad que presentan. La figura 3.6 muestra un vehículo aéreo no tripulado de ala fija.



Figura 3.6. *Vehículo aéreo no tripulado de ala fija (Droniq, 2025).*

3.3.2 Vehículos aéreos no tripulados multirotor

Los vehículos aéreos no tripulados de tipo multirotor cuentan con un número par de rotores, siendo los más comunes de 4 y 6 rotores. Los vehículos aéreos no tripulados de tipo

multirotor cuentan con brazos que en sus extremos contienen rotores que mueven hélices que generan el flujo de aire necesario para que el vehículo se desplace en el aire.

Los vehículos aéreos no tripulados de tipo multirotor giran la mitad de sus hélices en sentido horario, mientras que la otra mitad de sus hélices giran en sentido antihorario para otorgar estabilidad al vehículo. La figura 3.7 muestra el sentido del giro de las hélices de un cuadricóptero (vehículo aéreo no tripulado multirotor de 4 rotores).

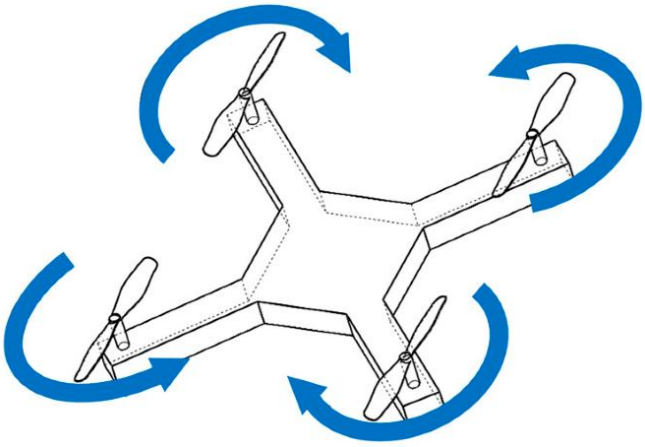


Figura 3.7. *Sentido de giro de rotores en un cuadricóptero (Altamira-Colado et al., 2024).*

Al igual que los vehículos aéreos no tripulados de ala fija, los vehículos aéreos no tripulados de tipo multirotor presentan ventajas y limitaciones que deben de ser consideradas de acuerdo con la aplicación que se le quiera dar al vehículo.

Los vehículos aéreos de tipo multirotor son capaces de permanecer fijos en una ubicación durante el vuelo, lo cual implica que son capaces de frenar y cambiar de dirección rápidamente, y pueden despegar y aterrizar de manera completamente vertical, por lo que pueden hacerlo en espacios reducidos. Además, los vehículos aéreos de tipo multirotor pueden desplazarse en cualquier dirección (X, Y, y Z) (Altamira-Colado et al., 2024).

Por otro lado, los vehículos aéreos de tipo multirotor, requieren de mantener los rotores encendidos durante todo el vuelo, lo cual implica un mayor gasto energético que los vehículos aéreos de ala fija, por ende, su tiempo máximo de vuelo se ve reducido, y con ello también la distancia máxima de vuelo. Además, este tipo de vehículos son vulnerables a altas

velocidades de viento (Gao et al., 2021). La figura 3.8 muestra un vehículo aéreo no tripulado de tipo multirotor (Crosby, 2022).



Figura 3.8. *Vehículo aéreo no tripulado multirotor (Zmotion Autonomous Systems, 2025).*

La tabla 3.2 muestra la comparación entre un vehículo aéreo no tripulado de ala fija y uno de tipo multirotor.

Tabla 3.2. *Comparación de vehículo aéreo no tripulado de tipo ala fija y tipo multirotor.*

Ala fija		**Multirotor**	
Ventajas	**Desventajas**	**Ventajas**	**Desventajas**
Eficiencia aerodinámica	Requiere amplio espacio para aterrizar y despegar	Aterrizaje y despegue vertical en espacios reducidos	Elevado gasto energético
Distancia de vuelo elevada	No puede permanecer fijo en el aire	Puede permanecer fijo en el aire	Tiempo y distancia de vuelo reducidos
Tiempo de vuelo elevado	No puede cambiar la dirección de vuelo abruptamente	Movimiento en X-Y-Z	Vulnerable a fuertes vientos

3.3.3 Grados de libertad del movimiento de una aeronave

Una aeronave cuenta con tres grados de libertad a lo largo de cada uno de los tres ejes de movimiento. Los grados de libertad se conocen como alabeo, cabeceo y guiñada. El alabeo consiste en la rotación de la aeronave sobre su eje longitudinal, mientras que el cabeceo consiste en la rotación de la aeronave sobre su eje transversal y la guiñada consiste en la rotación de la aeronave sobre su eje vertical (Beard & McLain, 2012). La figura 3.9 muestra los ejes de una aeronave y sus movimientos sobre cada uno de dichos ejes.

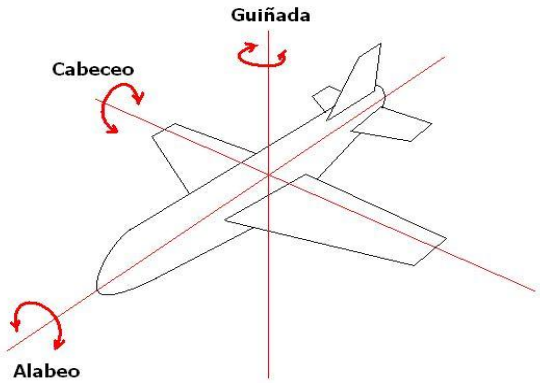


Figura 3.9. *Ejes de movimiento y grados de libertad de una aeronave (URANY, 2022).*

Conocer los tipos de drones y los ejes de movimiento es necesario para configurar correctamente los modos de vuelo, los cuales son algoritmos que determinan cómo responde el dron a los mandos del piloto y a los sensores internos. Además, las características aerodinámicas del dron utilizado pueden influir directamente en las mediciones de calidad del aire, por lo tanto, conocerlas proporciona información técnica que permite una mejor interpretación de los resultados.

3.4 Estela de los rotores de un dron

El principio de funcionamiento de un dron de tipo multirotor se basa en la generación de un flujo de aire hacia abajo para ser impulsados hacia arriba y contrarrestar la gravedad. Este flujo de aire provoca que se genere una zona de turbulencia aérea elevada cercana al dron, la cual disturba el aire de manera significativa, diluye el aire alrededor del dron y es

capaz de resuspender partículas que se encuentran en el suelo haciendo que una muestra de concentración de partículas como el MP suspendidas en el aire no sea representativa (Aurell & Gullett, 2024; Wang et al., 2020). La figura 3.10 muestra la trayectoria del flujo aéreo generado por un dron multirotor.

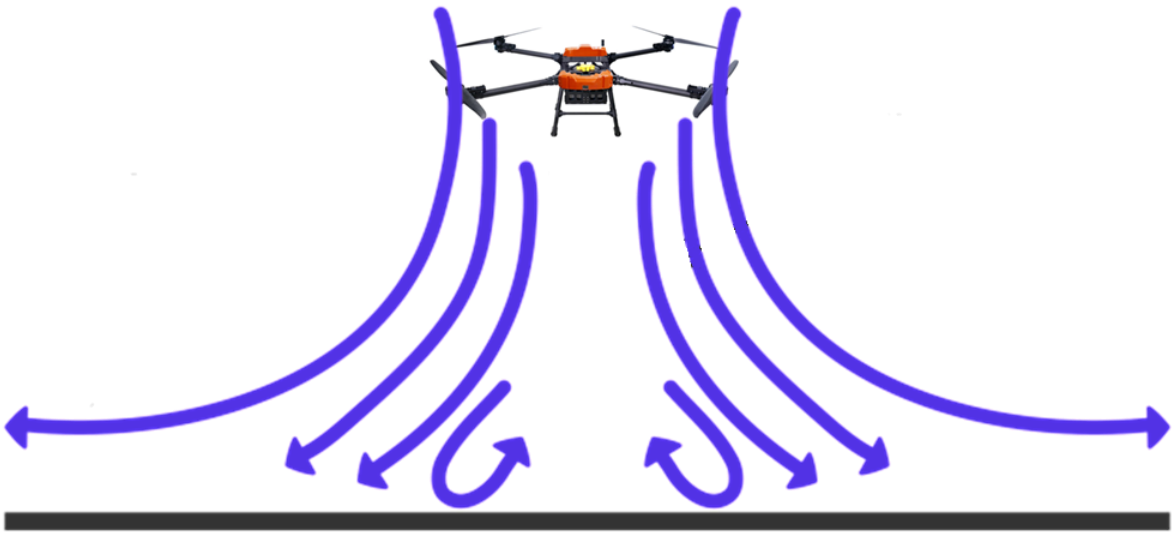


Figura 3.10. *Flujo de aire turbulento por estela de flujo de rotor.*

3.5 Autopilotos

El autopiloto es el centro de control de un vehículo no tripulado y permiten la automatización en la conducción de estos para facilitar el trabajo del piloto. El autopiloto funciona como un intermediario entre el usuario y el vehículo, encargándose de accionar los motores necesarios para que el vehículo realice las operaciones de acuerdo con las necesidades del usuario (Chao et al., 2010).

La mayoría de los autopilotos cuentan con sensores internos como acelerómetros, brújulas, giroscopios, y barómetros, sin embargo, también son capaces de utilizar sensores externos para mejorar su conducción. La figura 3.11 muestra el autopiloto Pixhawk 1 como ejemplo.



Figura 3.11. *Autopiloto Pixhawk 1 (Hawk's Work, s.f.-a.).*

3.6 Plataforma ArduPilot

ArduPilot es una plataforma de código abierto creada en 2009 para autopilotos utilizada para controlar vehículos de diferentes tipos, entre los cuales se incluyen, aeronaves multirotor, aeronaves de ala fija, botes, submarinos, exploradores (rover), y otros (ArduPilot, 2009a).

Esta plataforma permite la creación y utilización de vehículos autónomos no tripulados, proporcionando un software para autopilotos y estaciones terrestres. El usuario debe descargar el firmware del tipo de vehículo a desarrollar e instalarlo en el autopiloto del vehículo. El firmware instalado en el autopiloto cuenta con distintos modos de vuelo, en el caso de aeronaves, los cuales presentan al usuario una amplia variedad de posibilidades para prácticamente cualquier aplicación. De igual forma, se le otorga al usuario la posibilidad de modificar una gran cantidad de parámetros del firmware, lo que lo vuelve muy versátil. Además, al tratarse de una plataforma de código abierto, el usuario es capaz de modificar el firmware de acuerdo con su necesidad.

Uno de los firmwares mayormente utilizados de los que desarrolla esta plataforma es Copter, utilizado para el desarrollo de una amplia variedad de vehículos aéreos no tripulados

de tipo multirotor, por ejemplo, cuadricópteros (de 4 rotores) y hexacópteros (de seis rotores) (ArduPilot, 2009b).

3.7 Raspberry Pi

Raspberry Pi son una serie de computadoras que han cobrado popularidad desde su lanzamiento en 2012 por la fundación Raspberry Pi Foundation establecida en Reino Unido desde el año 2008(Raspberry Pi, 2012).

Las computadoras Raspberry Pi son ordenadores monoplaca con procesadores construidos bajo la arquitectura ARM, ejecutando Linux como su sistema operativo. Pueden ser utilizadas como computadoras de escritorio para tareas cotidianas del hogar, sin embargo, su reducido tamaño y bajo consumo energético las vuelve extremadamente versátiles para todo tipo de aplicaciones, por ejemplo, consolas de videojuegos, servidores de archivos, servidores de cámaras, electrodomésticos inteligentes, entre muchos otros (Raspberry Pi, 2012). Los modelos más recientes cuentan con 5 puertos UART (por sus siglas en inglés, Universal Asynchronous Receiver-Transmitter) que permiten comunicación serial alámbrica e inalámbrica con múltiples dispositivos de manera simultánea. La figura 3.12 muestra una computadora Raspberry Pi 5.



Figura 3.12. *Computadora Raspberry Pi 5 (Raspberry Pi, 2023).*

3.8 Python

Python es un lenguaje de programación de alto nivel desarrollado bajo una licencia de código abierto que ha cobrado una gran popularidad debido a que es sencillo de utilizar, lo cual permite que tanto nuevos programadores como programadores experimentados puedan realizar aplicaciones por medio de él (Python, 2025).

Python cuenta con múltiples paquetes (librerías) en sus repositorios que han sido desarrolladas por terceros para múltiples propósitos, desde la utilización de funciones básicas como la configuración de puertos para comunicación serial o la generación de archivos de valores separados por coma (CSV), hasta otras aplicaciones más específicas y robustas como el control de vehículos no tripulados.

Python se puede utilizar en prácticamente cualquier sistema operativo y eso permite la ejecución de scripts programados con Python en computadoras y servidores que ejecutan distribuciones GNU/Linux, como una Raspberry Pi.

3.8.1 Dronekit

Dronekit es un paquete de Python que permite la conectividad entre una computadora y el autopiloto de un vehículo aéreo no tripulado. Este paquete permite al usuario realizar scripts que permitan el control de vehículos aéreos no tripulados de una manera sencilla con unas pocas líneas de código, permitiendo obtener datos del autopiloto como su geolocalización, el nivel de batería, entre otros. Esto permite el desarrollo de tecnología que involucre la utilización de vehículos aéreos no tripulados para prácticamente cualquier aplicación (Dronekit, 2016).

3.9 Internet de las Cosas (IoT)

El IoT (Por sus siglas en inglés, “Internet of Things”) se define como la red existente entre dispositivos conectados e interoperables entre sí, pudiendo ser identificados en dicha red y siendo capaces de enviar y recibir datos (Li et al., 2015).

El IoT permite el control y monitoreo de dispositivos de uso cotidiano como lo son electrodomésticos de manera remota a través de internet, permitiendo crear aplicaciones que

permitan desde visualizar una videocámara de seguridad a distancia, encender y apagar las luces del hogar o hasta conducir un vehículo de manera remota.

El uso del IoT se apoya del acceso a internet por medio de la cobertura celular que las empresas de telefonía proporcionan en las ciudades, permitiendo que desde cualquier sitio del mundo en donde se cuente con acceso a la red 4G/LTE (4G se refiere a la cuarta generación de tecnología de red celular, y LTE son las siglas del concepto “Long-Term Evolution”) se pueda conectar el usuario a cualquiera de sus dispositivos inteligentes conectados a internet.

Para aprovechar esta tecnología, distintas compañías como Sixfab han desarrollado HATs (por las siglas en inglés de “Hardware Attache don Top”), también llamados “sombreros” en español, que permiten incorporar módems 4G/LTE a computadoras pequeñas como las que desarrolla la compañía Raspberry Pi, así como Dongles USB que permiten el acceso a internet en computadoras por medio de la red 4G/LTE. Un ejemplo de estos dispositivos conectados a una computadora Raspberry Pi se puede observar en la figura 3.13.



Figura 3.13. *HAT 4G/LTE adjunto a una computadora Raspberry Pi 5 (Alsina, 2024).*

El uso de IoT en este proyecto permitirá controlar de manera remota el dron desarrollado, así como transmitir datos en tiempo real desde el dron hacia una estación terrestre como una computadora o un teléfono inteligente que cuenta con conexión a internet.

CAPÍTULO 4. REVISIÓN DEL ESTADO TECNOLÓGICO

4.1 Introducción al capítulo

Este capítulo está basado en el artículo de revisión de patentes realizado por el autor de esta tesis (Altamira-Colado et al., 2024) y tiene como propósito resumir y documentar el proceso mediante el cual se identificaron los vacíos existentes en la literatura de patentes para así fundamentar la propuesta de un modelo de utilidad que haga frente a la afectación que la turbulencia aérea del dron provoca en las mediciones de calidad del aire.

La Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial (2020) establece en su artículo 46 la definición de invención como *"toda creación humana que permita transformar la materia o la energía que existe en la naturaleza, para su aprovechamiento por el hombre y satisfacer sus necesidades concretas".* Además, la LFPPI establece en el artículo 48 las características que una invención debe contener para ser patentable, las cuales son ser producto de una actividad inventiva, ser nuevo, y ser susceptible de aplicación industrial (Ley Federal de Protección a La Propiedad Industrial, 2020).

4.2 Metodología de la revisión

La metodología constó de cuatro etapas: Búsqueda en motores de búsqueda, definición de criterios de inclusión y exclusión, selección de patentes, extracción de la información.

4.2.1 Búsqueda en motores de búsqueda

Se utilizaron tres motores de búsqueda: Google Patents, Patentscope de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI), y la herramienta de búsqueda de patentes de la Oficina de Marcas Comerciales y Patentes de los Estados Unidos (USPTO).

Para realizar las búsquedas se definieron dos bloques de términos en inglés. El primer bloque consta de sinónimos de dron: "drone", "UAV", "aircraft". El segundo bloque consta de los nombres de las sustancias medidas: "PM 2.5", "PM 10".

Combinando los términos utilizando el operador booleano “AND” se definieron seis cadenas de búsqueda: (1) “Drone” AND “PM 10”, (2) “Drone” AND “PM 2.5”, (3) “UAV” AND “PM 10”, (4) “UAV” AND “PM2.5”, (5) “Aircraft” AND “PM 10”, (6) “Aircraft” AND “PM 2.5”.
Todas las cadenas de búsqueda fueron adaptadas para cada motor de búsqueda.

4.2.2 Definición de criterios de inclusión y exclusión

Para realizar la selección de patentes se definieron los criterios de inclusión y exclusión que se muestran en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. *Criterios de inclusión y exclusión.*

Inclusión	Exclusión
Debe incluir sensores de MP (MP_{10}, $MP_{2.5}$)	Sensores estáticos
Los sensores deben de estar colocados en el vehículo aéreo no tripulado	Monitoreo del aire en interiores
Todas las patentes sin importar el idioma son tomadas en cuenta	

4.2.3 Selección de patentes

El proceso de selección de patentes se llevó a cabo utilizando una metodología similar a la “PRISMA Extension for Scoping Reviews (PRISMA-SCR)”. La Figura 4.1 muestra el diagrama de flujo de las distintas etapas llevadas a cabo.

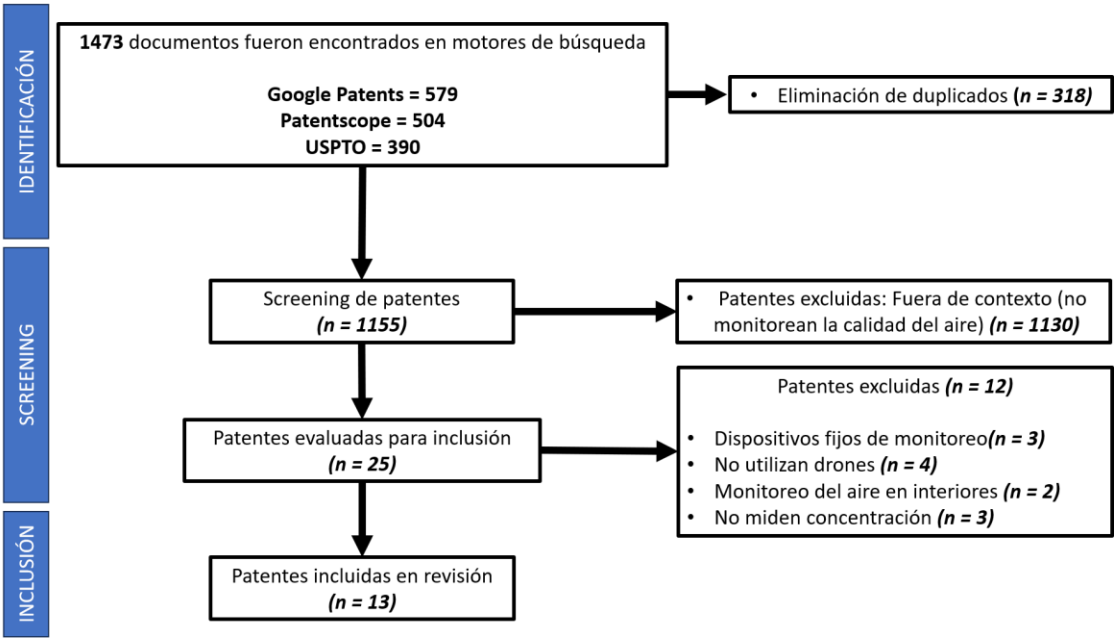


Figura 4.1. *Diagrama de flujo de selección de patentes a incluir en la revisión (Altamira-Colado et al., 2024).*

4.2.3 Extracción de información

En esta sección se buscó extraer la siguiente información de cada patente: número, país, título, estado (otorgada o en proceso), fecha de otorgamiento, inventor(es), apoderado, tipo de dron, tecnología de operación de sensores de MP y substancia(s) detectada(s). La información a extraer fue seleccionada para identificar el estado tecnológico actual de patentes en el campo del monitoreo de la calidad del aire asistido por drones.

4.3 Resultados de la revisión

Se revisaron 13 patentes que cumplieron con los criterios de inclusión y exclusión. La patente más antigua encontrada en el campo técnico del monitoreo de la calidad del aire asistido por drones fue otorgada en 2019.

Se identificó que el $MP_{2.5}$ y el MP_{10} son los contaminantes medidos con mayor frecuencia debido a que representan un riesgo significativo a la salud humana al ser inhalados, pues la exposición por periodos prolongados a $MP_{2.5}$ y MP_{10} ha sido vinculada a enfermedades respiratorias y enfermedades cardiovasculares.

Entre las patentes revisadas, ninguna menciona la inclusión de un método para hacer frente a la turbulencia provocada por el movimiento de las hélices del vehículo; sin embargo, una patente incluye el parámetro de la velocidad y dirección del viento en las mediciones realizadas ya que toma en cuenta que este afecta a las mediciones.

Solamente el 53.84% de las patentes revisadas mencionan el tipo de dron utilizado, de las cuales el 71.42% utilizan dron de tipo multirotor.

En cuanto a la tecnología de funcionamiento de los sensores de MP, solamente dos patentes la especifican, tratándose una de un sensor óptico laser, y otra de un sensor óptico infrarrojo.

Finalmente, ninguna de las patentes revisadas menciona la inclusión de un ciclón para separar partículas y asegurar la precisión de las mediciones de MP

4.3.1 Aspectos generales

Con base en la información extraída, el contaminante atmosférico de mayor interés es el MP. Sin embargo, el método de operación de los sensores no es especificado por la mayoría de los inventores, lo cual es importante para evaluar la fiabilidad de las mediciones que estos realicen. Solamente dos patentes especifican que los sensores de MP utilizados trabajan con láser y luz infrarroja respectivamente, pero no se menciona su se utilizan sensores de bajo costo.

Aunque solamente pocos sensores de bajo costo han sido evaluados, sus mediciones han mostrado una alta correlación con las realizadas por instrumentos de grado de investigación. Por este motivo, utilizar sensores de bajo costo podría disminuir el costo del monitoreo de la calidad del aire asistido por drones sin comprometer la precisión de la información.

Ninguna patente especifica la capacidad de carga del dron, la cual es una característica crítica para asegurar la estabilidad de un dron multirotor, y una capacidad de carga reducida implicaría un número limitado de componentes que el dron puede cargar. Sin embargo, una patente menciona que el dron de ala fija utilizado cuenta con una elevada capacidad de carga, pero no especifica cuál es.

La mayoría de los drones utilizados en el monitoreo de la calidad del aire son de tipo multirotor debido a que pueden desplazarse en un espacio vertical con mayor facilidad que los drones de ala fija, a pesar de que los drones de ala fija son capaces de viajar mayores distancias.

Vale la pena notar una de las patentes revisadas incluye la dirección y velocidad del viento para tomar en consideración la afectación que este pueda presentar durante las mediciones.

La mayoría de las patentes revisadas enfocan su innovación en mejorar distintos aspectos de sistemas ya existentes de monitoreo de la calidad del aire, o proponen métodos específicos para obtener información como mapas de la distribución espacial de los contaminantes detectados. Sin embargo, no están enfocadas en realizar mejoras que aseguren una buena precisión de los datos obtenidos De hecho, no se menciona información acerca de la calibración de los instrumentos de medición e incluso algunas patentes establecen que el tipo de sensor puede variar de acuerdo con las necesidades del usuario.

4.4 Propuesta de modelo de utilidad

4.4.1. Modelo de utilidad basado en carrete

El modelo de utilidad consiste en un dron que en su cara inferior tiene adjunto un mecanismo basado en un carrete que permite distanciar del dron sensores de calidad del aire y sensores de parámetros meteorológicos. El modelo de utilidad consta de los 7 componentes que a continuación se enlistan:

1) Carrete
2) Cuerda
3) Motores de corriente directa
4) Controlador
5) Sujetadores
6) Módulo de sensores ambientales

7) Dron

La figura 4.2 muestra una vista frontal del modelo de utilidad en la que se muestran los componentes del mismo para su correcto funcionamiento. La completa descripción del modelo de utilidad se puede encontrar en el visor del IMPI.

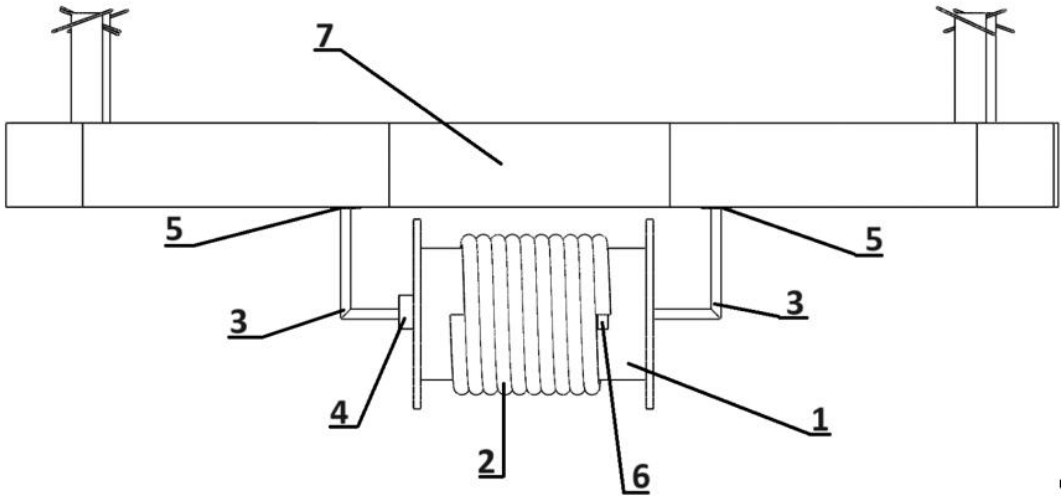


Figura 4.2. *Vista frontal del modelo de utilidad basado en carrete.*

CAPÍTULO 5. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describen los componentes y materiales utilizados para el ensamblaje del dron, el software que integran dicho vehículo y la estación terrestre, el software que fue utilizado para su programación, el ensamblaje y programación, y las pruebas de vuelo y de medición de material particulado.

5.1 Selección de materiales y componentes

A continuación, se indican todos los componentes utilizados para conformar el vehículo aéreo no tripulado.

5.1.1 Armazón F450

Se seleccionó el armazón F450 de DJI por su capacidad de carga y su disponibilidad en el mercado. La figura 5.1 muestra el armazón F450 con cuatro rotores y cuatro hélices.



Figura 5.1. *Armazón F450 con rotores y hélices (DJI, 2025).*

El armazón F450 se compone de 4 brazos de nylon 66 y cuenta con dos placas de circuito impreso centrales que permiten la conexión entre una batería y los rotores del vehículo. Además, el tablero central cuenta con suficiente espacio para la colocación de un autopiloto y otros componentes como una computadora, un módulo de conexión celular 4G, entre otros, y entre los tableros superior e inferior cuenta con espacio para colocar y ajustar una batería. El peso del armazón es de aproximadamente 280 gramos y tiene unas dimensiones de 450 milímetros de ancho y 55 milímetros de alto (Matha Electronics, 2025).

Para poder utilizar la cara inferior del armazón, se le colocó un tren de aterrizaje que permita que dicha cara no se encuentre en contacto con el suelo mientras el vehículo se encuentre en el suelo.

5.1.2 Motores

Se utilizaron cuatro motores sin escobillas A2212-920KV de la compañía "Hawk's Work", de los cuales dos fueron motores CW (giro en sentido horario) y dos CCW (giro en sentido antihorario). La figura 5.2 muestra un motor sin escobillas CW.



Figura 5.2. *Motor sin escobillas A2212-920KV CW (Hawk's Work, s.f.-b).*

Cada motor es controlado por un control electrónico de velocidad (ESC) encargado de regular la velocidad de giro del motor a través de modulación de ancho de pulso (PWM).

5.1.3 Hélices

Las hélices utilizadas han sido las 9450 de DJI, las cuales se muestran en la figura 5.3 y tienen un diámetro 24 centímetros y están hechas de caucho termoplástico. Las hélices marcadas de color negro son hélices cuyo giro es en sentido horario, mientras que las de color plateado giran en sentido antihorario.



Figura 5.3. *Hélices 9450 (Hawk's Work, s.f.-c).*

5.1.4 Autopiloto

El autopiloto utilizado ha sido el Pixhawk (llamado también "Pixhawk 1") en su versión 2.4.8, del cual se utilizaron los puertos TELEM 2, GPS, I2C, BUZZER, SWITCH, y POWER de la cara frontal, mientras que de la cara inferior se utilizaron cuatro canales analógicos principales y el canal RC para la conexión con el control remoto.

El autopiloto Pixhawk 1 fue lanzado en la primera generación de autopilotos Pixhawk por la empresa 3DR. Es una plataforma de código abierto que cuyo firmware se encuentra basado en el sistema operativo Linux. Al ser un autopiloto con tiempo en el mercado, su precio es accesible y cumple con las necesidades del proyecto. La figura 5.4 muestra el autopiloto Pixhawk 1 en su versión 2.4.8, mientras la tabla 5.1 muestra sus características principales.



Figura 5.4. *Vista frontal del autopiloto Pixhawk 1 (versión 2.4.8) (Hawk's Work, s.f.-a).*

Tabla 5.1. *Características principales del autopiloto Pixhawk 1 (versión 2.4.8).*

Procesador	• Cortex M4 de arquitectura ARM de 32 bits • Memorias Flash de 2 MB y RAM de 168 MHz y 258 KB • Coprocesador de seguridad contra fallos de 32 bits
Sensores	• Módulo MPU6000 como acelerómetro y giroscopio principal. • Giroscopio de 16 bits • Magnetómetro de 14 bits • Barómetro
Potencia y alimentación	• Controlador de diodos de conmutación automática de errores • Riel para servomotor de alta potencia y corriente • Protección contra descarga electrostática de todos los puertos para periféricos
Puertos e interfaces	• 5 puertos UART para comunicación serial • Entrada de receptor satelital • Puerto SBUS • Encoder PPM • Receptor de señal de radio para control remoto • 1 puerto I2C • 1 puerto SPI • puertos CAN • 1 puerto USB • Entrada para convertidor analógico-digital de 3.3 V y 6.6 V
Dimensiones	• Peso: 38 gramos • Ancho: 50 milímetros • Alto: 15.5 milímetros • Largo: 81.5 milímetros

5.1.5 Computadora

Se utilizó una computadora Raspberry Pi 4 modelo B de 4 gigabytes. De esta computadora se utilizaron 2 puertos UART y un puerto USB. La computadora ejecuta el sistema operativo Raspberry Pi OS basado en la distribución de Linux Debian en su versión 11 (bullseye). La figura 5.5. muestra una computadora Raspberry Pi 4 modelo B.



Figura 5.5. *Computadora Raspberry Pi 4 modelo B (Raspberry Pi, 2025).*

5.1.6 Módulo 4G/LTE

Para que la computadora del vehículo tenga la capacidad de permanecer conectada a internet en sitios con cobertura móvil, se utilizó el HAT 4G/LTE Cellular Modem Kit for Raspberry Pi fabricada por la empresa móvil especializada en servicio de IoT Sixfab.

El HAT cuenta con un módulo Telit LE910 compatible con las frecuencias LTE que utilizan los operadores celulares en la región de Norte América. La figura 5.6 muestra el HAT montado en una computadora Raspberry Pi 4 modelo B.



Figura 5.6. *HAT 4G/LTE montado en Raspberry Pi 4 modelo B (Sixfab, 2024).*

5.1.7 Batería

Para alimentar todos los componentes electrónicos del vehículo aéreo no tripulado se utilizó una batería de polímero de litio (LiPo) de tres celdas (11.1 V), una capacidad de 4200 miliamperios hora, y una tasa de descarga de 35 veces su capacidad por hora (35C). La figura 5.7 muestra la batería utilizada.



Figura 5.7. *Batería LiPo utilizada.*

5.1.8 GPS (Sistema de Posicionamiento Global)

Para conocer las coordenadas geográficas del dron se utilizó un módulo de GPS M8N con brújula integrada, el cual permite utilizar los modos de vuelo que requieren conocer la ubicación geográfica del autopiloto, por ejemplo, el modo de vuelo guiado por coordenadas. La figura 5.8 muestra el módulo GPS utilizado.



Figura 5.8. *Módulo GPS M8N (Hawk's Work, s.f.-d).*

5.1.9 Sensor de MP

El sensor de MP utilizado fue el sensor PAS-OUT-01 que es fabricado por la compañía Prana Air y mide la concentración de $MP_{2.5}$ y MP_{10} en exterior. Este sensor cuenta con dos modos de operación: continuo y Q&A (Pregunta y Respuesta), en donde el modo continuo se encarga de enviar a un dispositivo externo datos de concentración de MP automáticamente cada segundo, mientras que en modo Q&A envía el dato de concentración de MP cuando recibe el comando del dispositivo externo. El rango de medición del sensor es de 0 a 31'000 $\frac{\mu g}{m^3}$ con una resolución de 1 $\frac{\mu g}{m^3}$. Sus dimensiones son de 45 mm x 45 mm x 12 mm y su peso es de 26 gramos. El sensor recibe comandos y envía datos por medio de comunicación serial utilizando su puerto UART. (Prana Air, 2025). El sensor PAS-OUT-01 se muestra en la figura 5.9.



Figura 5.9. *Sensor PAS-OUT-01 (Prana Air, 2025).*

5.1.10 Carrete

Para llevar a cabo la incorporación de un mecanismo como el modelo de utilidad propuesto en el capítulo 4, se utilizó un carrete electromecánico tipo cabrestante de servomotor que permita el giro de dicho motor en ambos sentidos de acuerdo con la polaridad de la alimentación de este, con el torque necesario para prevenir oscilaciones y permitiendo sostener la carga de un sistema de monitoreo de material particulado.



Figura 5.10. *Carrete utilizado.*

5.2 Ensamblaje del dron

Siguiendo las instrucciones del fabricante, se ensambló el armazón F450 en el cual se colocaron los rotores con las hélices, el autopiloto, y el GPS. Además, se colocó un buzzer, una plataforma antivibracion, un receptor de control remoto, y una cuerda de seguridad.

5.3 Instalación de sistema operativo en computadora

En la computadora Raspberry Pi 4 modelo B se instaló el sistema operativo Raspberry Pi OS (Raspbian) GNU/Linux 11 (bullseye) AArch64 en su versión lite utilizando el software Raspberry Pi Imager y una tarjeta de memoria Micro SD de 32 gigabytes.

Durante la instalación del sistema operativo, se realizó la activación del protocolo SSH (Secure Shell) para permitir la conexión remota a la computadora, protocolo que fue utilizado con claves de acceso cuya configuración se describe en la sección 5.6. También se definió un usuario llamado “pi” y una contraseña de acceso para realizar las configuraciones iniciales, y el nombre del sistema fue “raspberrypi”

La figura 5.11 muestra las características del sistema operativo instalado en la computadora Raspberry Pi.

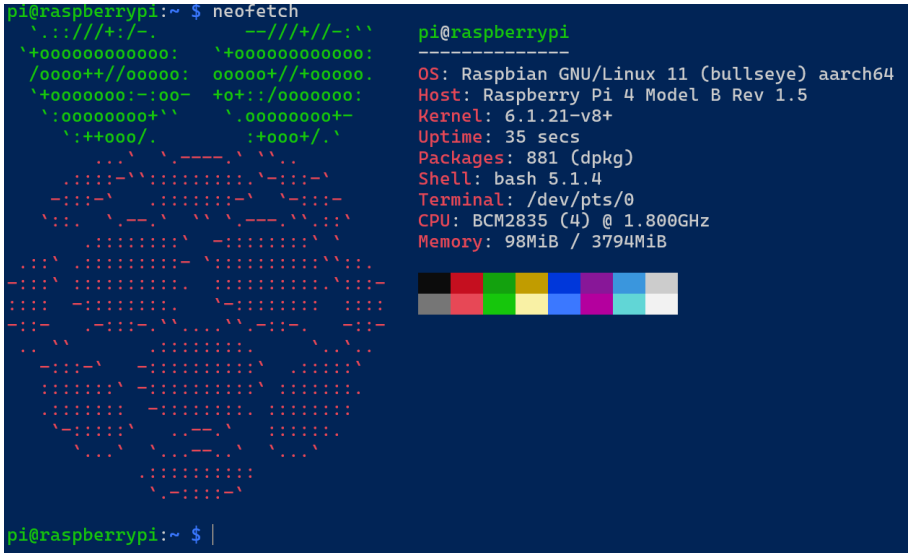


Figura 5.11. *Características del sistema operativo.*

5.4 Conexión del autopiloto a la computadora

La conexión del autopiloto a la computadora se efectuó utilizando los puertos UART3 y UART2 de la computadora y del autopiloto respectivamente. La comunicación se realizó utilizando el protocolo MAVLink (por sus siglas en inglés, Micro Air Vehicle Link), el cual

permite la comunicación entre una estación terrestre y un dron mediante el software mavproxy. La figura 5.12 muestra la arquitectura de comunicación autopiloto-computadora.



Figura 5.12. *Arquitectura de comunicación autopiloto-computadora.*

5.4.1 Conexión física entre el autopiloto y la computadora

El autopiloto, como se mencionó anteriormente, se conectó mediante su puerto UART2 al puerto UART3 de la computadora. La figura 5.13 muestra el diagrama de conexión del autopiloto a la computadora.

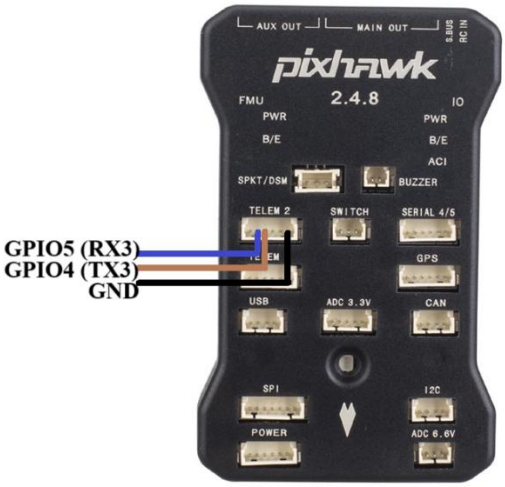


Figura 5.13. *Diagrama de conexión del puerto UART2 del autopiloto hacia las terminales del puerto UART3 de la computadora.*

5.5 Instalación de HAT 4G/LTE

Se colocó el HAT 4G/LTE sobre la computadora. Para realizar la instalación del software Sixfab CORE que permitiera la conexión a internet de la computadora a través del HAT 4G/LTE, se registró la tarjeta SIM en la plataforma del fabricante como lo indica el mismo en las instrucciones (Sixfab, 2024).

Tras registrar la tarjeta SIM en la plataforma de Sixfab, se utilizó el comando de instalación proporcionado por el fabricante para instalar los controladores en la computadora. Una vez completada la instalación del controlador Sixfab CORE se verificó que el dispositivo fuera identificado en la plataforma de Sixfab. La figura 5.14 muestra la interfaz de la plataforma Sixfab CORE en donde se observa que el dispositivo se encuentra activo y conectado y que se encuentra utilizando la nueva interfaz de red instalada llamada “wwan0”.

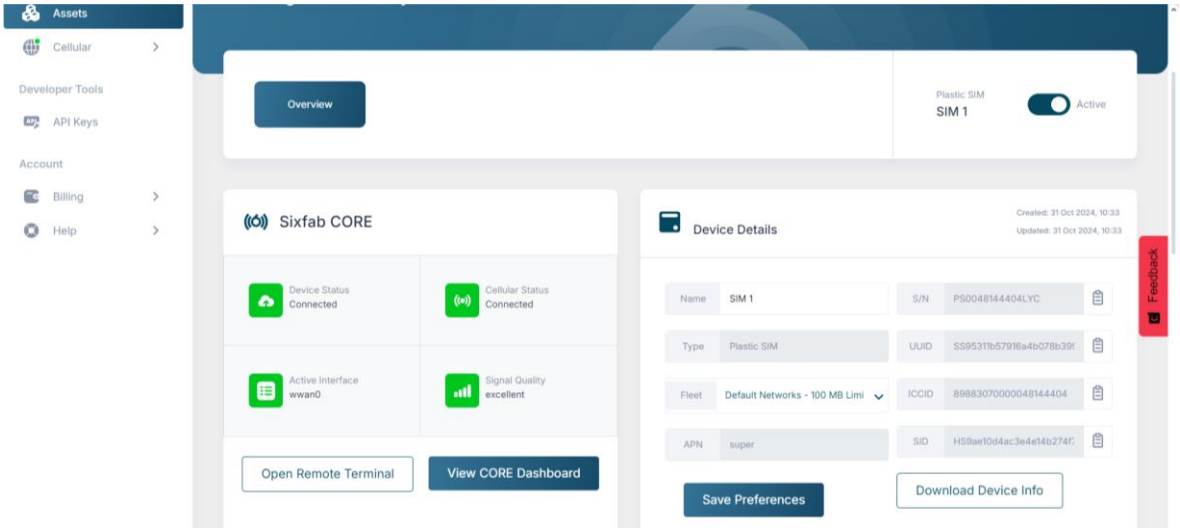


Figura 5.14. *Interfaz de plataforma Sixfab CORE.*

La figura 5.15 muestra las interfaces de red activas al utilizar el comando de Linux “`ifconfig`”, en donde se puede observar la presencia de la interfaz de red “`wwan0`”.

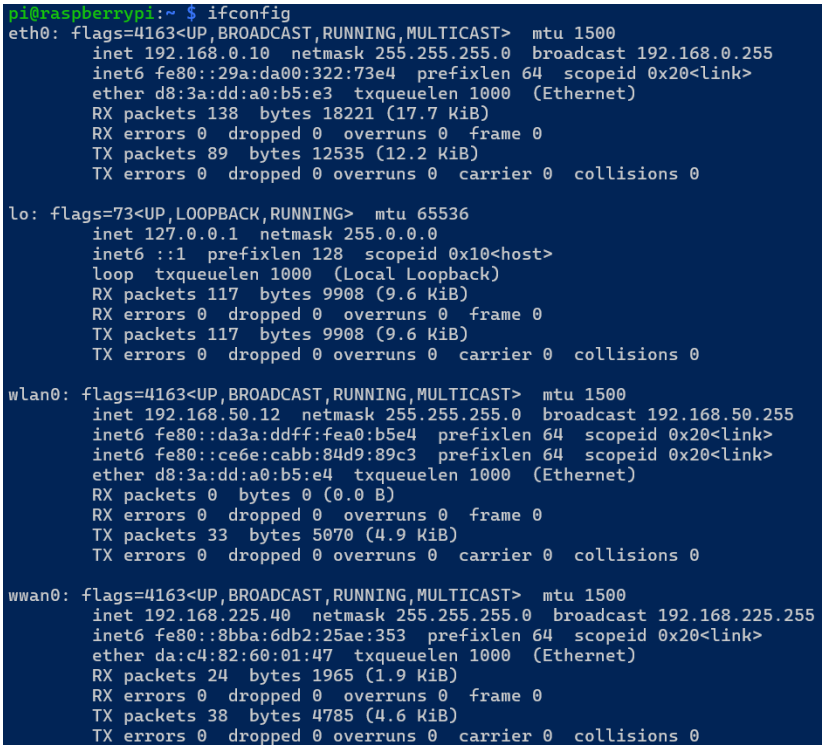


Figura 5.15. *Interfaces de red activas en computadora Raspberry Pi 4B.*

5.6 Conexión inalámbrica entre la computadora del dron y la estación terrestre

En esta sección se describe la conexión realizada entre la estación terrestre y la computadora del dron. La estación terrestre consiste en una computadora de escritorio que utiliza el sistema operativo Windows 11 de la compañía Microsoft.

5.6.1 Uso de claves públicas y privada para acceso remoto a terminal

Como se mencionó en la sección 5.3, es necesario utilizar las claves pública y privada para acceder mediante el protocolo SSH a la computadora del dron dado que, si no se utilizan, se solicitaría ingresar la contraseña de acceso, lo cual no permitiría la automatización de la conexión entre la estación terrestre y el dron.

Se generaron claves de acceso de tipo RSA de 2048 bits tanto en la computadora del dron como en la estación terrestre.

El contenido de cada clave pública generada en cada dispositivo se colocó en el archivo “authorized_keys” del otro dispositivo (“administrators_authorized_keys” en el caso de la estación terrestre).

5.6.2 Generación de túnel SSH inverso.

Debido a que la computadora del dron se encuentra conectada a internet por medio del HAT 4G/LTE, no cuenta con una dirección IP pública conocida, por lo tanto, no es posible conectarse a la computadora del dron directamente por medio del protocolo SSH desde la estación terrestre. En cambio, la estación terrestre se encuentra conectada a internet por medio de un enrutador doméstico cuya IP pública sí es conocida, por lo tanto, la computadora del dron sí se puede conectar directamente a través de internet a la estación terrestre utilizando el protocolo SSH.

Para lograr la conexión entre la estación terrestre y la computadora del dron se realizó un túnel SSH inverso en el que la computadora del dron se conecta a la estación terrestre a través de su IP pública redirigiendo las conexiones desde el puerto UDP 2222 de la estación terrestre, el cual fue seleccionado arbitrariamente, hacia el puerto UDP 22 de la computadora del dron, el cual es el puerto que utiliza el protocolo SSH de manera predeterminada.

La figura 5.16 muestra el diagrama de comunicación entre la estación terrestre y la computadora del dron.

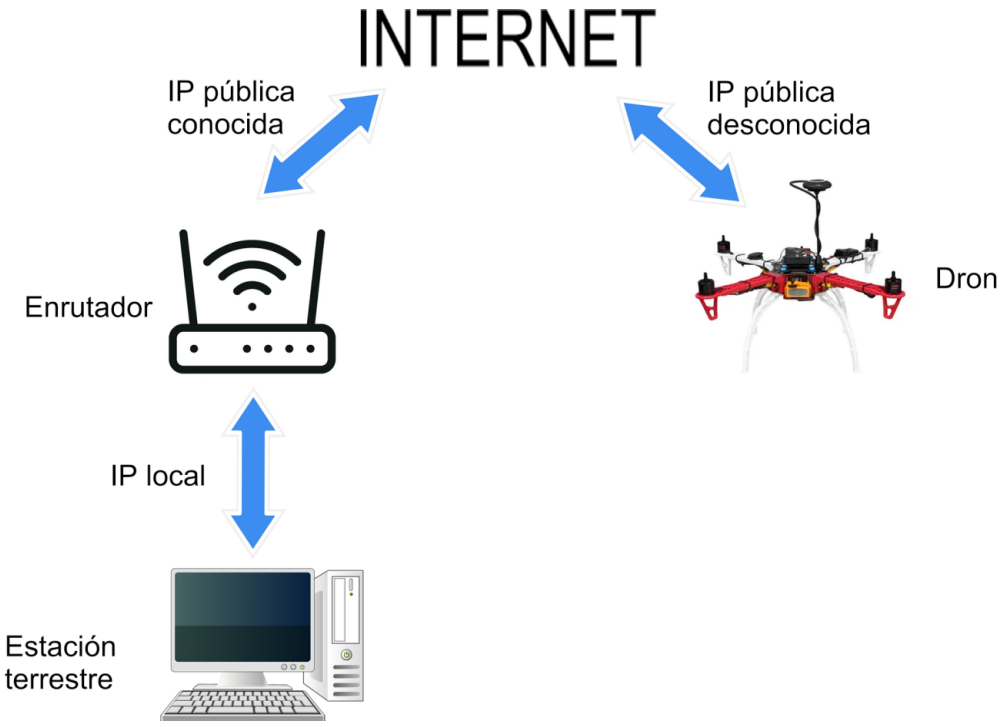


Figura 5.16. *Diagrama de comunicación entre estación terrestre y dron.*

5.7 Conexión con estación terrestre

La estación terrestre utiliza el software Mission Planner en su versión 1.3.82.

La conexión a la estación terrestre se realizó a través del puerto UDP 3535. Al estar a la escucha en dicho puerto, la estación terrestre se conecta al dron y muestra en la interfaz de Mission Planner toda la información del autopiloto, como se muestra en la figura 5.17.



Figura 5.17. *Interfaz del software Mission Planner 1.3.82 durante una misión.*

5.8 Pruebas de vuelo

Todas las pruebas descritas en esta sección que fueron realizadas en exterior se realizaron mientras no había precipitación (lluvia) y la velocidad del viento era menor a $10\ \frac{km}{h}$ de acuerdo con la información climatológica consultada en el Sistema Meteorológico Nacional (SMN) (Sistema Meteorológico Nacional, s.f.). La tabla 5.2 muestra la descripción de cada uno de los modos de vuelo mencionados en esta sección.

Tabla 5.2. *Descripción de los modos de vuelo mencionados durante las pruebas de vuelo.*

Modo de vuelo	Descripción
Stabilize	Otorga al usuario control manual de alabeo, cabeceo, guiñada, y aceleración, nivelando automáticamente el alabeo y guiñada cuando no se mueven las palancas del control remoto.
Loiter	Otorga al usuario control manual del alabeo, cabeceo, guiñada, y aceleración, manteniendo fijas la posición y altura con ayuda del GPS mientras no se muevan de la posición central las palancas del control remoto.
Guided	El dron responde únicamente a comandos enviados desde la estación terrestre, desplazándose hacia las coordenadas y altura que se indiquen desde esta. El dron ignora las palancas del control remoto.
Auto	El dron realiza una misión de vuelo especificada desde la estación terrestre. El dron ignora las palancas del control remoto.
Land	El dron desciende lentamente hasta llegar al suelo. Al llegar al suelo, apaga los rotores.
RTL (Return To Launch)	El dron ajusta su altura a 15 metros respecto al punto de despegue y posteriormente se desplaza hacia el punto de despegue y se mantiene en el aire. Este modo de vuelo suele activarse de manera predeterminada por seguridad cuando el nivel de batería es bajo o cuando el dron pierde señal del control remoto o de la estación terrestre.

5.8.1 Prueba de vuelo manual

Para el vuelo manual del dron se utilizó el control remoto FS-I6X de la compañía Fly Sky. El control utiliza 3 interruptores de 2 posiciones, 1 interruptor de 3 posiciones, y dos palancas. La figura 5.18 muestra una imagen del control remoto, y la tabla 5.3 muestra la asignación de funciones al control remoto.



Figura 5.18. *Control remoto FS-I6X.*

Tabla 5.3. *Asignación de funciones al control remoto.*

Posición/ sentido	Interruptor 1	Interruptor 2	Interruptor 3	Interruptor 4	Palanca izquierda	Palanca derecha
Arriba	Desactivado	Desactivado	Modo de vuelo: Stabilize	Evasión de obstáculos desactivada	Incrementar aceleración	Incrementar ángulo de cabeceo
Abajo	Modo de vuelo: RTL	Modo de vuelo: Land	Modo de vuelo: Loiter	Evasión de obstáculos activada	Disminuir aceleración	Disminuir ángulo de cabeceo
Centro	No aplica	No aplica	Modo de vuelo: Guided	No aplica	No aplica	No aplica
Derecha	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	Incrementar ángulo de guiñada	Incrementar ángulo de alabeo
Izquierda	No aplica	No aplica	No aplica	No aplica	Disminuir ángulo de guiñada	Disminuir ángulo de alabeo

Las pruebas de vuelo manual se realizaron utilizando el modo Loiter, el cual, como se indica en la tabla 5.2, regula de manera automática la aceleración del dron mientras la palanca se encuentre en posición central, mientras que otorga control manual al usuario del alabeo, cabeceo, y guiñada por medio del control remoto, utilizando el GPS para mantener la posición del dron mientras el usuario no modifique el alabeo, cabeceo, y guiñada. Se registró la ubicación del dron indicada por el GPS mientras el dron se mantenía suspendido en una posición fija.

5.8.2 Pruebas de precisión de posición durante vuelo automático

Para conocer la precisión del modo de vuelo Auto por coordenadas geográficas se planeó una misión que consistió en despegar el dron en la ubicación 32.63298, -115.437886 hasta una altura de 10 metros y posteriormente dirigirse hacia la ubicación final especificada por las coordenadas 32.6325929, -115.437726. Dichas coordenadas

corresponden a ubicaciones de la pista de atletismo de la UABC campus Mexicali. La figura 5.19 muestra la trayectoria de la misión en el mapa. En la ubicación final se colocó un helipuerto y se midió la distancia desde el centro del helipuerto hasta el centro del dron tras aterrizar. La prueba se repitió 30 veces.



Figura 5.19. *Trayectoria de misión para pruebas de precisión geográfica.*

5.8.3 Pruebas de tiempo y distancia máximos de vuelo

Para conocer el tiempo de vuelo máximo y la distancia máxima que se puede alcanzar con una batería de 11.1 V y una capacidad de 4200 mAh se planeó una misión que consiste en recorrer una trayectoria hasta que la batería alcance un voltaje menor que 10.0 V, momento en el que el dron cambiará al modo de vuelo Land. La misión consta de los siguientes pasos:

1. Despegar hasta una altura de 12 metros.
2. Dirigirse hacia el punto de ruta ubicado en 32.6328088 °, -115.4378101 °
3. Dirigirse hacia el punto de ruta ubicado en 32.6318115 °, -115.4378705 °

4. Dirigirse hacia el punto de ruta ubicado en 32.6318533 °, -115.436976 °
5. Dirigirse hacia el punto de ruta ubicado en 32.6328065°, -115.4370645 °
6. Regresar al paso 2.

Se registró el tiempo desde el momento despegue del dron hasta que se activó el modo de vuelo Land, y se registró la distancia recorrida indicada en la estación terrestre. La figura 5.20 muestra la trayectoria de la misión.

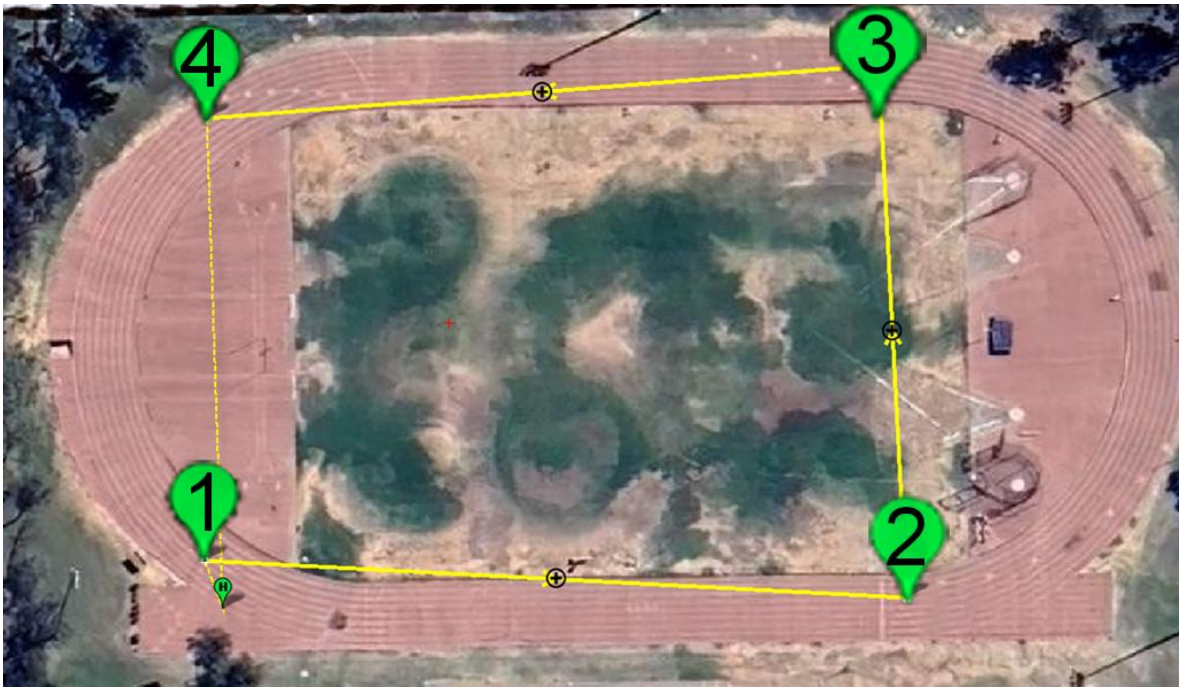


Figura 5.20. *Trayectoria de misión para pruebas de tiempo y distancia máximos de vuelo.*

5.9 Pruebas de medición de MP

Para realizar y validar mediciones de MP se realizaron dos sistemas idénticos. Cada sistema constó de un Sensor PAS-OUT-01, una batería LiPo de 7.4 volts y capacidad de 1000 mAh, un regulador de voltaje de 5 volts y un módulo de comunicación bluetooth HC-05. A uno de los sistemas se le denominó “dron” y al otro sistema se le denominó “globos”, el cual funcionó como control. Todas las mediciones se realizaron a una frecuencia de 1 muestra por segundo de manera simultánea con ambos sistemas durante 30 intervalos de 30 segundos, y se obtuvo un par de muestras dependientes en las que cada elemento de la muestra

corresponde al promedio de concentración detectado en cada intervalo de 30 segundos. La figura 5.21 muestra el diagrama de conexión de cada sistema, mientras que la figura 5.22 muestra la fotografía de uno de los sistemas integrados.

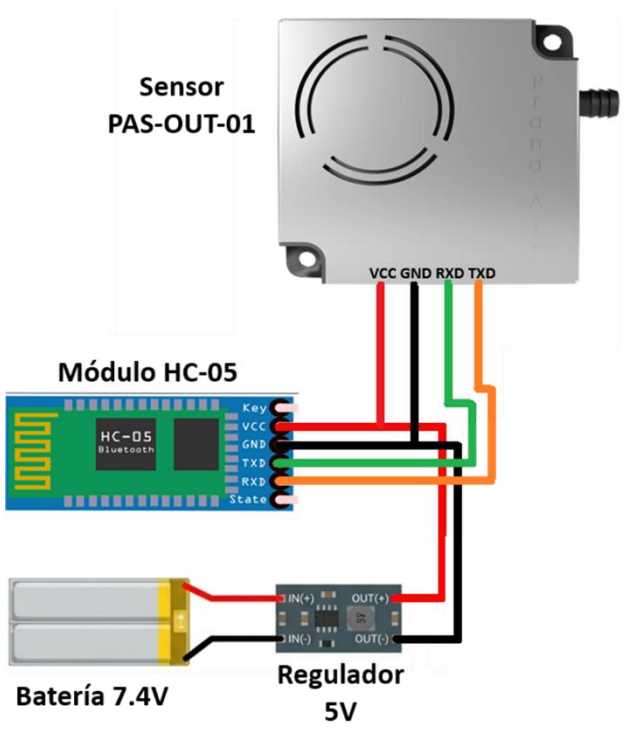


Figura 5.21. *Diagrama de sistema para medición de MP.*

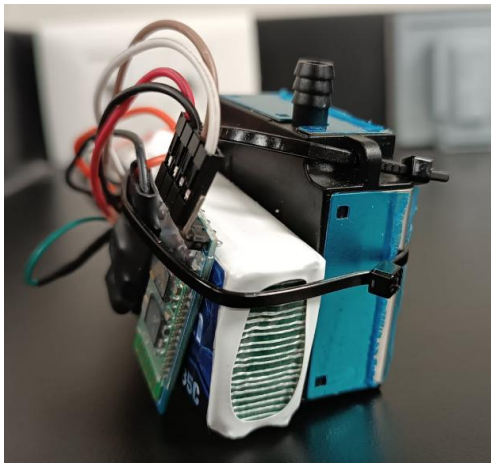


Figura 5.22*. Sistema para medición de MP.*

5.9.1 Prueba de medición con sensores en cámara de calibración con ambiente controlado

Aunque el fabricante del sensor indica que este cuenta con calibración de fábrica, se realizaron pruebas de medición en una cámara de calibración con ambiente controlado para verificar que ambos sensores funcionan adecuadamente y realizan mediciones consistentes entre ellos (Cuevas-González et al., 2025).

La cámara de calibración fue descontaminada por aspiración para remover el MP de dentro de ella y posteriormente se colocaron ambos sistemas dentro de la cámara de calibración, como se muestra en la figura 5.23. Se realizaron mediciones de MP con los sensores de manera simultánea durante 15 minutos.



Figura 5.23. *Sistemas colocados dentro de cámara de calibración durante la prueba de consistencia.*

Durante los primeros 5 minutos, no se introdujeron partículas a la cámara de calibración, y a partir del minuto 6 se introdujeron gradualmente partículas de látex y poliestireno de 0.46 micrómetros de diámetro.

Mientras se introducía MP al interior de la cámara de calibración, los sensores continuaron realizando mediciones durante los siguientes 10 minutos hasta completar 15 minutos. Se determinó el valor medio de cada intervalo de 30 mediciones (30 segundos) de

cada contaminante, es decir, se obtuvieron una muestra de concentración de $MP_{2.5}$ y una de MP_{10} de cada sensor.

5.9.2 Pruebas de medición simultáneas en exterior

Para realizar mediciones de MP en exterior con ambos sistemas mencionados en la sección 5.1.11 de manera simultánea, se diseñó el experimento que a continuación se describe:

Las mediciones se realizaron en exterior, específicamente al poniente del Instituto de Ingeniería de UABC campus Mexicali (ver figura 5.24).



Figura 5.24. *Ubicación de experimentos de evaluación del efecto del dron en las mediciones de calidad del aire.*

El sistema “dron” se colocó en un carrete electrónico y dicho carrete se adjuntó al dron mediante su cara inferior como se muestra en la figura 5.25. La intención de colocar el sensor en un carrete fue que la distancia entre el sistema “dron” y el dron sea variable.

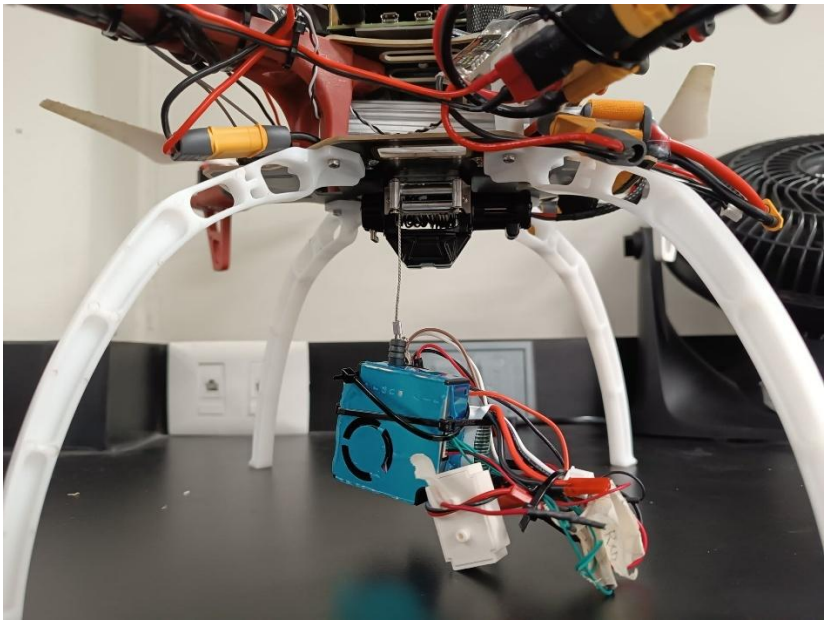


***Figura 5.25**. Sistema "dron" colocado en el dron.*

El sistema "globos" se colgó de globos de 36 pulgadas de diámetro llenados con helio. El sistema "globos" se utilizó para realizar mediciones de MP que actuaran como control en la comparación de mediciones de MP al no ser afectado por el flujo aéreo que produce el dron por el movimiento de los rotores durante el vuelo.

Las mediciones se realizaron con ambos sistemas de manera simultánea colocando ambos sistemas a una altura de dos metros respecto al suelo y una separación de 5 metros entre ellos, obteniendo así muestras pareadas. La altura de 2 metros fue seleccionada debido a que es el límite inferior de altura respecto al suelo que define la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) para la instalación de sensores de MP (EPA, 2017). La figura 5.26 muestra el montaje inicial para realizar las pruebas de mediciones de MP descritas.



Figura 5.26*. Montaje inicial de pruebas de medición de MP.*

Se realizaron mediciones durante 30 intervalos de 30 segundos de manera simultánea con ambos sistemas manteniendo una distancia de cero metros entre el sistema "dron" y el dron. Posteriormente, se repitieron las mediciones realizando incrementos de 1 metro cada 30 intervalos de 30 segundos hasta una distancia de 7 metros, obteniendo ocho pares de muestras, uno para cada distancia.

Debido a la naturaleza de la variable medida (concentración de MP), se utilizó la prueba estadística no paramétrica de rangos con signo de Wilcoxon (1945) para comparar las mediciones de ambos sistemas. Con la prueba de rangos con signo de Wilcoxon se buscó conocer si existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de que la mediana de las diferencias entre las mediciones de cada sistema se distribuye simétricamente alrededor de cero, mientras que con la prueba de Shapiro-Wilk se buscó conocer si existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula de que los elementos de cada muestra se distribuyen de manera normal.

El valor de significancia utilizado para todas las muestras fue $\alpha = 0.05$ para mantener un balance adecuado entre sensibilidad estadística y riesgo de falsos positivos, siendo un valor ampliamente aceptado en la literatura científica (Fisher, 1925). Se determinó también el error porcentual absoluto medio del arcotangente (MAAPE) considerando que el sistema "globos" mide la concentración de MP actual y el sistema "dron" intenta predecir el valor de

concentración de MP actual. También se determinó el valor de correlación de Spearman entre las mediciones de ambos sistemas y la mediana de las diferencias de estos.

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

6.1 Ensamblaje y funcionamiento del dron

El dron ensamblado es capaz de volar y de ser guiado de manera remota por medio de coordenadas geográficas. La figura 6.1 muestra el dron ensamblado, mientras que la figura 6.2 muestra al dron volando durante una misión.

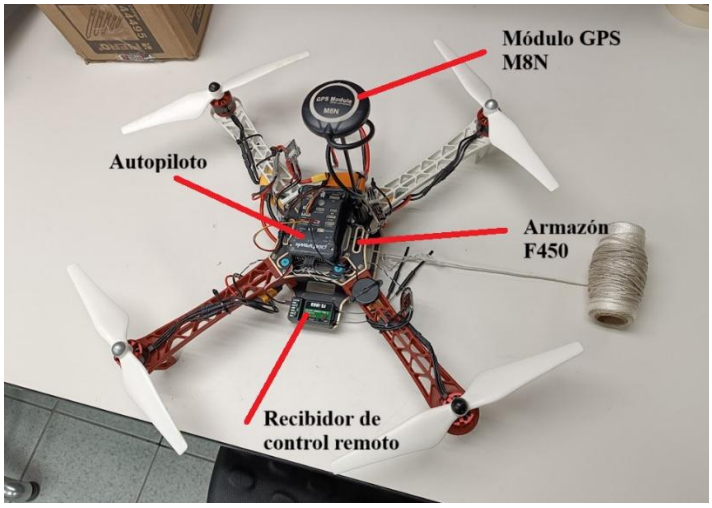


Figura 6.1. *Dron ensamblado.*



Figura 6.2. *Dron volando.*

La figura 6.3 muestra la interfaz del software Mission Planner de la estación terrestre mientras el dron se dirige hacia la ubicación geográfica especificada desde la estación terrestre.



Figura 6.3. *Estación terrestre mostrando al dron dirigiéndose hacia la ubicación geográfica objetivo.*

6.2 Pruebas de vuelo

6.2.1 Prueba de vuelo manual

El despegue durante la prueba de vuelo manual utilizando el modo de vuelo Loiter se ejecutó de manera correcta. El GPS del dron detectó en todo momento durante el vuelo al menos 14 satélites. El dron respondió correctamente a las instrucciones del usuario desde el control remoto. Sin embargo, el dron no mantenía su posición con buena precisión, sino que oscilaba en su posición horizontal (latitud y longitud)

La oscilación del vehículo ha sido estimada utilizando las coordenadas geográficas que el GPS detectó durante el tiempo que el dron permaneció volando en modo Loiter sin que el usuario moviera las palancas del control remoto. La figura 6.4 muestra el comportamiento de la posición del dron a lo largo de los 35 segundos que permaneció el dron en el aire en una ubicación fija.

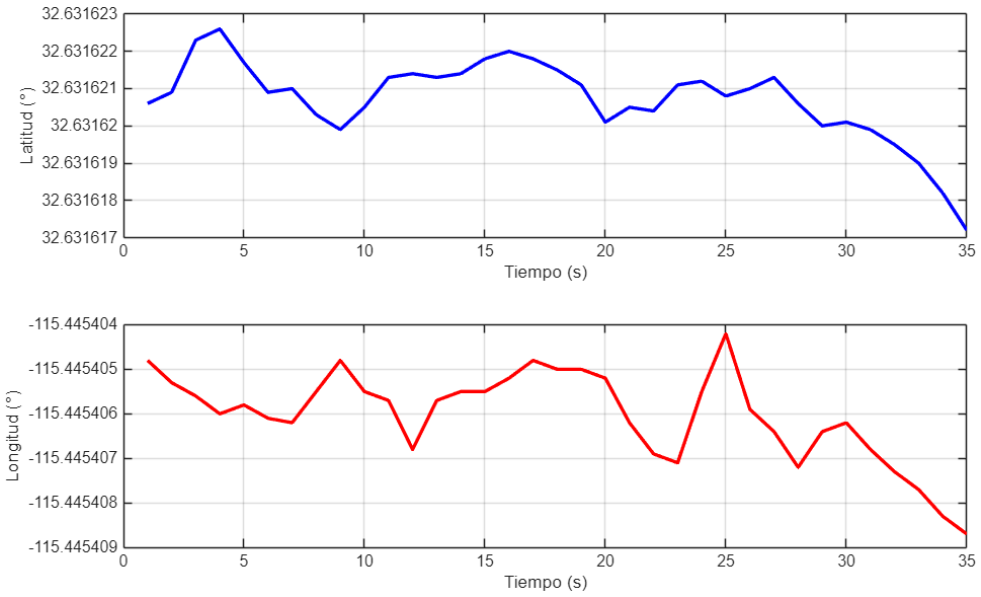


Figura 6.4. *Valores de latitud y longitud a lo largo de 35 segundos mientras el dron mantuvo fija su posición durante el vuelo manual.*

Para determinar la oscilación aproximada de la posición del dron, se calculó la diferencia entre el valor máximo y mínimo de cada parámetro y se convirtió a metros. Posteriormente, se determinó la oscilación total combinando ambos ejes utilizando el teorema de Pitágoras. Las ecuaciones (1) y (2) corresponden al cálculo de la oscilación de latitud y longitud, respectivamente, y la ecuación (3) corresponde al cálculo de la oscilación en ambos ejes.

$$0.0000054° \left(\frac{40075200\ m}{360°}\right) = 0.6001\ m \tag{1}$$

$$0.0000054° \left(\frac{40075200\ m}{360°}\right) = 0.6001\ m \tag{2}$$

$$\sqrt{(0.6011\ m)^2 + (0.5009\ m)^2} = 0.7825\ m \tag{3}$$

De esta manera se determinó que la oscilación aproximada en el plano horizontal fue de 0.7825 metros, lo que corresponde a un radio de 0.39125 metros.

6.2.2 Pruebas de precisión de posición durante vuelo automático

Los resultados de las pruebas de precisión de posición durante el vuelo automático se muestran en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. *Resultados de pruebas de precisión de posición.*

Variable	Media	Error estándar	IC 95% inferior	IC 95% superior	Unidad
Distancia entre dron y objetivo	1.55	0.1576	1.23	1.88	metros

6.2.3 Pruebas de tiempo y distancia máximos de vuelo

Los resultados de las pruebas de tiempo y distancia máximos de vuelo se muestran en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. *Resultados de pruebas de tiempo y distancia máximos de vuelo.*

Variable	Media	Error estándar	IC 95% inferior	IC 95% superior	Unidad
Tiempo máximo de vuelo	14:14.57	00:04.46	14:05.45	14:23.68	minutos
Distancia máxima de vuelo	3893.65	20.3905	3941.95	4025.36	metros

6.3 Pruebas de medición de MP

6.3.1 Prueba de medición con sensores en cámara de calibración con ambiente controlado

La tabla 6.3 muestra los resultados de la prueba de medición de MP en la cámara de calibración.

Tabla 6.3. *Valores de resultados de prueba en cámara de calibración.*

Sustancia	MAAPE	Estadístico de prueba (V)	*p*-valor	Tamaño de efecto (r)	Correlación (ρ)	Mediana
$MP_{2.5}$	0.023	136	0.2549	0.2952	1	0
MP_{10}	0.057	82	0.6149	-0.1368	1	0

Las figuras 6.5 y 6.6 muestran las curvas de respuesta y los gráficos Bland-Altman, respectivamente, de cada sistema durante la prueba en la cámara de calibración.

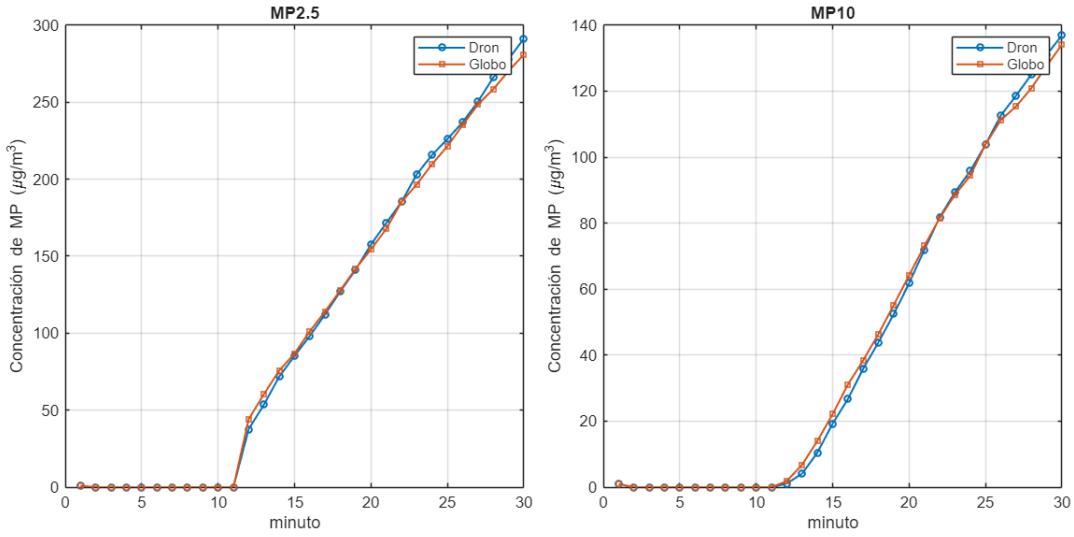


Figura 6.5. *Curvas de respuesta de ambos sistemas de pruebas en cámara de calibración.*

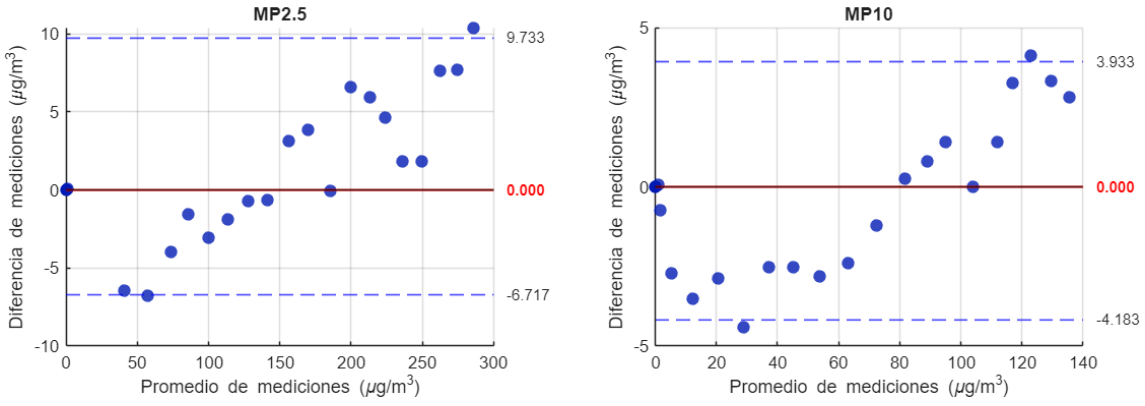


Figura 6.6. *Gráficos Bland-Altman de ambos sistemas de pruebas en cámara de calibración.*

6.3.2 Pruebas de medición simultáneas en exterior

La tabla 6.4 muestra los resultados de las pruebas de medición de MP utilizando ambos sistemas en exterior a distintas distancias de separación entre el sistema "dron" y el dron.

Tabla 6.4. *Resultados de pruebas de medición de MP en exterior.*

Distancia (metros)	Sustancia	MAAPE	Estadístico de prueba (V)	*p*-valor	Tamaño de efecto (r)	Correlación (ρ)	Mediana
0	$MP_{2.5}$	1.511	465	1.82×10^{-6}	1	0.4334	61.667
	MP_{10}	1.506	465	1.86×10^{-9}	1	N/D*	55.033
1	$MP_{2.5}$	0.923	233	0.0596	0.4339	0.1382	1.167
	MP_{10}	0.876	252	0.0536	0.4359	0.0523	1.000
2	$MP_{2.5}$	0.204	403	0.0005	0.7333	0.5838	2.533
	MP_{10}	0.202	376	0.0033	0.6172	0.6444	1.500
3	$MP_{2.5}$	0.221	274	0.3990	0.1785	0.5203	0.250
	MP_{10}	0.186	325.5	0.0011	0.7222	0.6321	0.383
4	$MP_{2.5}$	0.180	211.5	0.6732	-0.0903	0.3409	-0.133
	MP_{10}	0.214	301.5	0.1587	0.29677	0.3716	0.533
5	$MP_{2.5}$	0.230	135.5	0.0472	-0.4172	0.4102	-0.583
	MP_{10}	0.212	95	0.1193	-0.3667	0.2739	0
6	$MP_{2.5}$	0.226	219	0.9827	0.0069	0.4428	0.1
	MP_{10}	0.176	156	0.8717	-0.04	0.6693	0
7	$MP_{2.5}$	0.027	55.5	0.5346	-0.1838	0.9362	0
	MP_{10}	0.050	84	0.1725	-0.3360	0.7581	-0.017

**Nota: N/D: No definido. (La desviación estándar de una muestra es cero).*

Las figuras 6.7 y 6.8 muestran las curvas de respuesta y los gráficos de Bland-Altman para $MP_{2.5}$, mientras que las figuras 6.9 y 6.10 muestran los resultados correspondientes para MP_{10}.

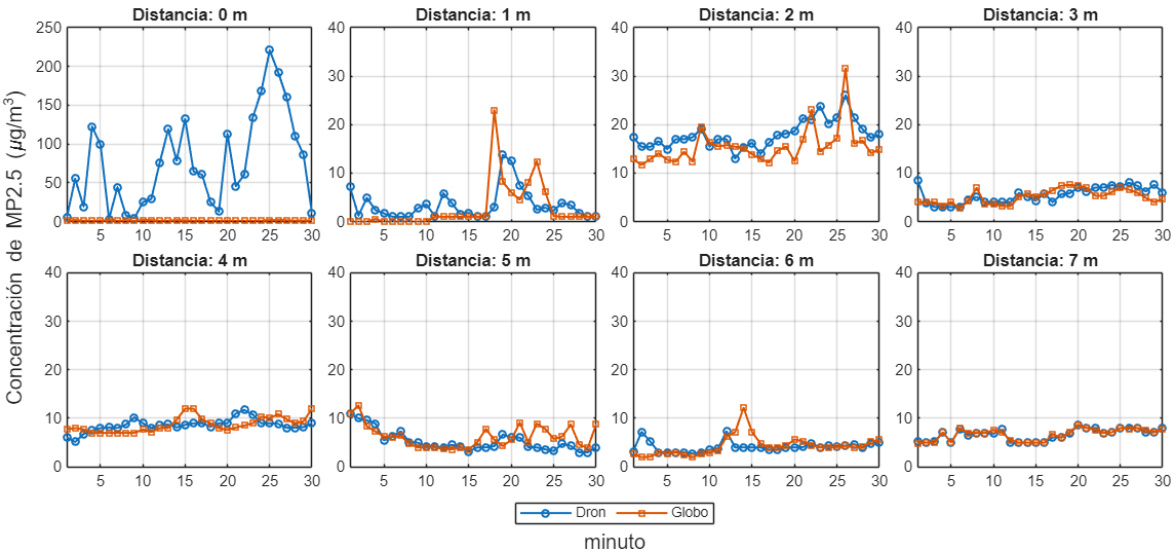


Figura 6.7. *Curvas de respuesta de mediciones de $MP_{2.5}$.*

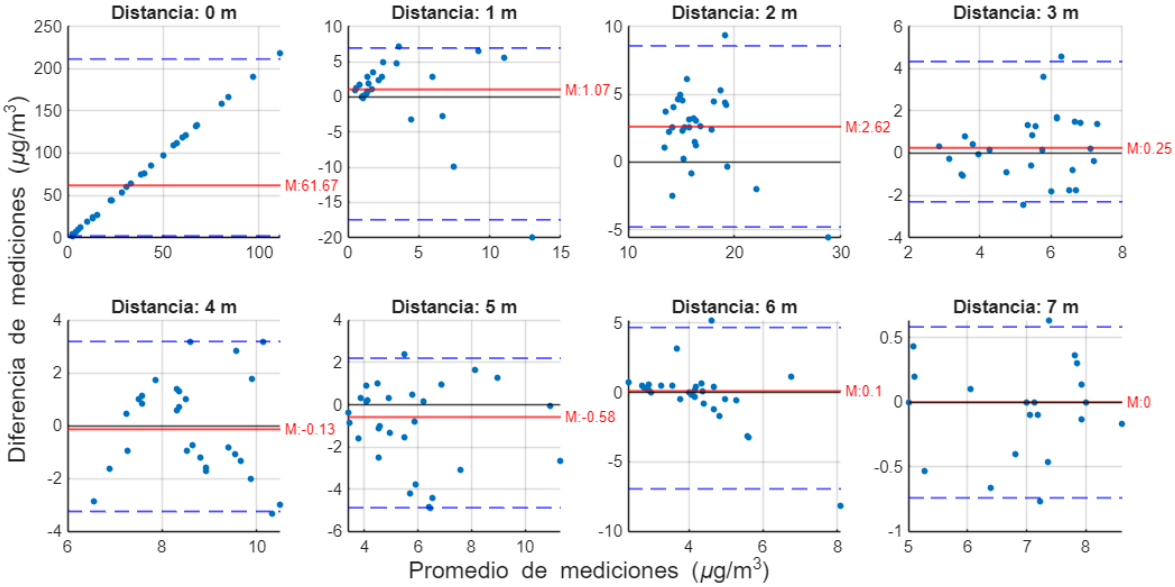


Figura 6.8. *Gráfico de Bland-Altman de mediciones de $MP_{2.5}$.*

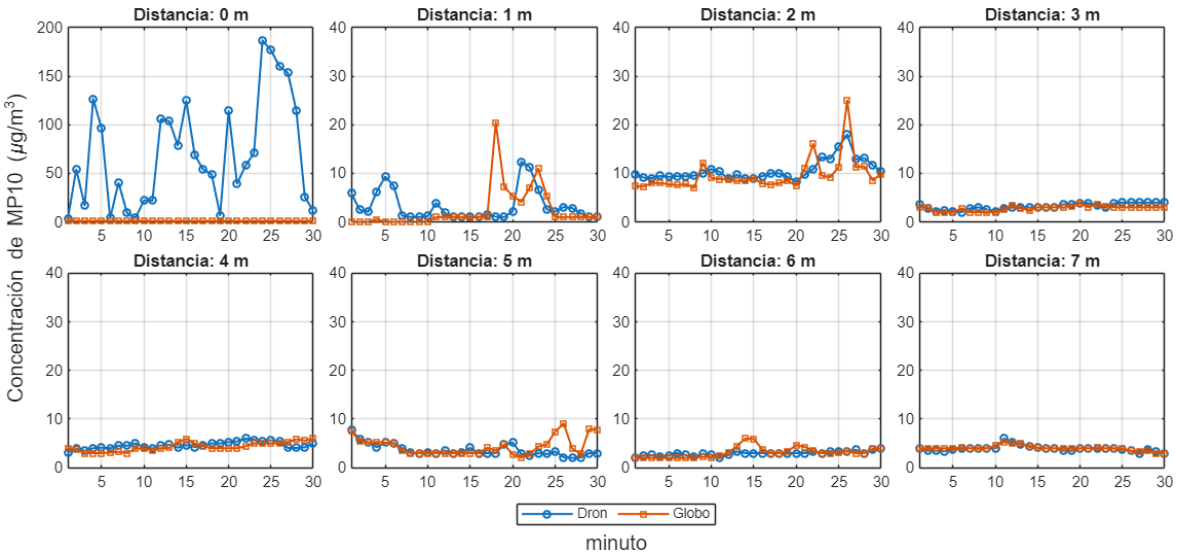


Figura 6.9. *Curvas de respuesta de mediciones de MP_{10}.*

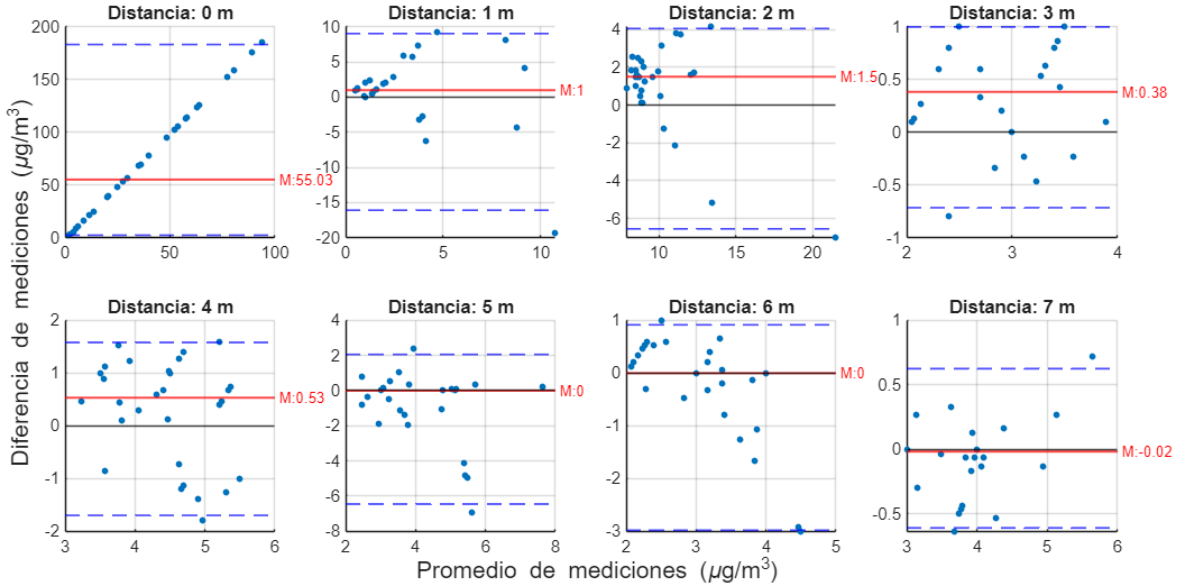


Figura 6.10. *Gráfico de Bland-Altman de mediciones de MP_{10}.*

CAPÍTULO 7. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

7.1 Funcionamiento y parámetros de vuelo

El primer objetivo específico consistió en integrar y programar un dron para evaluar sus parámetros de vuelo como lo indica el segundo objetivo específico. El dron, al ser alcanzable de manera remota por medio de internet, tiene la capacidad de ser controlado de manera remota y de ejecutar rutinas automáticas, permitiendo que el operador lo controle sin encontrarse físicamente en la zona en la que se llevarán a cabo las mediciones de material particulado.

Los resultados muestran que el dron presenta un tiempo de vuelo de entre 14:05.45 y 14:23.68 minutos en el 95% de los vuelos, el cual es comparable con el que otros usuarios de la plataforma ArduPilot han reportado, demostrando que este tiempo de vuelo es esperado en un dron de características similares.

En cuanto a la distancia máxima de vuelo, el dron demostró alcanzar una distancia de entre 3941.95 y 4025.36 metros en el 95% de los vuelos, el cual lo vuelve útil para realizar muestreos de MP a microescala, la cual está definida por un radio de 100 metros a la redonda de acuerdo con la EPA (EPA, 2017). Sin embargo, vale la pena considerar que la distancia de vuelo se ve afectada por los cambios de dirección en la trayectoria del dron, pues este necesita frenar al realizar cambios bruscos en la misma, por lo que se espera que, al utilizar trayectorias rectilíneas más largas, la distancia total de vuelo sea mayor, por lo tanto, esto sugiere que el límite observado tiene que ver con las características de la misión realizada y no con las capacidades intrínsecas del dron.

Los resultados descritos también indican que el dron es apto para realizar misiones de monitoreo de la calidad del aire de manera remota comunicándose con el operador a través del módulo 4G/LTE. Una limitación observada es el consumo energético, lo cual puede atenderse utilizando baterías de mayor capacidad y reduciendo el consumo eléctrico total del dron.

7.2 Error de posicionamiento en vuelo automático y manual

El segundo objetivo específico consistió también en analizar la estabilidad del dron y error de posicionamiento del sistema de navegación al volarlo en un modo de vuelo automático, conociendo así el error de posicionamiento que este presenta.

Los resultados demuestran que el dron mantiene su posición de manera estable durante el vuelo manual, presentando una oscilación horizontal menor que la especificada por el fabricante del módulo de GPS M8N (radio menor a 2 metros), siendo esta menor a un metro de radio en ambos modos de vuelo.

En cuanto al error de posicionamiento durante un modo de vuelo automático, este presentó un error promedio de 1.55 metros al intentar alcanzar la ubicación objetivo, con un intervalo de confianza del 95 % entre 1.23 y 1.88 metros. Esto demuestra que el dron tiene la capacidad de realizar misiones de vuelo de manera remota y automática, sin embargo, se reconoce que, al realizar vuelos en presencia de mayor velocidad de viento, la oscilación del dron podría incrementar.

7.3 Efecto del dron en las mediciones de MP

La hipótesis estableció que, al incorporar un mecanismo que permite distanciar el sensor del dron, las mediciones de MP realizadas con el dron son válidas. Los tercer y cuarto objetivos específicos consistieron en incorporar el mecanismo para distanciamiento del sensor y comparar las mediciones de MP realizadas con el dron contra las mediciones realizadas por un sensor control. A continuación se discuten los resultados de las pruebas de medición realizadas en ambiente controlado y de las pruebas realizadas en exterior.

7.3.1 Consistencia de mediciones de ambos sensores en ambiente controlado

Las pruebas de medición con ambos sensores en ambiente controlado dentro de una cámara de calibración indican que no existe fuerte evidencia de que las mediciones realizadas por ambos sensores no son consistentes entre sí, obteniendo un valor de correlación de Spearman de 1, el cual es el valor máximo que dicha operación puede arrojar. La prueba de comparación de Wilcoxon dio como resultado un valor del estadístico de prueba V igual a 136 y 82 para $MP_{2.5}$ y MP_{10} respectivamente, así como un *p*-valor de 0.2549 y 0.6149 para

$MP_{2.5}$ y MP_{10} respectivamente, siendo estos muy superiores al valor de significancia de 0.05 y sugiriendo que no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula de que la mediana de las diferencias entre las mediciones de ambos sensores se distribuye simétricamente alrededor de cero.

Los diagramas de Bland-Altman muestran que la mediana de las diferencias es cero y que la gran mayoría de las mediciones caen dentro de los límites que delimitan el 95% de las muestras, los cuales son menores a 10 en valor absoluto e indican que, dado que los valores promedio van hasta cerca de los 300 $\frac{\mu g}{m^3}$, el error máximo es cercano al 3%, siendo muy bajo para sensores de bajo costo como el utilizado, indicando que son consistentes entre sí.

Finalmente, el MAAPE es de 0.023 y 0.057 para $MP_{2.5}$ y MP_{10}, respectivamente, indicando un error promedio bajo al calcular las diferencias absolutas entre ambos sensores.

7.3.2 Variación de diferencia de mediciones de MP en exterior de acuerdo con la variación de la distancia entre el dron y el sensor

Los resultados de las pruebas de medición de MP en exterior muestran que las mediciones realizadas en el dron sí difieren significativamente del control cuando la distancia entre el dron y el sensor es de 0 a 2 metros, en donde la prueba de Wilcoxon obtiene *p*-valores menores al nivel de significancia de 0.05, con excepción de la distancia de 1 metro en donde el *p*-valor de la prueba es igual al nivel de significancia, lo cual lo coloca al límite del umbral de rechazo de la hipótesis nula. Sin embargo, la mediana de las diferencias es de al menos 1 en las tres distancias y se observa una disminución drástica en el MAAPE al incrementar la distancia entre 0 y 2 metros.

Adicionalmente, cabe mencionar que en el diagrama de Bland-Altman para la distancia de 0 metros se observa una mediana mayor a 50 $\frac{\mu g}{m^3}$, y el ancho de los límites es muy elevado, cercano a los 200 $\frac{\mu g}{m^3}$, tanto el ancho de los límites como el valor de la mediana caen drásticamente al incrementar la distancia a 1 metro.

Respecto a las distancias entre 3 y 5 metros, el *p*-valor de la prueba de Wilcoxon supera el nivel de significancia en la mayoría de las comparaciones. Sin embargo, el valor

de MAAPE se mantiene bajo (cercano a 0.2) y la correlación arroja valores medios, mientras que la mediana de las diferencias se mantiene por debajo de 1 $\frac{\mu g}{m^3}$. Esto sugiere que las mediciones a estas distancias no son altamente representativas del aire muestreado.

Finalmente, a distancias de 6 y 7 metros los valores de las medianas de las diferencias tienen valores muy cercanos a cero, y la correlación es más elevada que en las distancias entre 3 y 5 metros. Además, el *p*-valor de la prueba de Wilcoxon es mayor al nivel de significancia y específicamente a 7 metros se encuentra la mayor correlación de todas las muestras, así como un MAAPE de 0.027 y 0.05 para $MP_{2.5}$ y MP_{10}, que son prácticamente iguales al MAAPE determinado durante las pruebas de consistencia de los sensores en ambiente controlado. Además, los límites de acuerdo observados en los diagramas de Bland-Altman son más estrechos a la distancia de 7 metros.

Estos resultados demuestran que la utilización de un carrete incorporado en el dron permiten alejar el sensor del dron durante el vuelo y proporcionan evidencia contundente de que existe una diferencia significativa entre los valores de concentración de MP detectados por un sensor cercano al dron que aquellos detectados por un sensor en la misma ubicación sin encontrarse cercano a un dron debido a la turbulencia aérea que el dron produce, lo cual dispersa las partículas suspendidas y es capaz de suspender en el aire partículas que se encuentren en el suelo.

7.4 Limitaciones

Una importante limitación que presenta este proyecto es que el adecuado posicionamiento del dron se encuentra limitado a la presencia de una baja velocidad del viento (menor que 10 $\frac{Km}{h}$). Además, el dron no cuenta con sensores de parámetros meteorológicos, por lo tanto, la única información meteorológica de referencia con que se cuenta será aquella proporcionada por el Sistema Meteorológico Nacional, lo cual es importante ya que pueden tener efecto sobre las mediciones realizadas por el sensor y el desempeño operativo del dron, a pesar de que en las pruebas realizadas de comparación no afecta en los resultados por realizarse mediciones bajo las mismas condiciones meteorológicas.

Otra limitación es que el sensor PAS-OUT-01 no cuenta con una calibración frente a un dispositivo de referencia de grado EPA, lo cual, aunque se comprobó que ambos sensores utilizados detectaban los mismos valores de concentración de MP al encontrarse en ambiente controlado previo a las pruebas de medición de MP, las lecturas durante deben interpretarse como mediciones indicativas y no como valores regulatoriamente equivalentes.

La operación remota del dron depende de que el dron se encuentre ubicado en una zona con cobertura móvil para poder conectarse a internet, así como también depende de que la estación terrestre se encuentre conectada a internet con una dirección IP pública conocida.

Finalmente, el dron debe de ser utilizado en ubicaciones libres de obstáculos con los que el dron pueda colisionar, limitando las zonas en las que este pueda realizar misiones de manera autónoma de forma segura. Además, la operación segura del dron es dependiente de las condiciones ambientales, pues realizar vuelos en condiciones ambientales desfavorables (p. ej. En presencia de viento mayor a 10 $\frac{Km}{h}$) podría comprometer la estabilidad del dron).

CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

8.1 Conclusiones

Tras la conclusión de este proyecto de investigación se observó que el sistema desarrollado proporciona un tiempo y distancia de vuelo suficientes para realizar misiones de monitoreo de la calidad del aire de manera autónoma y estable, pues el tiempo de vuelo y la distancia de vuelo son de 14:14.57 minutos y 3893.65 metros respectivamente. Esto indica que el sistema es funcional, estable, y capaz de completar misiones autónomas.

El posicionamiento del dron es adecuado al presentar una diferencia promedio de 1.55 metros con respecto a la ubicación especificada por coordenadas geográficas desde una estación terrestre, siendo menor que el límite de 2 metros indicado por el fabricante, volviendo útil el sistema para realizar mediciones de MP.

Se obtuvieron resultados consistentes indicando que la turbulencia aérea generada por el dron afecta a las mediciones de MP, haciendo que estas difieran significativamente de los valores reales y que esta afectación se reduce al alejar el sensor del dron, lo cual se logra con un mecanismo que permita alejar el sensor del dron durante el vuelo como un carrete.

La utilización de plataformas y sistemas operativos de código abierto como ArduPilot y distribuciones basadas en Linux combinadas con tecnología ya existente permiten la creación de sistemas como un dron capaz de detectar la concentración de MP en el ambiente de manera segura y remota. Además, el uso de estas plataformas permite que el sistema sea económicamente replicable y adaptable.

La implementación de futuras mejoras del sistema permitirá contar con información que permita la creación de un inventario de emisiones actualizado para así poder establecer normativa que regule las emisiones de contaminantes atmosféricos, proporcionando información con una mayor resolución espacial y de zonas inaccesibles por operadores humanos.

La utilización de un dron para monitorear la concentración de MP realizando mapeos en zonas tridimensionales presenta ventajas muy significativas, entre las cuales se destaca

principalmente la muy elevada resolución espacial sin estar limitada a la localización y separación entre sensores fijos. Además, el usuario podría conocer la concentración de MP en un sitio alejado mientras exista cobertura celular, sin exponerse al tratarse de una zona de riesgo, así como alcanzando localizaciones de difícil acceso para una persona.

8.2 Trabajo futuro

Los siguientes puntos muestran trabajo futuro que mejorará y asegurará la continuidad de este proyecto:

- Caracterizar la turbulencia aérea en distintas direcciones (hacia arriba y hacia los lados).
- Incorporación de sensor(es) de obstáculos para permitir la realización de misiones automáticas en ubicaciones con presencia de objetos con los que el dron pueda colisionar.
- Evaluación de distintos materiales para el desarrollo de un dron que sea más ligero y con ello más eficiente energéticamente, lo cual incremente la duración de la batería y permita realizar misiones más prolongadas.

8.3 Contribuciones

8.3.1 Productos derivados del proyecto

A continuación, se enlistan los distintos productos académicos y tecnológicos generados durante el desarrollo de este proyecto:

- Artículo de revista (2024) "*Drone-Assisted Particulate Matter Measurement in Air Monitoring: A Patent Review*". https://doi.org/10.3390/atmos15050515
- Artículo de revista (2024) "*Monitoring of Airborne Pollen: A Patent Review*". https://doi.org/10.3390/atmos15101217
- Cartel (2024) "*Model for Suspension of Unmanned Aerial Vehicle for Air Pollution Monitoring*" presentado en congreso 2024 Global Medical Engineering Physics Exchanges/ Pan American Health Care Exchanges (GMEPE/PAHCE). https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36688.52486
- Modelo de utilidad (2024) "*Modelo de utilidad de vehículo aéreo no tripulado modificado para distanciamiento de sensores ambientales basado en extensión mecánica retráctil*". Expediente: MX/u/2024/000416. https://vidoc.impi.gob.mx/visor?usr=SIGA&texp=SI&tdoc=E&id=MX/u/2024/000416
- Modelo de utilidad (2024) (En examen de fondo) "*Modelo de utilidad de vehículo aéreo no tripulado modificado para distanciamiento de sensores ambientales basado en carrete*". Expediente: MX/u/2024/000528. https://vidoc.impi.gob.mx/visor?usr=SIGA&texp=SI&tdoc=E&id=MX/u/2024/000528
- Modelo de utilidad (2024) (En examen de fondo) "*Modelo de utilidad de vehículo aéreo no tripulado modificado para distanciamiento de sensores ambientales basado en varilla dentada desplazable*". Expediente: MX/u/2025/000079. https://vidoc.impi.gob.mx/visor?usr=SIGA&texp=SI&tdoc=E&id=MX/u/2025/000079

8.3.2 Productos adicionales

- Artículo de revista (2025) “Development of a Portable Calibration Chamber for PM Sensors Equipped with Wireless Connectivity Controlled by a Graphical Interface in Python” https://doi.org/10.3390/environments12090338
- Artículo de congreso (2025) “Development of breakout boards for wearable ECG applications based on the AD823X microchip and the Arduino Platform” https://doi.org/10.3390/ECSA-12-26566
- Artículo de congreso (2025) “Development of a AD8233-Based EMG Sensor and Double Interrupt Sampling Technique in a Low-Cost Prototype for Biosignal Acquisition” https://doi.org/10.1109/GMEPE/PAHCE65777.2025.11002805
- Artículo de congreso (2024) “Development of a Low-Cost Interactive Prototype for Acquisition and Visualization of Biosignals” https://doi.org/10.3390/ecsa-11-20444
- Artículo de congreso (2024) “Test Chamber for Particulate Matter Sensors Measurements in Controlled Environment Through a Python GUI”. https://doi.org/10.1109/GMEPE/PAHCE62423.2024.10534691
- Artículo de congreso (2025) “Test Chamber for PM Monitoring Devices with a Python-Based GUI and Control System Using Wireless Connectivity”. https://doi.org/10.1109/GMEPE/PAHCE65777.2025.11002796
- Artículo de congreso (2023) “Development of a Low-Cost Particulate Matter Optical Sensor for Real-Time Monitoring”. https://doi.org/10.3390/ecsa-10-16025

REFERENCIAS

Alsina, G. (2024, Noviembre 18). *Módulo LTE 4G Clipper HAT Mini*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.industriaembebidahoy.com/modulo-lte-4g-clipper-hat-mini/

Altamira-Colado, E., Cuevas-González, D., Reyna, M. A., García-Vázquez, J. P., Avitia, R. L., & Osornio-Vargas, A. R. (2024). Drone-assisted particulate matter measurement in air monitoring: A patent review. *Atmosphere, 15*(5), 515. https://doi.org/10.3390/atmos15050515

Altieri, K. E., & Keen, S. L. (2019). Public health benefits of reducing exposure to ambient fine particulate matter in South Africa. *Science of the Total Environment*, *684*, 610–620. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.355

Anderson, J. O., Thundiyil, J. G., & Stolbach, A. (2012). *Clearing the air: A review of the effects of particulate matter air pollution on human health*. *Journal of Medical Toxicology, 8*, 166-175. https://doi.org/10.1007/s13181-011-0203-1

ANSES. (2019). *Particulate matter in ambient air: Health effects according to components, sources and particle size, impact on air pollution of the technologies and composition of the motor vehicle fleet operating in France*.

Apte, J. S., Messier, K. P., Gani, S., Brauer, M., Kirchstetter, T. W., Lunden, M. M., Marshall, J. D., Portier, C. J., Vermeulen, R. C. H., & Hamburg, S. P. (2017). High-Resolution Air Pollution Mapping with Google Street View Cars: Exploiting Big Data. Environmental Science and Technology, 51(12), 6999–7008. https://doi.org/10.1021/acs.est.7b00891

Ardupilot. (2009a). *ArduPilot - Versatile, Trusted, Open*. https://ardupilot.org/

Ardupilot. (2009b). *ArduPilot Copter — Copter documentation*. https://ardupilot.org/copter/

Área metropolitana Valle de Aburrá. (2021). *Calidad del aire*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/

ATI Techno Industries. (2019). *Indiamart ATI Techno Industries*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.indiamart.com/atitechno-industries/monitoring-system.html

Aurell, J., & Gullett, B. K. (2024). Effects of UAS Rotor Wash on Air Quality Measurements. *Drones*, *8*(3). https://doi.org/10.3390/drones8030073

Banco de México. (2024). *La contaminación del aire en las ciudades de México y los precios de algunos bienes y servicios relacionados con la salud*. https://www.banxico.org.mx/publicaciones-y-prensa/reportes-sobre-las-economias-regionales/recuadros/%7B68CAF701-336B-8E2A-6D44-F723E07DDDDE%7D.pdf

Beard, R. W., & McLain, T. W. (2012). Kinematics and dynamics. In *Small unmanned aircraft: Theory and practice* (1st ed., pp. 28–30). Princeton University Press.

Benítez-García, S. E., Kanda, I., Wakamatsu, S., Okazaki, Y., & Kawano, M. (2014). Analysis of criteria air pollutant trends in three Mexican metropolitan areas. *Atmosphere*, *5*(4), 806–829. https://doi.org/10.3390/atmos5040806

Box, G. E. P., & Cox, D. R. (1964). An Analysis of Transformations. *Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology*, *26*(2), 211–243. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1964.tb00553.x

BYJU'S. (s. f.). *Scattering of light*. Recuperado el 31 de agosto de 2025, de https://byjus.com/physics/what-is-scattering-of-light/

Chao, H., Cao, Y., & Chen, Y. (2010). Autopilots for small unmanned aerial vehicles: A survey. *International Journal of Control, Automation and Systems*, *8*(1), 36–44. https://doi.org/10.1007/s12555-010-0105-z

Chen, J., & Hoek, G. (2020). *Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: A systematic review and meta-analysis*. *Environment International, 143*, 105974. https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105974

Chicea, D., Leca, C., Olaru, S., & Chicea, L. M. (2021). An advanced sensor for particles in gases using dynamic light scattering in air as solvent. *Sensors, 21*(15). https://doi.org/10.3390/s21155115

Cohen, A. J., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H. R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona, L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Hubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., … Forouzanfar, M. H. (2017). Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015. *The Lancet*, *389*(10082), 1907–1918. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)30505-6

Comisión de Cooperación Ecológica Fronteriza. (2010). *Emisiones de gases de efecto invernadero en Baja California y proyecciones de casos de referencia 1990-2025*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://nadbank.org/hubfs/publicaciones-y-estudios/inventario_emisiones_gei_baja_california_junio_2010.pdf?hsLang=es

Cortez-Huerta, M., Sosa Echeverría, R., Fuentes García, G., Antonio Durán, R., Sánchez Álvarez, P., Magaña, V., & Retama, A. (2023). Influence of particulate matter on air quality due to "Nortes" events in the Gulf of Mexico. *Atmospheric Pollution Research*, *14*(10). https://doi.org/10.1016/j.apr.2023.101889

Crosby, A. (2022). *Fixed-wing vs multirotor drones: Which is better?* Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://geonadir.com/fixed-wing-vs-multirotor-drones/

Crazzolara, C., Ebner, M., Platis, A., Miranda, T., Bange, J., & Junginger, A. (2019). A new multicopter-based unmanned aerial system for pollen and spores collection in the

atmospheric boundary layer. *Atmospheric Measurement Techniques*, *12*(3), 1581–1598. https://doi.org/10.5194/amt-12-1581-2019

Cuevas-González, D., Sánchez-Barajas, M. A., Reyna, M. A., García-Vázquez, J. P., Altamira-Colado, E., & Avitia, R. L. (2025). Development of a Portable Calibration Chamber for PM Sensors Equipped with Wireless Connectivity Controlled by a Graphical Interface in Python. *Environments*, *12*(9). https://doi.org/10.3390/environments12090338

Dee, S. (2021, Julio 22). *Scientists understood physics of climate change in the 1800s – thanks to a woman named Eunice Foote*. https://doi.org/10.64628/AAI.WAUY3JVWP

Dickerson, R. R., Stedman, D. H., & Delany, A. C. (1982). Direct measurements of ozone and nitrogen dioxide photolysis rates in the troposphere. *Journal of Geophysical Research*, *87*(C7), 4933–4946. https://doi.org/10.1029/JC087iC07p04933

DJI. (2025). *Flame Wheel ARF KIT - Features | DJI*. https://www-v1.dji.com/flame-wheel-arf/feature.html

Dronekit. (2016). *DroneKit Python 2.4.0 documentation*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://dronekit-python.readthedocs.io/en/latest/index.html

Droniq. (2025). *Hanseatic S360Mk.II - Fixed wing drone with combustion engine*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://droniq.de/en/produkte/hanseatic-s360mk-ii/

EPA. (2017). *Quality Assurance Handbook for Air Pollution Measurement Systems Volume II* (Vol. 2). Ambient Air Quality Monitoring Program.

EPA. (2025a, Mayo 30). *Particulate Matter (PM) Basics*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics

EPA. (2025b, Julio 10). *Basic Information about NO2 | US EPA*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2

Feng, L., & Liao, W. (2016). Legislation, plans, and policies for prevention and control of air pollution in China: Achievements, challenges, and improvements. *Journal of Cleaner Production*, *112*, 1549–1558. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.013

Fowler, D., Brimblecombe, P., Burrows, J., Heal, M. R., Grennfelt, P., Stevenson, D. S., Jowett, A., Nemitz, E., Coyle, M., Lui, X., Chang, Y., Fuller, G. W., Sutton, M. A., Klimont, Z., Unsworth, M. H., & Vieno, M. (2020). A chronology of global air quality: The development of global air pollution. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 378*(2183). https://doi.org/10.1098/rsta.2019.0314

Gao, M., Hugenholtz, C. H., Fox, T. A., Kucharczyk, M., Barchyn, T. E., & Nesbit, P. R. (2021). Weather constraints on global drone flyability. *Scientific Reports*, *11*(1). https://doi.org/10.1038/s41598-021-91325-w

Garg, P. (2022). Characterisation of Fixed-Wing Versus Multirotors UAVs/Drones. *Journal of Geomatics*, *16*(2), 152–159. https://doi.org/10.58825/jog.2022.16.2.44

Goudie, A. (2013). *Part I: The past and present*. En *The human impact on the natural environment: Past, present, and future* (7.ª ed.). Wiley-Blackwell.

Hawk's Work. (s.f.-a). Pixhawk 2.4.8 Flight Control, Open Source PX4 autopilot – HAWK'S WORK. Recuperado el 11 de noviembre, de https://www.hawks-work.com/products/pixhawk-2-4-8-flight-control-open-source-px4-autopilot?variant=48124759376177

Hawk's Work. (s.f.-b). A2212 Brushless Motor 920KV for Multirotor Drone and Others – HAWK'S WORK. Recuperado el 11 de noviembre, de https://www.hawks-work.com/products/a2212-brushless-motor-920kv-for-multirotor-drone-and-others

Hawk's Work. (s.f.-c). 9450 Propellers, Self-Tightening CW & CCW Propeller for Multirotor F45 – HAWK'S WORK. Recuperado el 11 de noviembre, de https://www.hawks-work.com/products/9450-propellers-self-tightening-cw-ccw-propeller-for-multirotor-f450

Hawk's Work. (s.f.-d). F450 Drone Kit to build, DIY 450mm Wheelbase 4-axis Multi-rotor Drone – HAWK'S WORK. Recuperado el 11 de noviembre, de https://www.hawks-work.com/products/f450-drone-kit-to-build-diy-450mm-wheelbase-4-axis-multi-rotor-drone-kit-b

Health Effects Institute. (2024). State of Global Air 2024: A special report on global exposure to air pollution and its health impacts, with a focus on children's health. https://www.stateofglobalair.org/resources/archived/state-global-air-report-2024

Health Effects Institute. (2025). *State of Global Air 2025: A report on air pollution and its role in the world's leading causes of death*. https://www.stateofglobalair.org/resources/report/state-global-air-report-2025

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2022). *Informe Nacional de Calidad del Aire 2022*. https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/informes/Informe2022.pdf

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2023). *Informe de la calidad del aire en la megalópolis (2013–2022)*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/921558/01_2024_INFORME_DE_LA_CALIDAD_DEL_AIRE_EN_LA_MEGALOPOLIS_2013_120624.pdf

IQAir. (2025). *Mexicali Air Quality Index (AQI) and Mexico Air Pollution*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.iqair.com/mexico/baja-california/mexicali

Jia, B., Gao, M., Zhang, X., Xiao, X., Zhang, S., & Lam Yung, K. K. (2021). Rapid increase in mortality attributable to PM2.5 exposure in India over 1998–2015. *Chemosphere*, *269*. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128715

Jumaah, H. J., Kalantar, B., Mansor, S., Halin, A. A., Ueda, N., & Jumaah, S. J. (2021). Development of UAV-based PM2.5 monitoring system. *Drones*, *5*(3). https://doi.org/10.3390/drones5030060

Karagulian, F., Gerboles, M., Barbiere, M., Kotsev, A., Lagler, F., Karagulian, F., & Gerboles, M. (2019). *Review of sensors for air quality monitoring*. https://doi.org/10.2760/568261

Kedys, J., Tchappi, I., & Najjar, A. (2024). UAVs for Disaster Management - An Exploratory Review. *Procedia Computer Science*, *231*, 129–136. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.12.184

Kim, K. H., Kabir, E., & Kabir, S. (2015). A review on the human health impact of airborne particulate matter. In *Environment International* (Vol. 74, pp. 136–143). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005

Kumar, P., Morawska, L., Martani, C., Biskos, G., Neophytou, M., di Sabatino, S., Bell, M., Norford, L., & Britter, R. (2015). The rise of low-cost sensing for managing air pollution in cities. In *Environment International* (Vol. 75, pp. 199–205). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.11.019

Lambey, V., & Prasad, A. D. (2021). A Review on Air Quality Measurement Using an Unmanned Aerial Vehicle. *Water, Air, and Soil Pollution*, *232*(3). https://doi.org/10.1007/s11270-020-04973-5

Ley Federal de Protección a La Propiedad Industrial [L.F.P.P.I], Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], 1 de julio de 2020, (México).

Ley General Del Equilibrio Ecológico y La Protección al Ambiente [L.G.E.E.P.A.], Reformada, Diario Oficial de la Federación [D.O.F.], 1 de abril de 2024, (México).

Li, S., Xu, L. Da, & Zhao, S. (2015). The internet of things: a survey. *Information Systems Frontiers*, *17*(2), 243–259. https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7

Lüthi, D., Le Floch, M., Bereiter, B., Blunier, T., Barnola, J. M., Siegenthaler, U., Raynaud, D., Jouzel, J., Fischer, H., Kawamura, K., & Stocker, T. F. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. *Nature*, *453*(7193), 379–382. https://doi.org/10.1038/nature06949

Matha Electronics. (2025). *Quadcopter Frame-F450 Online in India at Best Price # Matha Electronics #*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.mathaelectronics.com/product/f450-quadcopter-frame/

Molina, M., & Rowland, F. (1974). Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, *249*, 810–812. https://doi.org/https://doi.org/10.1038/249810a0

NASA. (2025). *Carbon Dioxide | Vital Signs – Climate Change: Vital Signs of the Planet*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/?intent=121

NPS. (2024). *Sulfur Dioxide Effects on Health - Air (U.S. National Park Service)*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.nps.gov/subjects/air/humanhealth-sulfur.htm

Oh, S. M., Kim, H. R., Park, Y. J., Lee, S. Y., & Chung, K. H. (2011). Organic extracts of urban air pollution particulate matter (PM2.5)-induced genotoxicity and oxidative stress in human lung bronchial epithelial cells (BEAS-2B cells). *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, *723*(2), 142–151. https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2011.04.003

OMS. (2006). Air quality guidelines : global update 2005 : particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide. World Health Organization.

OMS. (2021). WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/345329/9789240034228-eng.pdf?sequence=1

OMS, & PAHO. (2021). Weekly Press Briefing on COVID-19 – Media briefing October 27 2021.

OMS. (2022). Air pollution kills 13 people every minute. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.who.int/multi-media/details/air-pollution-kills-13-people-every-minute

OMS. (2024). Ambient (outdoor) air pollution. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

OMS. (2025a). Nearly 50 million people sign up call for clean air action for better health. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.who.int/news/item/17-03-2025-nearly-50-million-people-sign-up-call-for-clean-air-action-for-better-health

OMS. (2025b). Seventy-eighth World Health Assembly – Daily update: 26 May 2025. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.who.int/news/item/26-05-2025-seventy-eighth-world-health-assembly---daily-update--26-may-2025

Prana Air. (2025). *Prana Air PAS-OUT-01 outdoor PM sensor datasheet*. https://www.pranaair.com/wp-content/uploads/2022/11/prana-air-pas-out-1-outdoor-pm-sensor-datasheet.pdf

Printables. (2021). *Raspberry Pi Model B+ Drilling And Mounting Plates por ctheroux | Descargar modelo STL gratuito | Printables.com*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.printables.com/model/42983-raspberry-pi-model-b-drilling-and-mounting-plates?lang=es

Python. (2025). *About Python*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.python.org/about/

Raspberry Pi. (2012). *Raspberry Pi - About us*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.raspberrypi.com/about/

Raspberry Pi. (2023). *Buy a Raspberry Pi 5*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-5/

Raspberry Pi. (2025). *Buy a Raspberry Pi*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.raspberrypi.com/products/

Rentschler, J., & Leonova, N. (2023). Global air pollution exposure and poverty. *Nature Communications*, *14*(1). https://doi.org/10.1038/s41467-023-39797-4

Rohi, G., Ejofodomi, O., & Ofualagba, G. (2020). Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones. *Heliyon*, *6*(1). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03252

Royston, P. (1992). Approximating the Shapiro-Wilk W-test for non-normality. *Statistics and Computing*, 2, 117-119. https://doi.org/10.1007/BF01891203

Ruddiman, W. F. (2016). Plows, plagues and petroleum: How humans took control of climate (1.ª ed.). Princeton University Press.

Russell, A. G., & Brunekreef, B. (2009). *A focus on particulate matter and health*. *Environmental Science and Technology, 43*(13), 4620–4625. https://doi.org/10.1021/es9005459

Shi, Y., Zhu, Y., Gong, S., Pan, J., Zang, S., Wang, W., Li, Z., Matsunaga, T., Yamaguchi, Y., & Bai, Y. (2022). PM2.5-related premature deaths and potential health benefits of controlled air quality in 34 provincial cities of China during 2001–2017. *Environmental Impact Assessment Review*, *97*. https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106883

Shouji, C., Alidoost Dafsari, R., Yu, S. H., Choi, Y., & Lee, J. (2021). Mean and turbulent flow characteristics of downwash air flow generated by a single rotor blade in agricultural drones. *Computers and Electronics in Agriculture*, *190*. https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106471

Silva, R. A., Adelman, Z., Fry, M. M., & West, J. J. (2016). The impact of individual anthropogenic emissions sectors on the global burden of human mortality due to ambient air pollution. *Environmental Health Perspectives*, *124*(11), 1776–1784. https://doi.org/10.1289/EHP177

Sixfab. (2024). *Getting Started*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://docs.sixfab.com/docs/raspberry-pi-cellular-iot-kit-getting-started

Slamtec. (2024). RPLIDAR C1 360 Degree Laser Range Scanner with Fusion Technology Introduction and Datasheet. https://bucket-download.slamtec.com/2d4664be9f9f5c748f3b608f2cf1862962b168eb/SLAMTEC_rplidar_datasheet_C1_v1.1_en.pdf

Snyder, E. G., Watkins, T. H., Solomon, P. A., Thoma, E. D., Williams, R. W., Hagler, G. S. W., Shelow, D., Hindin, D. A., Kilaru, V. J., & Preuss, P. W. (2013). The changing paradigm of

air pollution monitoring. *Environmental Science and Technology*, *47*(20), 11369–11377. https://doi.org/10.1021/es4022602

Soetedjo, A., & Hendriarianti, E. (2023). Development of an IoT-Based SCADA System for Monitoring of Plant Leaf Temperature and Air and Soil Parameters. *Applied Sciences*, *13*(20). https://doi.org/10.3390/app132011294

Somboonsin, P., Vardoulakis, S., & Canudas-Romo, V. (2023). A comparative study of life-years lost attributable to air particulate matter in Asia-Pacific and European countries. *Chemosphere*, *338*, 139420. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139420

Theilman, J. M. (2023). *Air pollution history*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://www.ebsco.com/research-starters/environmental-sciences/air-pollution-history

URANY. (2022). ¿Qué es el movimiento? Recuperado el 4 de marzo de 2026, de https://urany.co/blog/qu%C3%A9-es-el-movimiento

Villa, T., Gonzalez, F., Miljevic, B., Ristovski, Z. D., & Morawska, L. (2016). An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future prospectives. *Sensors (Switzerland)*, *16*(7). https://doi.org/10.3390/s16071072

Wang, T., Han, W., Zhang, M., Yao, X., Zhang, L., Peng, X., Li, C., & Dan, X. (2020). Unmanned aerial vehicle-borne sensor system for atmosphere-particulate-matter measurements: Design and experiments. *Sensors (Switzerland)*, *20*(1). https://doi.org/10.3390/s20010057

Whitehill, A. R., Lunden, M., Lafranchi, B., Kaushik, S., & Solomon, P. A. (2024). Mobile air quality monitoring and comparison to fixed monitoring sites for instrument performance assessment. *Atmospheric Measurement Techniques*, *17*(9), 2991–3009. https://doi.org/10.5194/amt-17-2991-2024

Wilcoxon, F. (1945). Individual Comparisons by Ranking Methods. *Bulletin 1(6)*. https://doi.org/10.2307/3001968

World Bank. (2023). *Accelerating access to clean air for a livable planet*. World Bank Group. http://documents.worldbank.org/curated/en/099032625132535486

Wyzga, R. E., & Rohr, A. C. (2015). Long-term particulate matter exposure: Attributing health effects to individual PM components. *Journal of the Air and Waste Management Association*, *65*(5), 523–543. https://doi.org/10.1080/10962247.2015.1020396

Yang, M., Zeng, H. X., Wang, X. F., Hakkarainen, H., Leskinen, A., Komppula, M., Roponen, M., Wu, Q. Z., Xu, S. L., Lin, L. Z., Liu, R. Q., Hu, L. W., Yang, B. Y., Zeng, X. W., Dong, G. H., & Jalava, P. (2023). Sources, chemical components, and toxicological responses of size segregated urban air PM samples in high air pollution season in Guangzhou, China. *Science of the Total Environment*, *865*. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.161092

Zhang, Y., & Zhao, Y. (2015). Design and implementation of an air quality monitoring system for indoor environment based on microcontroller. *International Journal of Smart Home*, *9*(11), 301–312. https://doi.org/10.14257/ijsh.2015.9.11.29

Zmotion Autonomous Systems. (2025). *Mini Surveillance Quad | Rotary Wing System*. Recuperado el 24 de noviembre de 2025, de https://zmotion.in/mini-quad