



**PROTOCOLO DE MONITOREO PARA MATERIAL PARTICULADO EMITIDO EN LA
OBRA DEL PATIO TALLER ESTE EN LA CIUDAD DE NEIVA- HUILA.**

Autor:

**Johan Javier Oñate Núñez
Cesar Julián Trujillo Jiménez**

**UNIVERSIDAD DEL ROSARIO
MAESTRÍA EN CIUDADES INTELIGENTES Y SOSTENIBLES
ESCUELA DE INGENIERÍA, CIENCIA Y TECNOLOGÍA
Bogotá Colombia, julio de 2024**



**PROTOCOLO DE MONITOREO PARA MATERIAL PARTICULADO EMITIDO EN LA
OBRA DEL PATIO TALLER ESTE EN LA CIUDAD DE NEIVA- HUILA.**

Trabajo presentado para obtener el título de:
Magíster en Ciudades Inteligentes y Sostenibles

Autor:

Johan Javier Oñate Núñez
Cesar Julián Trujillo Jiménez

Director:

Prof. Mario Fernando Jiménez Hernández, PhD.

UNIVERSIDAD DEL ROSARIO
MAESTRÍA EN CIUDADES INTELIGENTES Y SOSTENIBLES
PROGRAMA – ESCUELA DE INGENIERÍA, CIENCIA Y TECNOLOGÍA
Bogotá Colombia, julio de 2024

AGRADECIMIENTOS

Nuestros más sinceros agradecimientos a Dios y a la vida, por permitirnos tener el apoyo de toda nuestra familia para afrontar un reto más y lograr subir otro peldaño en la carrera de la competencia diaria. El apoyo de todos los familiares, docentes y amigos se ve reflejado en una formación integra para el ejercicio de mejorar día a día nuestra sociedad.

Expresamos gratitud hacia todo el cuerpo docente de la Universidad del Rosario por afrontar la modalidad presencial con uso de metodología HyFlex y estar dispuesto a cumplir con su deber, para que nosotros como comunidad estudiantil mantuviéramos en firme nuestra disposición de adquirir conocimientos.

RESUMEN

En el presente proyecto de grado se desarrolló un protocolo de monitoreo utilizando un sensor comercial para la medición del Material Particulado PM10 y PM2.5 y determinar la calidad del aire en inmediaciones de la comuna 10 de la Ciudad de Neiva, Departamento del Huila, específicamente en la obra del Patio Taller Este.

Esta información fue analizada en dos (2) fases experimentales para conocer las variaciones del material particulado. En la fase experimental I, se realizaron mediciones adaptando el sensor a un vehículo aéreo no tripulado tipo dron durante las actividades de instalación de sub-base granular, mientras que en la fase experimental II, las mediciones se llevaron a cabo adaptando el sensor en una base fija durante las actividades de instalación del pavimento MR-42 en la construcción de la vía de acceso. Para dicho análisis, se utilizaron los datos registrados por el monitor profesional Atmotube PRO. Las mediciones se realizaron por catorce (14) días para la fase experimental I, comprendidos entre el 8 de abril y 26 de abril de 2024 y durante tres (3) días para la fase experimental II, comprendidos entre el 16 al 18 de julio de 2024.

Este proyecto se realizó con el acompañamiento del contratista de obra, quien, conforme a sus políticas, prioriza la protección de un medio ambiente sostenible. Ya que esto presenta en el sector construcción una problemática socio-ambiental.

Palabras claves: Calidad del aire, material particulado, dron.

ABSTRACT

In the present undergraduate project, a monitoring protocol was developed using a commercial sensor for measuring Particulate Matter PM10 and PM2.5. The objective was to determine the air quality in the vicinity of commune 10 in the City of Neiva, Department of Huila, specifically at the Este workshop yard construction site.

This information was analyzed in two (2) experimental phases to understand the variations in particulate matter. In Experimental Phase I, measurements were taken by adapting the sensor to an unmanned aerial vehicle (drone) during the installation activities of the granular sub-base, while in Experimental Phase II, measurements were taken by adapting the sensor to a fixed base during the installation activities of MR-42 pavement in the construction of the access road. For this analysis, data recorded by the professional monitor Atmotube PRO were used. Measurements were conducted over fourteen (14) days for Experimental Phase I, from April 8 to April 26, 2024, and over three (3) days for Experimental Phase II, from July 16 to July 18, 2024.

This project was conducted with the support of the construction contractor, who, in accordance with their policies, prioritizes the protection of a sustainable environment. This presents a socio-environmental issue within the construction sector.

Keywords: Air quality, particulate matter, drone.

CONTENIDO

CONTENIDO.....	6
INTRODUCCIÓN	12
1. PROBLEMA	14
2. JUSTIFICACIÓN.....	18
3. OBJETIVOS.....	23
3.1 Objetivo general	23
3.2 Objetivos específicos.....	23
4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	24
4.1 Bases teóricas	28
4.1.1 Material particulado	28
4.1.1.1 Material Particulado PM10.....	28
4.1.1.2 Material Particulado PM 2.5.....	29
4.2 Salud pública	30
4.3 Casos similares:.....	31
4.3.1 Informe Monitoreo y Análisis de Calidad de Aire en el marco del licenciamiento ambiental del Proyecto “Construcción de la Subestación Terminal y Líneas asociadas a 115 KV” de propiedad de CODENSA S.A. ESP.....	31
4.3.2 Construcción de contaminantes En el Valle de México.....	34
5. METODOLOGÍA.....	37
5.1 Localización para fases experimentales	37
5.2 Fases experimentales	38
5.2.1 Fase experimental I	38
Plataforma de monitoreo	38
5.2.2 Fase experimental II.....	38
Plataforma de monitoreo	38
5.3 Diseño experimental.....	39

5.3.1	Descripción de la zona de estudio	39
5.3.2	Etapas de ejecución del protocolo de monitoreo.....	45
5.4	Etapa I. Toma de datos en campo /Adquisición y Selección de componentes.....	46
	Aeronave no tripulada tipo dron:	46
	Sensor	48
	Base para estación fija.....	49
	Instalación y Configuración del protocolo de monitoreo	49
	Conectividad toma de datos.....	50
5.5	Etapa II. Registro y análisis de datos.....	50
5.5.1	Registros de los Datos	50
5.5.2	Análisis de los Datos	51
5.6	Etapa III. Retroalimentación de la información	51
5.6.1	Socialización partes interesadas	52
6.	RESULTADOS	53
6.1.1	Resultados monitoreo del Material Particulado	53
6.1.2	Análisis y visualización de los datos fase experimental I	54
6.1.3	Análisis y visualización de los datos fase experimental II.....	57
	CONCLUSIONES	60
	RECOMENDACIONES	62
	REFERENCIAS	64
	ANEXOS	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estaciones de calidad de aire, Neiva Huila	20
Tabla 2. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire.....	26
Tabla 3. Descripción general del índice de calidad del aire	26
Tabla 4. Rangos en los que han sido clasificados los valores del ICA de acuerdo al color asignado	27
Tabla 5. SVCA Indicativo.....	28
Tabla 6. Características del material particulado PM10.....	29
Tabla 7. Ficha técnica fase experimental I.....	40
Tabla 8. Ficha técnica fase experimental II.....	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Demografía y población del Municipio de Neiva Huila	15
Figura 2.	Concentración anual promedio de PM2.5 y población en 2016, en $\mu\text{g}/\text{m}^3$	18
Figura 3.	Municipios que requieren Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire, 2017.....	19
Figura 4.	Estaciones de calidad de aire, Neiva Huila	20
Figura 5.	Normativa de calidad de aire en Colombia.....	25
Figura 6.	Porcentaje de deposición de partículas en cada órgano del sistema respiratorio.....	30
Figura 7.	Monitoreo localidad de Fontibón.....	32
Figura 8.	Equipos de monitoreo utilizados.....	32
Figura 9.	Diagrama de caja para PM10 -Anual $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	33
Figura 10.	Diagrama de caja para PM10 -Anual $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$	34
Figura 11.	Ubicación Obra patio taller, Municipio de Neiva Huila, adaptado de Google Earth. ...	37
Figura 12.	Registro fotográfico fase experimental I.....	38
Figura 13.	Registro fotográfico fase experimental II	39
Figura 14.	Dron Autel nano +.	46
Figura 15.	Medidas internas Dron para base de sensor.	46
Figura 16.	Bloques de arcilla para prueba de peso	47
Figura 17.	Dron en prueba de peso.....	47
Figura 18.	Sensor- monitor profesional Atmotube PRO.....	48
Figura 19.	Aplicación Atmotube PRO Versión 3.2.24.....	48
Figura 20.	Estructura de soporte base fija.	49
Figura 21.	Sensor adaptado para la medición de calidad del aire.	49
Figura 22.	Ejemplo registro de datos.....	51
Figura 23.	Socialización con equipo Directivo de Obra y veedores al proyecto.	52
Figura 24.	Ejemplo resultado toma de datos día 20 abril de 2024 para PM 2.5 y PM 10.....	54
Figura 25.	Resultados toma de datos máximos acumulados por día en el de abril de 2024 para PM 2.5 y PM 10.	56
Figura 26.	Resultados de mediciones de PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Máxima distribución por día.	57

Figura 27.	Resultados de mediciones de PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por día.....	58
Figura 28.	Resultados de mediciones de PM 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Máxima distribución por día.	59
Figura 29.	Resultados de mediciones de PM 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por día.....	59
Figura 30.	Proyecto objeto de estudio.	66
Figura 31.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	66
Figura 32.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	66
Figura 33.	Actividades de uso del Dron con sensor adaptado para la medición de calidad del aire en zona de estudio.....	67
Figura 34.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	67
Figura 35.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	67
Figura 36.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	68
Figura 37.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	68
Figura 38.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	68
Figura 39.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	69
Figura 40.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	69
Figura 41.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	69
Figura 42.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	70
Figura 43.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	70
Figura 44.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	70
Figura 45.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	71
Figura 46.	Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.....	71

Figura 47. Toma de datos en actividades de pavimento MR-42 objeto de estudio.



Figura 47. Toma de datos en actividades de pavimento MR-42 objeto de estudio.....	72
Figura 48. Toma de datos en actividades de pavimento MR-42 objeto de estudio.....	72
Figura 49. Toma de datos en actividades de pavimento MR-42 objeto de estudio.....	72
Figura 50. Toma de datos en actividades de pavimento MR-42 objeto de estudio.....	73

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire es generada por emisiones, como los volcanes, acciones humanas, emisiones de los vehículos e industrias que funcionan para satisfacer las demandas de una población creciente que, para el año 2050, se estima superará en Colombia los 52 millones de habitantes[1]. En el país, la contaminación del aire es mayor en las principales ciudades. Por ejemplo, en Bogotá el aporte de los vehículos a las emisiones es del 78%. Por su parte, en Medellín, el 81 % de las emisiones de partículas proviene de los vehículos que, sumado a las características geográficas y del clima, ocasionan episodios críticos de contaminación del aire [1].

De acuerdo con la demografía (ver figura 1) y población suministrada por TerriData con fuente: DANE-Proyecciones de población con base en el Censo 2018, el Departamento del Huila tendrá en el año 2035 una población de 1.309.775 habitantes [2] y la Ciudad de Neiva tendrá en el año 2035 una población de 419.669 habitantes[3], lo que representaría el 32.04% de la población total del Departamento del Huila.

El incremento poblacional demanda una mayor prestación del servicio como el transporte y vivienda. Esto, mediante el desarrollo del sector construcción de obras civiles que generan emisiones contaminantes, ocasionando que la calidad del aire disminuya. Por lo que conocer la calidad del aire que se respira en la ciudad de Neiva se convierte en algo prioritario, ya que la exposición de la población a la contaminación del aire tiene efectos negativos en la salud. [4]

Por tanto, el presente proyecto de grado se centra en un protocolo de monitoreo para conocer los niveles de concentraciones de PM10 y PM2.5 en la obra del Patio Taller Este, en la ciudad de Neiva. En este protocolo, la información será analizada en dos (2) fases experimentales para conocer las variaciones del material particulado.

El resultado de este monitoreo permitirá conocer la calidad del aire en tiempo real durante las actividades desarrolladas en la obra del Patio Taller Este, tales como instalación de sub-base e instalación del pavimento MR-42 en la construcción de la vía de acceso. Cabe mencionar que

actualmente se desarrollan las actividades de rellenos y compactaciones con el material de subbase granular en el área interna de la obra del patio taller Este.

El presente documento contiene seis capítulos, además de la introducción, conclusiones y referencias. En el primer capítulo se presenta el planteamiento del problema. El segundo capítulo presenta la justificación en un contexto general. El tercer capítulo contiene los objetivos donde se orienta la ejecución y resultado del monitoreo del material particulado emitido en la obra del patio taller Este en la ciudad de Neiva. El cuarto capítulo presenta el marco conceptual y el estado del arte en el que se establecen las nociones claves para para la comprensión de este análisis. En el quinto capítulo se presenta la metodología de cómo se desarrolla este protocolo de monitoreo utilizando un sensor comercial para la medición del Material Particulado PM10 y PM2.5 y como último capítulo, se presenta los resultados obtenidos en cada fase experimental asociada actividad desarrollada en la obra Patio Taller Este en la Ciudad de Neiva.

1. PROBLEMA

El incremento de la población, el nivel de ingreso y de la búsqueda de una mejor calidad de vida, demandan una mayor prestación de servicios como el transporte y la producción de bienes. Adicionalmente, las actividades industriales generan emisiones de contaminantes, ocasionando que la calidad del aire en el país se encuentre en niveles que afectan la salud de las personas y el ambiente. De acuerdo con el estudio de valoración económica de la degradación ambiental en Colombia, en el año 2015 se asociaron con la baja calidad del aire más de 8.000 muertes por cáncer de pulmón y enfermedad cardiovascular en mayores de 44 años, y 22 muertes por todas las causas en menores de 5 años, así como 67 millones de enfermedades y síntomas respiratorios, además de restricción en el desarrollo de actividades y atenciones en los servicios de urgencias y hospitalización por causas respiratorias[1]. Los costos estimados por estas causas ascendieron a 12,3 billones de pesos, equivalentes al 1,5 % del PIB de 2015 [1].

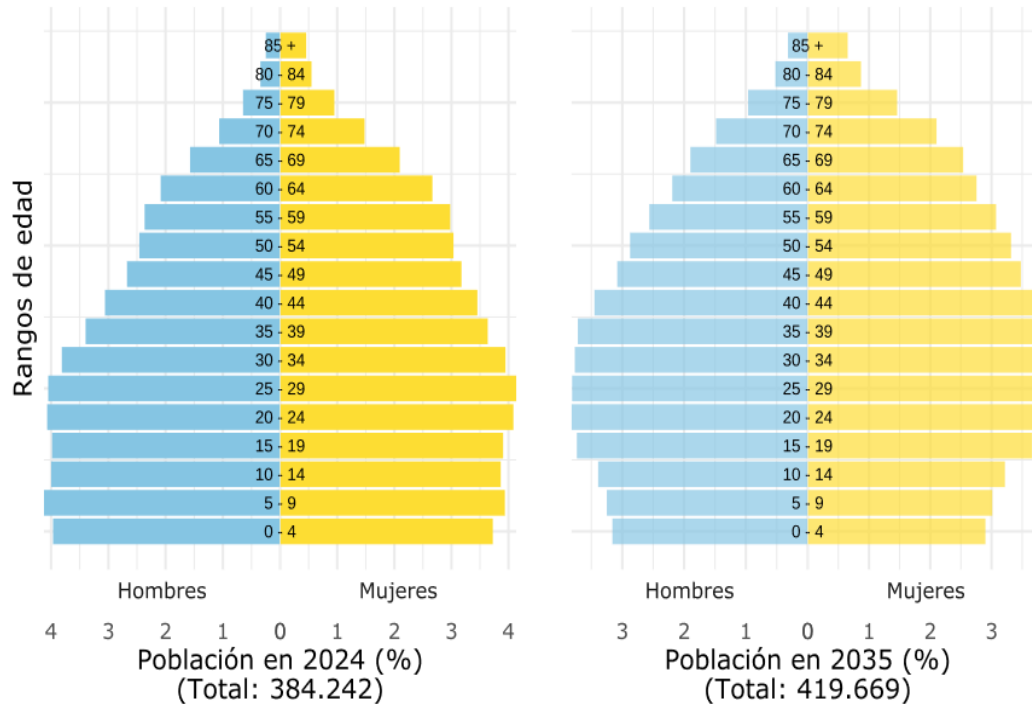
El crecimiento poblacional conlleva no solo al incremento en el sector industrial, sino también al incremento en el sector de la construcción, aumentando en la zona de intervención las emisiones de contaminantes a la atmósfera, siendo las más comunes: El Material Particulado menor a 10 micras (PM10). El PM10 también llamado partículas gruesas, tienen un tamaño comprendido entre 2.5 y 10 micrómetros, aproximadamente el ancho de un séptimo de cabello. El Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5), se conocen como partículas finas de menor de 2.5 micras de diámetro. Estas suponen un mayor peligro para la salud que el PM10, debido a que al inhalarlas pueden alcanzar zonas periféricas de los bronquiolos. [5]

La ciudad de Neiva, como capital del Departamento del Huila ha tenido un crecimiento poblacional significativo en los últimos años según las cifras del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). El cual proyecta una población de 419.669 habitantes en el año 2035[3]. Este crecimiento refleja una concentración demográfica en Neiva, siendo el Municipio más poblado del Huila y el sur colombiano, albergando el 32.04% de la población total de Huila. Mostrando una estructura poblacional con una notable proporción de jóvenes y adultos (ver figura 1).

Figura 1. Demografía y población del Municipio de Neiva Huila

Pirámides poblacionales (2024 y 2035)

Fuente: DANE - Proyecciones de población con base en el Censo 2018.



Fuente: Terridata sistema de Estadísticas Territoriales.[3]

El aire es un factor esencial para la vida y su deterioro es uno de los principales problemas que causa con mayor frecuencia la pérdida de la salud. La exposición a contaminantes del aire es uno de los problemas prioritarios que incrementan la morbilidad (cantidad de enfermos) y mortalidad (cantidad de muertes) de la población.[6]

La OMS estima que en 2019, aproximadamente el 37% de las muertes prematuras relacionadas con la contaminación del aire exterior se debieron a cardiopatías isquémicas y accidentes cerebrovasculares, el 18% y el 23% de las muertes se debieron a enfermedades pulmonares obstructivas crónicas e infecciones respiratorias agudas, respectivamente, y el 11% de las muertes se debieron a cáncer de las vías respiratorias.[7]

En Colombia, la normatividad en materia de calidad del aire y emisiones, orientada a la protección de la salud humana y medio ambiente, se encuentra estipulada en la resolución 2254 de 2017. Adicionalmente, destaca que según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el aire limpio es

un requisito fundamental para la salud y el bienestar humano. No obstante, la contaminación del aire sigue representando una amenaza importante para la salud en todo el mundo. [8]

Durante los últimos años, en el país se han venido desarrollando actividades orientadas a mejorar el monitoreo de la calidad del aire. Este progreso ha incluido la ampliación y el avance de las redes de monitoreo mediante el uso de tecnologías de medición más avanzadas. Permitiendo la implementación de diversas medidas para mejorar la calidad del aire en distintos sectores. Sin embargo, en el sector de la construcción la falta de rigor por parte de las autoridades ambientales, permite que estos monitoreos sean ignorados, lo que incrementa el riesgo de enfermedades en los trabajadores expuestos.

En la ciudad de Neiva en el Departamento del Huila, se carece de un programa de evaluaciones exhaustivas de emisiones en obras de construcción y por ende la falta de medidas de mitigación adecuadas, lo que genera condiciones de riesgos socio-ambientales.

La contaminación del aire derivada de la construcción supone un reto importante debido a las diversas fuentes y emanación de diferentes contaminantes. Así mismo, las partículas en suspensión representan una de las emisiones más perjudiciales para la salud, su peligrosidad deriva de su tamaño. No obstante, este proyecto de grado tiene como propósito implementar un protocolo de monitoreo de las emisiones contaminantes más comunes: el Material Particulado menor a 10 micras (PM10) y el Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5) en la obra Patio Taller Este en la ciudad de Neiva. Además, se pretende que estas mediciones permitan conocer el índice de calidad del aire (ICA) en tiempo real durante las actividades desarrolladas en la obra, tales como los movimientos mecánicos de tierra en corte y relleno, conforme el mejoramiento con material de sub-base y en la instalación del pavimento MR-42 en la construcción de la vía principal de acceso.

El enfoque multidisciplinario de este proyecto involucra conceptos de ciudades inteligentes y sostenibles, ingeniería civil y ambiental, salud pública y gestión de proyectos. La metodología comprende el desarrollo de un protocolo para el registro de datos en tiempo real en dos fases experimentales. Fase experimental I, utilizó de un sensor comercial adaptado a un vehículo aéreo

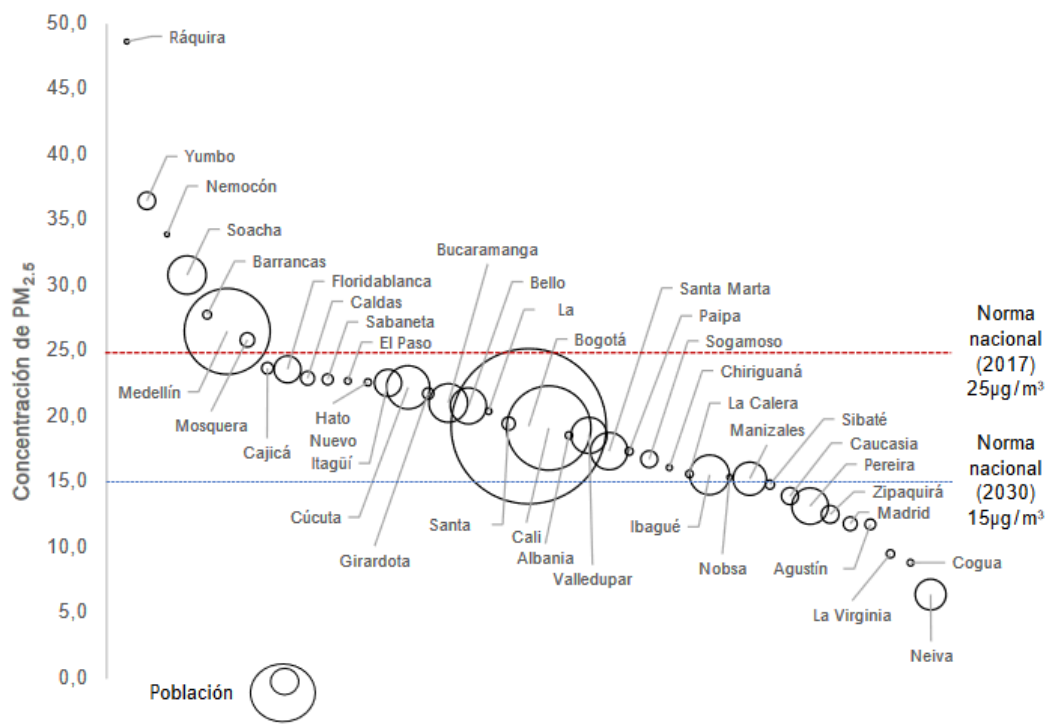
no tripulado (dron). En la fase experimental II, el sensor fue adaptado a una base fija para la medición de PM10 y PM2.5.

Los resultados de este protocolo de monitoreo del material particulado PM10 y PM2.5, permite conocer en tiempo real la cantidad de material particulado, la fase experimental I presenta el dron para acceder a áreas difíciles de alcanzar y proporcionar una cobertura más amplia en la zona de intervención. Además, su capacidad para volar a diferentes altitudes y seguir rutas programadas permite una recopilación de datos casi instantánea, identificando focos de contaminación y variaciones de material particulado, lo que permite una respuesta rápida y efectiva a los problemas de contaminación del aire. Por otro lado, que la fase experimental II, permite registrar datos extensos en zonas puntuales de trabajo en la obra, proporcionando un seguimiento constante y a largo plazo de la calidad del aire, lo que permite detectar tendencias y patrones en la concentración de PM10 y PM 2.5.

2. JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con los registros de los sistemas de vigilancia de calidad de aire (SVCA), el principal problema de contaminación del aire en Colombia es la concentración de PM10 y PM2.5, que supera el valor recomendado por la OMS (Para PM10 el valor guía recomendado por la OMS anual es 20µg/m3, el objetivo intermedio III es 30µg/m3. Para PM2.5 el valor guía anual es 10µg/m3 y el objetivo intermedio III es 15µg/m3) [9], en particular en los grandes centros urbanos como Bogotá, Medellín y Cali. (De acuerdo con las proyecciones de población para el año 2016 realizadas por el DANE, Bogotá cuenta con una población total de 7'980.001 habitantes, Medellín con 2'486.723 y Cali con 2'394.925).[1] En municipios como Yumbo, Nemocón, barrancas, Soacha, Mosquera con desarrollo de actividades industriales tal como se presenta en la figura 2, se observa que el 17 % de los municipios con estaciones de SVCA alcanzan niveles que superan la norma anual nacional establecida en 25µg/m3 para PM2,5 y el 78 % supera el valor recomendado por la OMS como intermedio III de 15µg/m3 concentración promedio anual de PM2.5.[1]

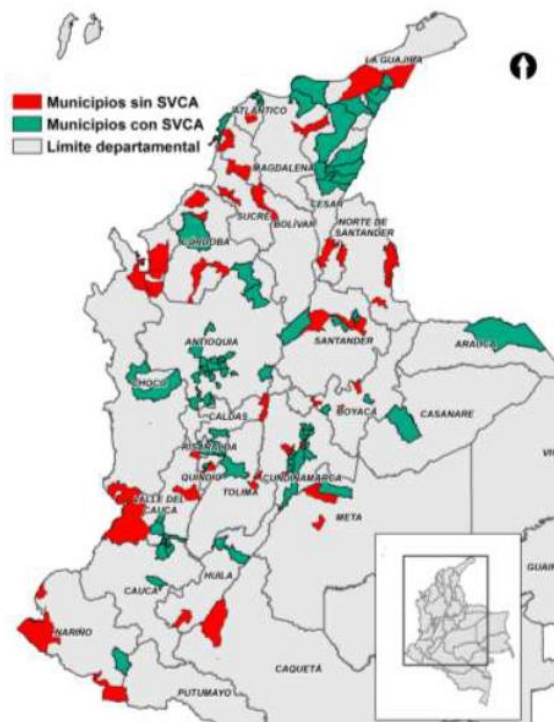
Figura 2. Concentración anual promedio de PM2.5 y población en 2016, en µg/m3



Para definir estrategias de prevención, reducción y control de la contaminación del aire, se cuenta con instrumentos de diagnóstico como inventarios de emisiones, modelos de dispersión de contaminantes y SVCA. Respecto a los inventarios de emisiones, se tiene que áreas del país como Barranquilla, Neiva, San Andrés, Tunja y Bucaramanga no han desarrollado inventarios y que los elaborados (para fuentes fijas y para fuentes móviles) entre 2010 y 2016 fueron desarrollados con metodologías diversas que no permite realizar análisis tendenciales, comparaciones entre áreas de estudio ni evaluaciones agregadas del país, por esta razón actualmente no se cuenta con un inventario nacional de emisiones. [1]

Adicionalmente, los reportes de los SVCA son uno de los elementos clave para determinar metas de reducción y medir la efectividad de las acciones contempladas en los planes de prevención y reducción de la contaminación del aire (ver figura 3). Pero la falta de información referente a la modelación de la calidad del aire no permite evaluar las necesidades de reubicación o de instalación de nuevas estaciones de monitoreo de calidad del aire, así como definir acciones de intervención sobre las fuentes que generan contaminantes del aire.

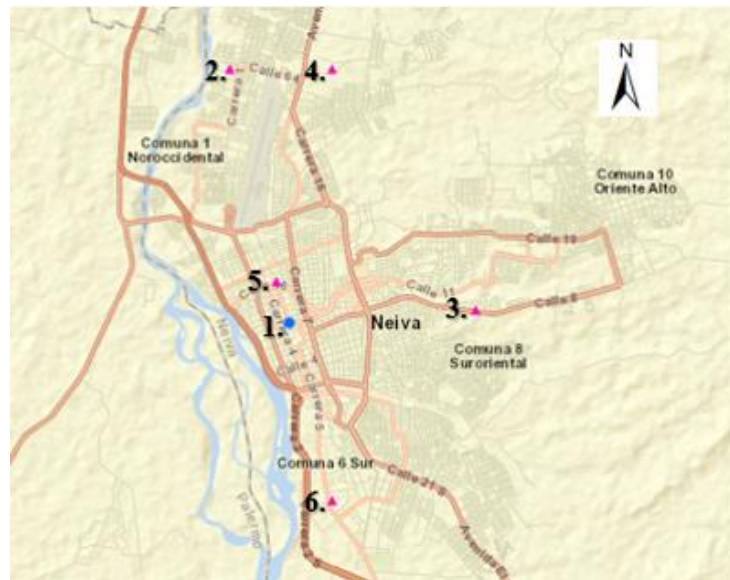
Figura 3. Municipios que requieren Sistemas de Vigilancia de Calidad del Aire, 2017



De igual forma, la deficiente cobertura, calidad y disponibilidad de la información de emisiones y calidad del aire, así como de la investigación y poca literatura orientada a un Sistema de monitoreo de PM10 y PM2.5, sumado a la falta de estudios exhaustivos y la ausencia de medidas específicas de mitigación representan un vacío en la gestión ambiental y la seguridad laboral en la Ciudad de Neiva.

Teniendo en cuenta lo anterior, se presentan las estaciones en la Ciudad de Neiva (ver figura 4) que pese a estas iniciativas las autoridades ambientales presentan atrasos en el diseño e implementación de planes de prevención, reducción y control de la contaminación del aire, como también no todas tienen datos disponibles y actualizados, además de variables indefinidas. Siendo la estación CAM Norte quien mide PM10 y PM2.5 en la Ciudad de Neiva. (ver tabla 1).

Figura 4. Estaciones de calidad de aire, Neiva Huila



Fuente: Sistema de Inf Sobre la Calidad del Aire (Sisaire)

Tabla 1. Estaciones de calidad de aire, Neiva Huila

Ítem	Nombre Estación	Tipo Estación	Sistema de Vigilancia	Identificador de estaciones	Variable que Mide
1.	ALCALDIA DE NEIVA	Fija	SISAIRE	31824	PM10
2.	CAM NORTE	Indicativa	SISAIRE	9117	PM10, PM2.5
3.	SEDE CORHUILA	Indicativa	SISAIRE	8905	PM10
4.	SENA INDUSTRIAL	Indicativa	SISAIRE	8902	Variable indefinida
5.	SENA COMERCIAL	Indicativa	SISAIRE	8904	Variable indefinida
6.	POSTOBON	Indicativa	SISAIRE	8903	Variable indefinida

Fuente: Autores - Sistema de Información Sobre la Calidad del Aire (Sisaire)-

Para fortalecer los procesos de prevención, reducción y control de la contaminación del aire, este proyecto de grado propone la implementación de un protocolo de monitoreo utilizando un sensor acoplado a una aeronave no tripulada tipo dron y a una base fija. Este protocolo permitirá la toma y registro de datos sobre las emisiones y determinación de los niveles de material particulado PM 10 y PM 2.5, con esta iniciativa, se contribuye a la aproximación de generación de datos científicos sólidos, que respaldarán la toma de decisiones informadas en políticas ambientales y prácticas de construcción sostenibles; aportando con ello al desarrollo inteligente y sostenible de la ciudad de Neiva.

Este proyecto radica en la necesidad de revisar la emisión de Material Particulado de 10 micras (PM10) y Material Particulado de 2.5 micras (PM2.5) en la obra del patio taller Este, específicamente en la ciudad de Neiva, teniendo en cuenta la naturaleza de las actividades que se ejecutan en obra. A medida que la ejecución de proyectos de vivienda, de infraestructura y el desarrollo avanzan, se vuelve esencial garantizar la salud y el bienestar de la población local y del entorno.

La relevancia de este proyecto se manifiesta en su potencial para conocer de forma clara y sencilla los datos de PM10 Y PM2.5 del aire, en la medida que son de fácil comprensión y permiten no solo a los expertos en el tema, sino a cualquier persona que tenga un interés en relación con la problemática tratada, generar recomendaciones y/o programas que creen estrategias de mitigación para reducir los riesgos para la salud de los trabajadores y la comunidad, garantizando a su vez que la ciudad de Neiva de un salto a la tecnología en toma de datos y el desarrollo sostenible que podrán implementarse en futuras obras de construcción, promoviendo prácticas responsables y conscientes del impacto ambiental.

Si bien sabemos que la afección de una obra es temporal, puesto que se encuentra limitada al tiempo en que se ejecuten las actividades, no se exime de realizar un monitoreo que permita adoptar las medidas necesarias, especialmente en aquellas actividades que por su naturaleza generan más emisiones de material particulado, tal como lo son las actividades de movimientos de tierras.

En este sentido se puede decir que la contaminación por emisiones de PM10 y PM2.5 en obra supone un impacto que no debe subestimarse; como se aprecia en casos similares del presente documento, por lo cual es relevante garantizar que las actividades que se ejecuten en obra no comprometan la salud de los trabajadores ni el medio ambiente.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Desarrollar un protocolo de monitoreo para medir el material particulado emitido en la obra del patio taller Este en la ciudad de Neiva- Huila, utilizando un sensor acoplado a un vehículo aéreo no tripulado.

3.2 Objetivos específicos

- Implementar un protocolo para la medición de Material Particulado utilizando un vehículo aéreo no tripulado tipo dron, un sensor comercial para la medición de PM10 y PM2.5 y una estación fija.
- Determinar a partir del protocolo la cantidad de PM10 y PM2.5 emitido en la obra durante la actividad de instalación de subbase granular y en la actividad de pavimento MR-42 en la construcción de la vía de acceso.
- Analizar los datos recopilados durante las pruebas realizadas con el protocolo de monitoreo para comprender los patrones del Material Particulado PM10 y PM2.5.

4. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

La calidad del aire, según la OMS, se refiere a la composición física, química y biológica del aire en relación con sus efectos en la salud de los seres humanos y el medio ambiente. La OMS establece directrices y estándares internacionales para evaluar y gestionar la calidad del aire con el objetivo de proteger la salud pública.[10]

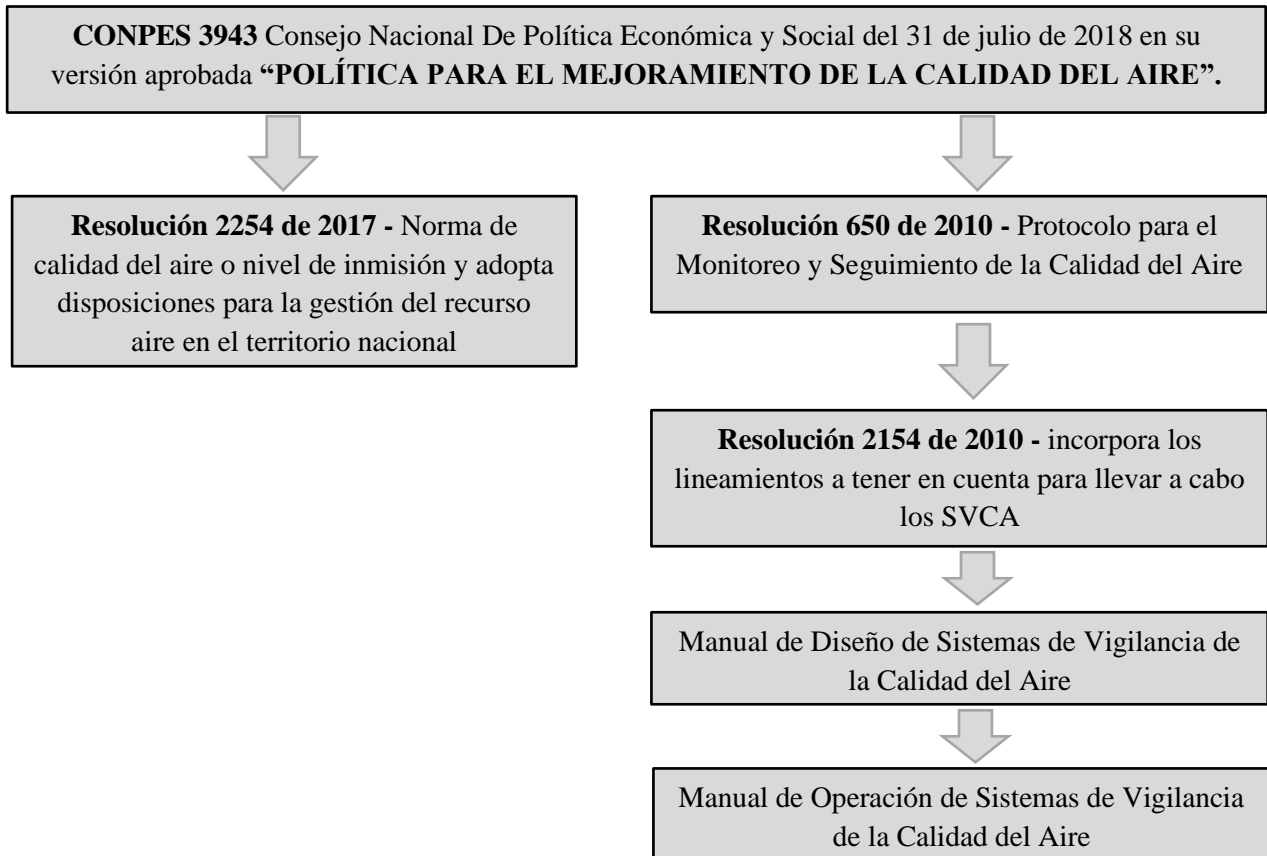
En Colombia, el monitoreo y control de la contaminación atmosférica ha tomado día a día mayor relevancia, debido a que, según cifras de la Organización Mundial de la Salud, una de cada ocho muertes ocurridas a nivel mundial, es ocasionada por la contaminación del aire. [11] A nivel nacional, el Departamento Nacional de Planeación estimó que, durante el año 2015, los efectos de este fenómeno estuvieron asociados a 10.527 muertes y 67,8 millones de síntomas y enfermedades. Adicionalmente, los costos ambientales asociados a la contaminación atmosférica en Colombia, durante los últimos años se incrementaron pasando de 1,1% del PIB de 2009 (\$5,7 billones de pesos) a 1,59% del PIB de 2014 (\$12 billones de pesos) y del 1,93% del PIB en 2015 (\$15.4 billones de pesos), lo cual pone en evidencia la necesidad de seguir implementando estrategias para controlar, evaluar y monitorear estas sustancias. [12]

Colombia ha tomado diversas acciones en materia para el control de la contaminación del aire. Inicialmente, en 1967 se instalaron los primeros equipos para el monitoreo de la calidad del aire, pero sólo fue hasta el año 1982 cuando a través del Decreto 02 se adoptó la primera norma que reguló la emisión y concentración de contaminantes en la atmósfera. [13]

La normatividad en Colombia en materia de calidad del aire y emisiones se ha planteado en función de la protección de la salud humana y medio ambiente. La resolución 2254 de 2017, [8] atiende las recomendaciones realizadas por la Organización Mundial de la Salud – OMS, que busca determinar el estado de la calidad del aire relacionado con los riesgos a la salud a los que puede estar expuesta la población y las acciones preventivas a tomar. Mediante un indicador que permite establecer el estado de la calidad del aire de acuerdo al rango establecido para cada contaminante criterio, asociando rangos de valores a una tabla de colores.[14]

De lo anterior, tenemos una estructura normativa en el país, que ha determinado los lineamientos necesarios, los cuales se resumen a continuación por su año de expedición:

Figura 5. Normativa de calidad de aire en Colombia



Fuente: Los autores-Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

La Resolución 2254 de 2017 establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión y adopta disposiciones para la gestión del recurso aire en el territorio nacional, con el objeto de garantizar un ambiente sano y minimizar el riesgo sobre la salud humana que pueda ser causado por la exposición a los contaminantes en la atmósfera.

En Colombia, el Índice de Calidad del Aire (ICA) permite comparar los niveles de contaminación de calidad del aire, de la estación de monitoreo. El ICA, se define como un valor representativo de los niveles de contaminación atmosférica y sus efectos en la salud, dentro de una región determinada. Para efectos del presente estudio, se tienen en cuenta la tabla No. 2, la cual muestra

los niveles máximos permisibles por contaminante solamente para PM 10 y PM 2.5, con base en la Resolución 2254 de 2017:

Tabla 2. Niveles máximos permisibles de contaminantes criterio en el aire.

Contaminante	Nivel máximo permisible (ug/m3)	Tiempo de Exposición
PM10	50	Anual
	100	24 horas
PM2.5	25	Anual
	50	24 horas

Fuente: Autores - Resolución 2254 de 2017

Así mismo; Los valores del ICA se ubican en una escala adimensional de 0 a 500, que han sido agrupados en 6 rangos que guardan estrecha relación con la amenaza que, a la salud humana, representan dichos niveles de contaminación del aire y determinan un conjunto de acciones preventivas que se recomienda sean tenidas en cuenta por la población. Como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Descripción general del índice de calidad del aire

Rango	Color	Estado de la calidad del aire	Efectos
$0 \leq ICA \leq 50$	Verde	Buena	La contaminación atmosférica supone un riesgo bajo para la salud.
$51 \leq ICA \leq 100$	Amarillo	Aceptable	Posibles síntomas respiratorios en grupos poblacionales sensibles.
$101 \leq ICA \leq 150$	Anaranjado	Dañina a la salud de grupos sensibles	Los grupos poblaciones sensibles pueden presentar efectos sobre la salud. 1) Ozono Troposférico: Las personas con enfermedades pulmonares, niños, adultos mayores y las que constantemente realizan actividad física al aire libre, deben reducir su exposición a los contaminantes del aire. 2) Material Particulado: Las personas con enfermedad cardiaca o pulmonar, los adultos mayores y los niños se consideran sensibles y por lo tanto en mayor riesgo

$151 \leq ICA \leq 200$	Rojo	Dañina para la salud	Todos los individuos pueden comenzar a experimentar efectos sobre la salud. Los grupos sensibles pueden experimentar efectos más graves para la salud.
$201 \leq ICA \leq 300$	Morado	Muy dañina para la salud	Estado de alerta que significa que todos pueden la salud experimentar efectos más graves para la salud.
$301 \leq ICA \leq 500$	Marrón	Peligroso	Advertencia sanitaria. Toda la población puede presentar efectos adversos graves en la salud humana y están propensos a verse afectados por graves efectos sobre la salud.

Fuente: Autores - Resolución 2254 de 2017

y para facilitar la interpretación la tabla 4. presenta los rangos en los que han sido clasificados los valores que puede tomar el Índice de calidad del aire, junto con el color que le fue asignado para identificar de forma sencilla la alerta que representa el nivel de contaminación.

Tabla 4. Rangos en los que han sido clasificados los valores del ICA de acuerdo al color asignado

Rango -ICA	Colores
$0 \leq ICA \leq 50$	Verde
$51 \leq ICA \leq 100$	Amarillo
$101 \leq ICA \leq 150$	Anaranjado
$151 \leq ICA \leq 200$	Rojo
$201 \leq ICA \leq 300$	Morado
$301 \leq ICA \leq 500$	Marrón

Fuente: Autores - Resolución 2254 de 2017

Dentro de los lineamientos del Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad de Aire, diseñado por Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, establecen los lineamientos y elementos conceptuales para el diseño de un SVCA dependiendo de su ubicación, funcionalidad y manejo; y de los cuales se tomaron las bases para la estructuración del protocolo

que se desarrolla en el presente proyecto. Dentro de esos lineamientos tenemos el siguiente análisis para el diseño del protocolo.

Tabla 5. SVCA Indicativo

Características	Parámetro	Observaciones
TECNOLOGÍA DE MEDICIÓN	Muestreo activo.	
TIEMPO DE MONITOREO	Mínimo tres meses en época seca.	Podrá monitorearse también en combinación de época seca y húmeda (mínimo 1,5 meses en época seca)
PERIODICIDAD DEL MONITOREO	Máximo cada 3 años se deberá repetir la campaña.	Se variará el periodo de acuerdo al análisis normativo
PARÁMETROS A MEDIR	PM10	
PERIODICIDAD DEL MUESTREO	Mediciones de 24 horas, cada tercer día	Se deben completar como mínimo 30 muestras en cada estación.

Fuente: Autores – Manual de diseño de SVCA[15].

4.1 Bases teóricas

4.1.1 Material particulado

El material particulado “se define como el conjunto de partículas sólidas y/o líquidas presentes en suspensión en la atmósfera, que se originan a partir de una gran variedad de fuentes naturales o antropogénicas y poseen un amplio rango de propiedades morfológicas, físicas, químicas y termodinámicas”. La presencia en la atmósfera de este contaminante ocasiona variedad de impactos a la vegetación y el hombre, entre ellos, la disminución visual en la atmósfera, causada por la absorción y dispersión de la luz. Además, la presencia del material particulado está asociada con el incremento del riesgo de muerte. [15]

4.1.1.1 Material Particulado PM10

El material particulado respirable consiste en toda la materia emitida como sólidos, líquidos y vapores pero que están suspendidas en el aire. Las partículas se pueden emitir directamente a la atmósfera (partículas primarias) o formadas en ésta última por reacciones químicas (partículas

secundarias). El tamaño de partícula, expresado generalmente en términos de su diámetro aerodinámico, y la composición química son influenciados por su origen [17].

Descripción

Las partículas respirables PM10, incluyen a todas las partículas de diámetro aerodinámico igual o inferior a 10 µm. Los efectos sobre la salud humana dependen en gran parte del tamaño de la partícula debido principalmente al nivel de penetración en diferentes partes del sistema respiratorio.

En la tabla 6, se presenta una breve referencia sobre este tipo de compuestos:

Tabla 6. Características del material particulado PM10.

Propiedad	Característica
Definición	Cualquier material sólido o líquido dividido finamente diferente al agua no combinada según medición
Ejemplos	Polvo, humo, gotitas de petróleo, berilio, asbesto entre otros.
Fuentes	Hornos, trituradoras, molinos, afiladores, estufas, calcinadores, calderas, incineradores, bandas transportadoras, acabados textiles, mezcladoras y tolvas, cubilotes, equipo procesador, cabinas de aspersión, digestores, incendios forestales entre otros.
Efectos	Visibilidad disminuida, efecto del humo y el polvo sobre la salud humana, enfermedades crónicas del sistema respiratorio, asbestosis, envenenamiento con plomo, suciedad de la casa y la ropa, destrucción de la vida vegetal y la agricultura y efectos sobre el clima.
Otros	Las partículas pequeñas son particularmente peligrosas para la salud humana porque su pequeño tamaño hace posible que pasen a través de los vellos de las fosas nasales y lleguen al interior de los pulmones.

Fuente: Autores - Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de Calidad de Aire. Anexo 1. Año 2010 [17]

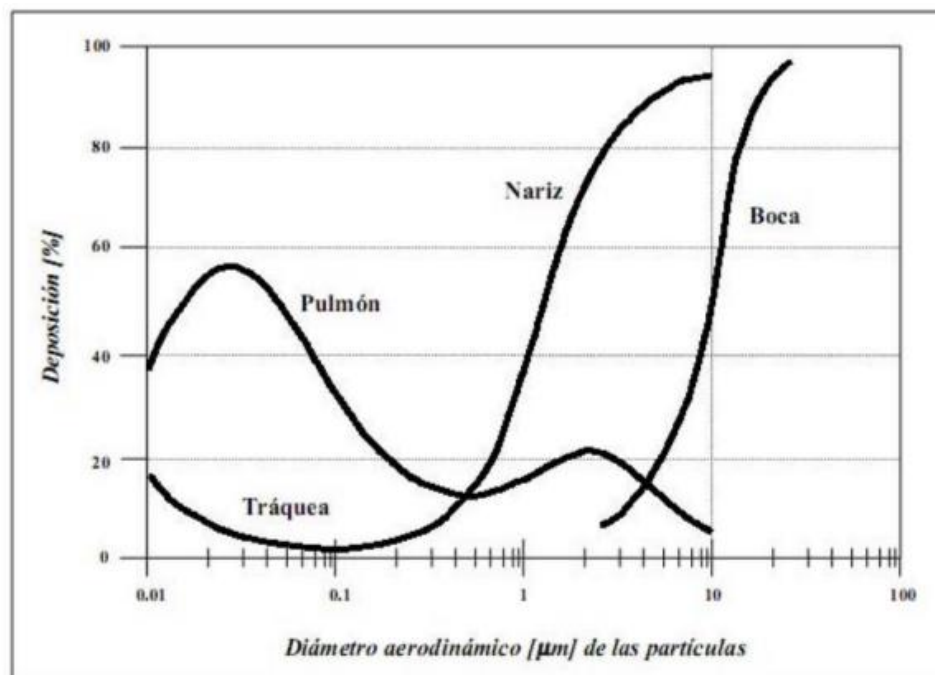
4.1.1.2 Material Particulado PM 2.5

El material particulado se presenta de diversas formas, tamaño y propiedades, pueden ser desde pequeñas gotas de líquido a partículas microscópicas de polvo. Las partículas también dependen del tipo de fuentes, entre los cuales se encuentran las fuentes industriales (construcción, combustión y minería) y las fuentes naturales (incendios forestales y volcanes)[17].

Descripción

La magnitud de las partículas atmosféricas cubre órdenes desde decenas de angstroms (Å) hasta varios cientos de micrómetros. Las partículas de menos de 2,5 µm en diámetro (PM2.5), generalmente se refieren como “finas” y las mayores de 2,5 µm como gruesas. Los modos de partículas gruesas y finas, en general, se originan separadamente, se transforman separadamente, son removidas de la atmosfera por diferentes mecanismos, requieren diferentes técnicas para su remoción de las fuentes, tienen diferente composición química, diferentes propiedades ópticas y difieren en sus patrones de deposición en el tracto respiratorio como se observa en la siguiente figura 6.

Figura 6. Porcentaje de deposición de partículas en cada órgano del sistema respiratorio



Fuente: Swisscontact, Curso de Calidad del aire [17]

4.2 Salud pública

El riesgo en salud pública se presenta especialmente con las partículas respirables y las nano partículas. Las partículas respirables “penetran por la nariz y la garganta, llegan a los pulmones y provocan problemas de respiración, irritación de los capilares pulmonares, morbilidad respiratoria, deficiencia de las funciones pulmonares, disminución de la función pulmonar y cáncer de pulmón, con el consiguiente aumento de la mortalidad.” Reconociendo que la mala calidad del aire es un problema cada vez más grave en el contexto del desarrollo sostenible, especialmente en lo

relacionado con la salud en las ciudades y zonas urbanas, y que hace falta un empeño intersectorial para mejorar la calidad del aire. [18]

Las nano partículas es un campo de investigación por lo cual, aunque se sabe de su potencial de riesgo, estos últimos no se conocen suficientemente; Es conocido que hay nano partículas inocuas para los humanos mientras otras son totalmente nocivas, el potencial de daño depende directamente de la clase de material del que está compuesta la nano partícula. [19]

Esta contaminación atmosférica por partículas suspendidas, también puede provocar un efecto negativo en el medioambiente. Pero la exposición a la contaminación por partículas tiende a afectar mayormente a personas con enfermedades cardíacas o pulmonares, niños y adultos mayores, porque pueden llegar a la profundidad de los pulmones, sino porque algunas pueden alcanzar el torrente sanguíneo y afectar tanto a los pulmones como al corazón. [20]

4.3 Casos similares:

4.3.1 Informe Monitoreo y Análisis de Calidad de Aire en el marco del licenciamiento ambiental del Proyecto “Construcción de la Subestación Terminal y Líneas asociadas a 115 KV” de propiedad de CODENSA S.A. ESP

El informe contiene el análisis del monitoreo de la calidad de aire en el proyecto de construcción de la subestación terminal, como requisito establecido por la corporación ambiental para el licenciamiento de las obras. El proyecto se encuentra ubicado en la localidad de Fontibón de la ciudad de Bogotá y el monitoreo se registró mediante la instalación de dos (2) estaciones fijas, siguiendo con los lineamientos establecidos en el manual de diseño de SVCA para una estación Tipo I: Indicativo. Como se muestra en la figura 7.

Figura 7. Monitoreo localidad de Fontibón.



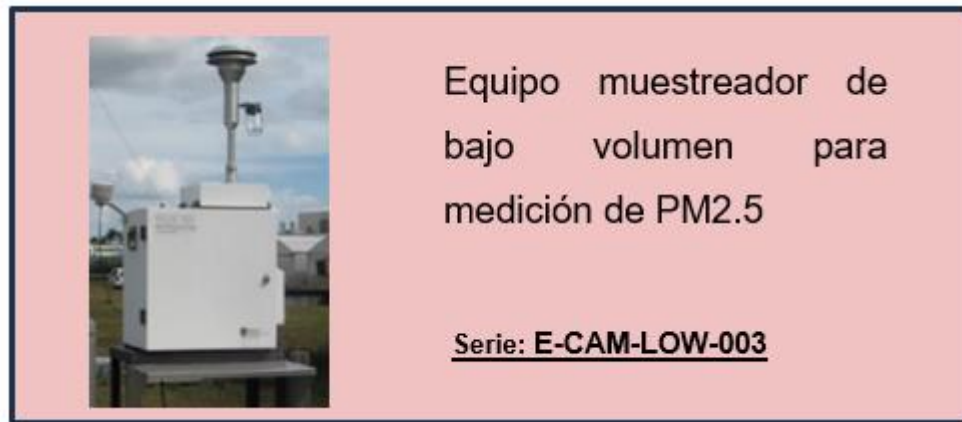
Fuente: Los autores- Enel

En el montaje se tomaron los registros para los niveles de: material particulado inhalable expresado como PM10, material particulado fino expresado como PM2.5, Dióxido de Nitrógeno NO₂, Dióxido de Azufre SO₂, Monóxido de Carbono CO y Ozono O₃. Las mediciones de calidad del aire fueron desarrolladas por el laboratorio SIAM Ingeniería S.A.S, entre el 13 de agosto y el 30 de agosto de 2019.

Los equipos utilizados en el monitoreo de PM10 y PM2,5 fueron los siguientes:

Figura 8. Equipos de monitoreo utilizados

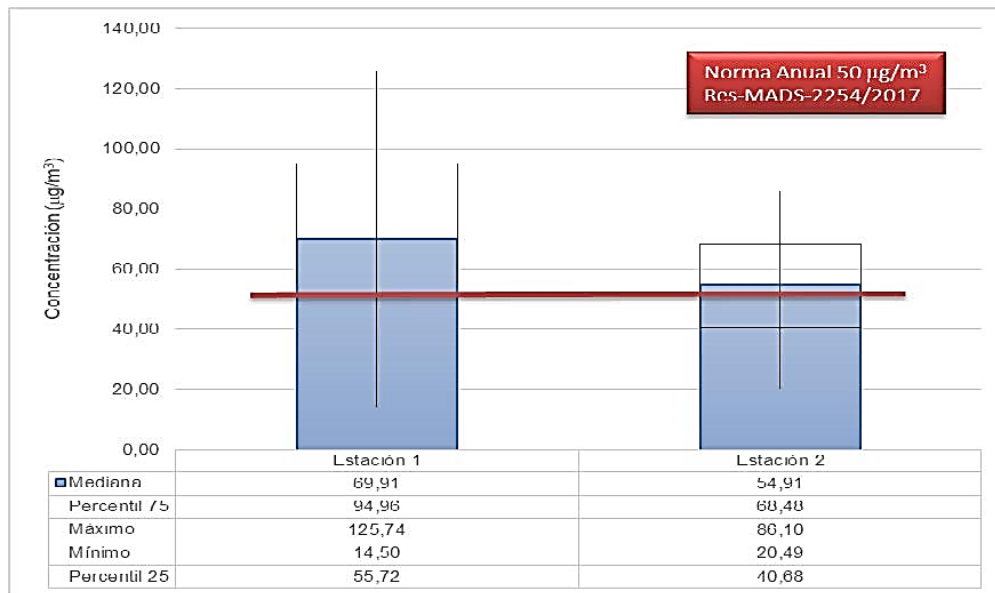




Fuente: Los autores- Enel

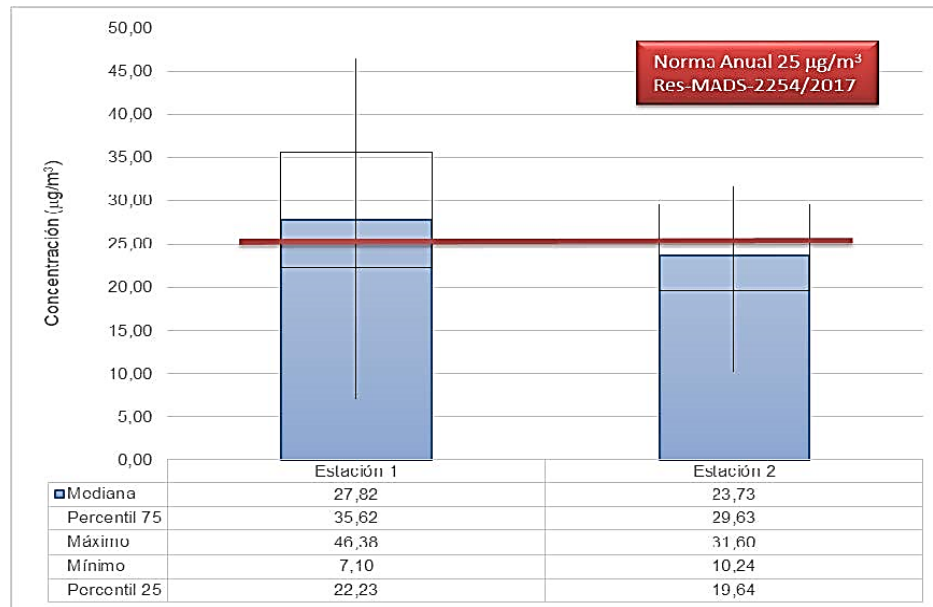
Analizados los datos obtenidos por los encargados en la elaboración del informe, se puede observar claramente los registros y su análisis estadístico, determinando los resultados de las concentraciones de PM10 y PM2.5 en cada una de las estaciones, estableciendo al final un índice de calidad de aire para el proyecto de construcción de la subestación terminal.

Figura 9. Diagrama de caja para PM10 -Anual 50 µg/m³



Fuente: Los autores- Enel

Figura 10. Diagrama de caja para PM10 -Anual 25 µg/m³



Fuente: Los autores- Enel

Como conclusiones del informe se tiene como máxima concentración diaria de PM10 con un valor de 125,74 µg/m³ se presentó el día 29 de agosto de 2019 en la estación Papa a la lata, dicho valor no cumple con el límite máximo permisible establecido en la Resolución 2254 de 2017 del MADS para un tiempo de exposición de 24 horas de 75 µg/m³.

4.3.2 Construcción de contaminantes En el Valle de México

Este artículo aborda la problemática de la contaminación del aire en el Valle de México, especialmente enfocándose en el impacto de las actividades de construcción en la generación de contaminantes como partículas suspendidas (PM10 y PM2.5) y ozono (O3). A pesar de la importancia de esta cuestión, las autoridades parecen minimizar el papel de la construcción en la emisión de contaminantes, lo que podría ser un error grave.

Se discute cómo las actividades de construcción contribuyen significativamente a la contaminación del aire, generando partículas suspendidas y emitiendo gases y sustancias nocivas como resultado de la quema de combustibles fósiles y el uso de materiales de construcción. Además, se señala que la contaminación del aire y el calentamiento global están interrelacionados, creando un ciclo que puede aumentar los riesgos para la salud humana y el medio ambiente.

También se destaca la necesidad de tomar medidas urgentes para reducir la contaminación ambiental, incluyendo regulaciones más estrictas para las actividades de construcción y la promoción de prácticas más sostenibles en este sector[21].

Es tan significativo el daño producido por las partículas suspendidas, ya sean PM10 o PM2.5 (aquellas de 2.5 micras o menos), generadas durante los trabajos de construcción, que algunas ciudades de otros países (como Estados Unidos o Inglaterra) las calculan como parte del pronóstico de las emisiones que serán generadas por las obras de construcción dentro de sus “guías” de calidad del aire. Por ejemplo, el condado de Sacramento, en California, establece que “en algunos casos, las emisiones de la construcción representan el mayor impacto para la calidad del aire asociado con un proyecto. Aunque la generación de emisiones relacionadas con la construcción tenga una naturaleza temporal, estas emisiones contribuyen al inventario del Condado de Sacramento. [21]

De manera similar, la guía del Instituto de Administración de la Calidad del Aire (Institute of Air Quality Management) en Londres señala: “Además de los requisitos legales de salud y seguridad, otros reglamentos ahora exigen a las autoridades locales que trabajen para alcanzar los objetivos nacionales de calidad del aire y, por lo tanto, los operarios de obras de construcción tendrán que demostrar que tanto la emisión de polvo como de partículas finas del lugar de la obra están controlados adecuadamente y dentro de los límites aceptables” (en este caso, menos de 250 microgramos –la millonésima parte de un gramo– por metro cúbico en 15 minutos).[21]

La Organización Mundial de la Salud, en su “Lineamiento para la calidad del aire 2005”, reconoce el riesgo que representa la contaminación por partículas suspendidas para la salud humana, y establece, para las partículas PM10, los límites máximos de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (microgramos por metro cúbico) promedio en 24 horas y de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio anual, y para las PM2.5, de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio en 24 horas y de 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ como promedio anual.[21]

Igualmente, de acuerdo con los estándares para la calidad ambiental de la Unión Europea, modificados en 2015, los máximos permitidos para la concentración de partículas PM10 son de 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en 24 horas (sin exceder 35 ocurrencias al año) y de 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en el año. Para las PM2.5, el límite es de 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en el año.[21]

En México, la Norma Oficial Mexicana NOM-025-SSA1-2014 de Salud Ambiental establece, como valores límite permisibles para la concentración de las partículas suspendidas PM10, 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ promedio en 24 horas y 40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio anual, y para las PM2.5, un máximo de 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio de 24 horas, y de 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, como promedio anual. No obstante, actualmente diversas zonas del Valle de México superan esos límites durante varias horas al día, alcanzando más de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM10. En consecuencia, durante 78 de los primeros 98 días transcurridos de 2016, el promedio de PM10 rebasó el límite considerado seguro para la salud, con picos que exceden los 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. [21]

5. METODOLOGÍA

Este proyecto de grado propone la implementación de un protocolo de monitoreo para conocer los niveles de concentraciones de PM10 y PM2.5 en la obra del Patio Taller Este, con base en el Manual de Diseño de SVCA para un sistema Tipo I: Indicativo. El cual permite evaluar el riesgo para la salud humana y determinar posibles riesgos para el medio ambiente. En este protocolo, la información será analizada en dos (2) fases experimentales para conocer las variaciones del material particulado. En la fase experimental I, se realizaron mediciones adaptando un sensor comercial a un vehículo aéreo no tripulado tipo dron, durante las actividades de instalación de sub-base granular, mientras que en la fase experimental II, las mediciones se llevaron a cabo adaptando el sensor comercial en una base fija durante las actividades de instalación del pavimento MR-42. durante la construcción de la vía de acceso.

5.1 Localización para fases experimentales

Para la ubicación de las estaciones de monitoreo de cada fase experimental en el área de influencia, se tuvo en cuenta zonas donde se ubicarán fuentes que podrían tener una potencial afectación a la calidad del aire conforme los procesos contractivos en lo relacionado a la construcción de la vía de acceso de la obra del Patio Taller Este, ubicada en la comuna 10 de la Ciudad de Neiva, en el Departamento del Huila, específicamente en el barrio El Tesoro. En la figura 11 se observa la localización de la obra del Patio Taller Este.

Figura 11. Ubicación Obra patio taller, Municipio de Neiva Huila, adaptado de Google Earth.



5.2 Fases experimentales

5.2.1 Fase experimental I

Plataforma de monitoreo

Los equipos incluidos en el presente monitoreo para cuantificar el material particulado PM 10 y PM 2.5 en la fase experimental I fueron el vehículo aéreo no tripulado tipo dron y los datos registrados por el monitor profesional Atmotube PRO (sensor de material particulado. Ambos conforman una plataforma móvil para el monitoreo del PM 10 y PM 2.5).

La concentración de material particulado suspendido en la atmosfera se determinó mediante este método móvil (ver figura 12), donde la muestra de aire para análisis de PM10 y PM2.5 se toma cuando el flujo de aire ingresa al sensor comercial adaptado al dron, durante el proceso constructivo de la instalación de subbase granular, durante un periodo inferior a una hora ya que está limitada a la duración de las baterías del dron. Para el registro de estos datos no se tuvo en cuenta la influencia del viento generado por las hélices del dron en el sensor.

Figura 12.Registro fotográfico fase experimental I



Fuente: Los autores.

5.2.2 Fase experimental II

Plataforma de monitoreo

Para la fase experimental II se utilizó un base fija y los datos registrados por el monitor profesional Atmotube PRO (sensor fijo). La concentración de material particulado suspendido en la atmosfera se determinó mediante este método de estación fija (ver figura 13), donde la muestra de aire para análisis de PM10 y PM2.5 se toma cuando el flujo de aire ingresa al sensor comercial acoplado a

una base fija durante el proceso constructivo de la instalación de pavimento en MR-42 para la vía de acceso en un periodo de 24 horas.

Figura 13.Registro fotográfico fase experimental II



Fuente: Los autores.

5.3 Diseño experimental

En la fase experimental I, se realizaron mediciones por catorce (14) días comprendidos entre el 8 de abril y 26 de abril de 2024, durante las actividades de instalación de sub-base granular, mientras que en la fase experimental II se llevaron a cabo por tres (3) días comprendidos entre el 16 al 18 de julio de 2024, durante las actividades de instalación del pavimento MR-42 en la construcción de la vía de acceso principal del Patio Taller Este, dichos procesos constructivos emplean maquinaria pesada (amarilla) tales como volquetas, motoniveladora, rodillo compactador vibratorio y camión mezclador o mixer, los cuales generan polvo. Para ello, se utilizaron los datos registrados por el monitor profesional Atmotube PRO (sensor).

5.3.1 Descripción de la zona de estudio

Las mediciones de calidad de aire se colocaron de tal manera que registraran el grado de contaminación actual y permitieran identificar las fuentes predominantes en las actividades realizadas en obra. En la siguiente tabla 7 y tabla 8 se describe las fichas de registro de información



para cada una de las fases experimentales teniendo en cuenta los lineamientos del manual de SVCA.

Tabla 7. Ficha técnica fase experimental I.

INFORMACIÓN GENERAL Y CRITERIOS DE UBICACIÓN			
NOMBRE ESTACIÓN:	Obra Patio Este		Estación No.
MUNICIPIO / DTO:	Neiva / Huila		1
GEORREFERENCIACIÓN:	Latitud: 2,9523426	ASNM (m):	492.49
	Longitud: - 75,2633489	ALT. DEL SUELO:	Variable: (3 - 15mts)
TIPO DE ESTACIÓN:			
Nivel I: Área	Nivel II: Tiempo	Nivel III: Emisiones Dominantes	
Urbana: <input checked="" type="checkbox"/>	Fija: <input type="checkbox"/>	Tráfico:	-
Suburbana: <input type="checkbox"/>	Indicativa: <input checked="" type="checkbox"/>	Punto Crítico:	X
Rural: <input type="checkbox"/>		Industrial:	-
		De Fondo:	-
Nivel IV: Información			
TRAFICO:		INDUSTRIAL:	
Distancia al borde (m):	N.A	Tipo de Industria:	N.A
Ancho de la Vía:	12	Distancia Fuentes (Km):	N.A
Tráfico Diario Sentido 1:	N.A	Dirección (Grados):	N.A
Tráfico Diario Sentido 2:	N.A		
Velocidad Promedio:	20	PUNTO CRITICO:	
% Vehículos Pesados:	80%	Fuente Evaluada:	-
Estado de la Vía:	Sin Pavimentar	Calle Encajonada:	-
		Calle Libre:	X
INDICATIVAS:		RURALES DE FONDO:	
Tiempo de Muestreo:	14 días	Cercana Ciudades:	-
Seco/Húmedo:	Seco	Regionales:	-
Fecha Inicio:	2024-04-08		
OBJETIVOS REPRESENTATIVIDAD DE LA ESTACIÓN:			

Prototipo de monitoreo móvil utilizando un sensor comercial para la medición del Material Particulado PM10 y PM2.5 adaptado a un vehículo aéreo no tripulado tipo dron en la obra del patio taller Este en la ciudad de Neiva- Huila.					
REPRESENTATIVIDAD					
Estudio de calidad de aire, indicativo por 14 días entre el 8 de abril y 26 de abril de 2024.					
FUENTES DE EMISIÓN:					
Principal Fuente:		Instalación de sub-base granular sobre la vía de acceso			
Segunda Fuente:		Traslado y movimiento de maquinaria y volquetas			
Tercera Fuente:					
CONFIGURACIÓN DE LA ESTACIÓN:					
PARÁMETRO		TECNOLOGÍA	MÉTODO REFERENCIA	METEOROLOGÍA	
PM2.5	X	Automático	ATMO Tube - Pro	D. Viento	-
PM10	X	Automático	ATMO Tube - Pro	V. Viento	X
PST		-	-	PBAROMÉTRIC A	X
CO	X	-	-	TAMBIENTE	X
SO2	X	-	-	H. Relativa	X
NO2	X	-	-	Precipitación	-
O3	X	-	-	Rad. Solar	-
DATOS DEL PERSONAL ENCARGADO:					
Resp. Diligenciamiento:	Johan Oñate	Cargo:	Investigador	FECHA:	08/04/2024

Elementos	Criterio	Observaciones
ESTACIÓN	Seguridad y entorno	Bueno
	Limpieza	Bueno
	Conexiones eléctricas	Bueno
	Estabilidad de la estructura	Buena
	¿Existen salidas de sistemas de aire acondicionado o ventilaciones cerca?	No
	¿Existen zonas de parqueo, depósitos de químicos o de combustibles?	Si
	¿La estación tiene generadores eléctricos a combustible?	No
	¿Existen acumulaciones de residuos sólidos o líquidos en las cercanías?	No
	¿Existen fuentes menores cercanas de contaminación como hornos, o quemadores de basuras?	No
	¿Existen carreteras destapadas, campos deportivos o lotes sin vegetación?	Si

MUESTREADOR	¿Cuenta con supresor de picos?		Si
	Voltaje de entrada al equipo		110 v
	¿Es estable?		Si
	Describa la conexión eléctrica realizada		Conexión eléctrica 110 v
Criterio	Dimensión	Observaciones	¿Cumple?
Altura de la toma muestra (m)*	3 - 15 mts	Se encuentra instalado en andamio sobre terraza	Cumple
Distancia a obstáculos elevados (m)	N/A	Zona despejada	Cumple
Diferencia de altura entre el muestreador y el obstáculo elevado (m)	N/A	No se presenta obstáculo elevado	Cumple
Distancia vertical desde las estructuras de soporte hasta el toma muestra (m)	N/A	Piso de terraza a inlet	Cumple
Distancia a otra toma muestras de PM (m)	N/A	PM10 – PM2.5	Cumple
Distancia a árboles (m)	N/A	Zona despejada	Cumple
Distancia de separación a vías (m)	N/A	Vía secundaria	Cumple
Norte:		Este: * Vía sin pavimentar a una distancia de 15 m.	
			
Oeste:		Sur:	

Fuente: Los autores- Manual de Diseño de SVCA.



Tabla 8. Ficha técnica fase experimental II.

INFORMACIÓN GENERAL Y CRITERIOS DE UBICACIÓN			
NOMBRE ESTACIÓN:	Obra Patio Este	Estación No.	2
MUNICIPIO / DTO:	Neiva / Huila		
GEORREFERENCIACIÓN:	Latitud: 2,9523426	ASNM (m):	492.49
	Longitud: - 75,2633489	ALT. DEL SUELO:	2 mts
TIPO DE ESTACIÓN:			

Nivel I: Área		Nivel II: Tiempo		Nivel III: Emisiones Dominantes	
Urbana:	<input checked="" type="checkbox"/>	Fija:	<input type="checkbox"/>	Tráfico:	<input type="checkbox" value="-"/>
Suburbana:	<input type="checkbox"/>	Indicativa:	<input checked="" type="checkbox"/>	Punto Crítico:	<input checked="" type="checkbox"/>
Rural:	<input type="checkbox"/>			Industrial:	<input type="checkbox" value="-"/>
				De Fondo:	<input type="checkbox" value="-"/>
Nivel IV: Información					
TRAFICO:			INDUSTRIAL:		
Distancia al borde (m):	-	N.A	Tipo de Industria:	-	N.A
Ancho de la Vía:		12	Distancia Fuentes (Km):		N.A
Tráfico Diario Sentido 1:		N.A	Dirección (Grados):		N.A
Tráfico Diario Sentido 2:		N.A			
Velocidad Promedio:		20	PUNTO CRITICO:		
% Vehículos Pesados:		80%	Fuente Evaluada:		<input type="checkbox" value="-"/>
Estado de la Vía:		En Obra	Calle Encajonada:		<input type="checkbox" value="-"/>
			Calle Libre:		<input checked="" type="checkbox"/>
INDICATIVAS:			RURALES DE FONDO:		
Tiempo de Muestreo:	-	3	Cercana Ciudades Regionales:		<input type="checkbox" value="-"/>
Seco/Húmedo:		Seco			<input type="checkbox" value="-"/>
Fecha Inicio:		2024-07-16			
OBJETIVOS REPRESENTATIVIDAD DE LA ESTACIÓN:					
Prototipo de monitoreo en base fija utilizando un sensor comercial para la medición del Material Particulado PM10 y PM2.5 adaptado a una base tomando datos de manera continua en la obra del patio taller Este en la ciudad de Neiva- Huila.					
REPRESENTATIVIDAD					
Estudio de calidad de aire, indicativo por 3 días entre el 16 de julio y 18 de julio de 2024.					
FUENTES DE EMISIÓN:					
Principal Fuente:	Construcción placa de pavimento en MR-45				
Segunda Fuente:	Traslado y movimiento de mixer y volquetas				
Tercera Fuente:					
CONFIGURACIÓN DE LA ESTACIÓN:					
PARÁMETRO		TECNOLOGÍA	MÉTODO REFERENCIA	METEOROLOGÍA	
PM2.5	<input checked="" type="checkbox"/>	Automático	ATMO Tube - Pro	D. Viento	<input type="checkbox" value="-"/>

PM10	X	Automático	ATMO Tube - Pro	V. Viento	X
PST		-	-	PBAROMÉTRIC A	X
CO	X	-	-	TAMBIENTE	X
SO2	X	-	-	H. Relativa	X
NO2	X	-	-	Precipitación	-
O3	X	-	-	Rad. Solar	-
DATOS DEL PERSONAL ENCARGADO:					
Resp. Diligenciamiento:	Johan Oñate	Cargo:	Investigdor	FECHA:	16/07/2024

Elementos	Col 2	Criterio	Observaciones
ESTACIÓN		Seguridad y entorno	Bueno
		Limpieza	Bueno
		Conexiones eléctricas	Bueno
		Estabilidad de la estructura	Buena
		¿Existen salidas de sistemas de aire acondicionado o ventilaciones cerca?	No
		¿Existen zonas de parqueo, depósitos de químicos o de combustibles?	Si
		¿La estación tiene generadores eléctricos a combustible?	No
		¿Existen acumulaciones de residuos sólidos o líquidos en las cercanías?	No
		¿Existen fuentes menores cercanas de contaminación como hornos, o quemadores de basuras?	No
		¿Existen carreteras destapadas, campos deportivos o lotes sin vegetación?	Si
MUESTREADOR		¿Cuenta con supresor de picos?	Si
		Voltaje de entrada al equipo	110 v
		¿Es estable?	Si
		Describa la conexión eléctrica realizada	Conexión eléctrica 110 v
Criterio	Dimensión	Observaciones	¿Cumple?
Altura de la toma muestra (m)*	3 - 15 mts	Se encuentra instalado en andamio sobre terraza	Cumple
Distancia a obstáculos elevados (m)	N/A	Zona despejada	Cumple
Diferencia de altura entre el muestreador y el obstáculo elevado (m)	N/A	No se presenta obstáculo elevado	Cumple
Distancia vertical desde las estructuras de soporte hasta él toma muestra (m)	N/A	Piso de terraza a inlet	Cumple

Distancia a otra toma muestras de PM (m)	N/A	PM10 – PM2.5	Cumple
Distancia a árboles (m)	N/A	Zona despejada	Cumple
Distancia de separación a vías (m)	N/A	Vía secundaria	Cumple
Norte:		Este: * Vía en proceso de pavimentación.	
			
Oeste:		Sur:	

Fuente: Los autores- Manual de Diseño de SVCA.

5.3.2 Etapas de ejecución del protocolo de monitoreo

Para el desarrollo de este protocolo se establecieron (3) tres etapas para medir el PM10 y PM2.5 en la obra del patio taller Este en la Ciudad de Neiva;

La Etapa I que hace referencia a la Toma de datos en campo, en la cual se implementa un protocolo de monitoreo para determinar el material particulado PM10 y PM 2.5 emitido en la obra del patio taller Este en la ciudad de Neiva- Huila, utilizando un sensor acoplado a una aeronave no tripulada tipo dron y a una base fija.

Etapa II. hace referencia al registro y análisis de datos el cual determina el Índice de calidad del aire para el Material Particulado menor a 10 micras (PM10) y Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5).

Etapa III. Retroalimentación de la información, donde se consolidan y analizan los datos obtenidos de PM10 y PM2.5 para formular recomendaciones dirigidas a mejorar la calidad del aire en la obra del patio taller Este, en la ciudad de Neiva.

5.4 Etapa I. Toma de datos en campo /Adquisición y Selección de componentes

Aeronave no tripulada tipo dron:

Para la fase experimental I, El dron seleccionado para poder adaptar el sensor es el Autel nano + (ver figura 14), con un peso aproximado de 249 g. Dicho peso le permite permanecer en el aire más tiempo que drones de consumo similares en el mercado, con hasta 28 minutos de tiempo de vuelo con una batería completamente cargada.

Figura 14.Dron Autel nano +.



Fuente: Autel nano +, [22]

Durante el trabajo previo de campo fue importante conocer las medidas internas del dron, la cuales fueron requeridas para dimensionar el espacio para poder adaptar y/o colocar el sensor. Esta medida obtenida fue de 4 cm x 8 cm aproximadamente, teniendo en cuenta de no tocar las cuchillas o hélices del dron, como se muestra en la figura 15.

Figura 15.Medidas internas Dron para base de sensor.



Fuente: Los autores

De igual forma, durante el trabajo previo de campo fue importante conocer el peso máximo y precisión al flotar teniendo en cuenta las velocidades del viento que lograría soportar el dron con el peso incorporado. Para ello se realizaron bloques de arcilla de 40g, 45g, 50g y 55g como se muestra en la figura 16.

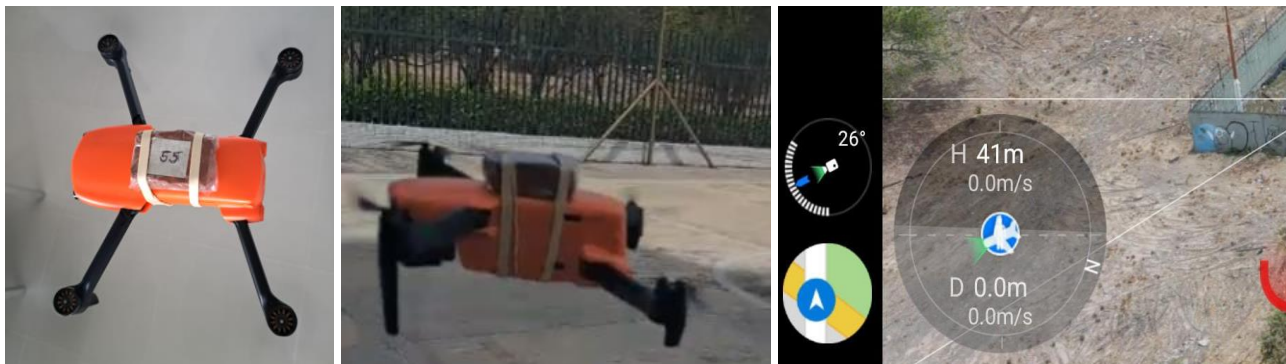
Figura 16. Bloques de arcilla para prueba de peso



Fuente: Los autores

Por último, se realizaron pruebas de vuelo del dron evaluando su capacidad con los pesos descritos en la figura anterior, Y se determinó que el peso máximo que este dron pudo soportar fue 55 gramos, el equivalente al 22% de su propio peso, a una altura de 41 m. como se muestra en la siguiente figura 17.

Figura 17. Dron en prueba de peso

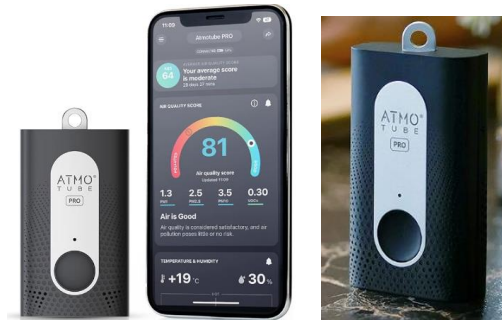


Fuente: Los autores

Sensor

El sensor seleccionado para el monitoreo de las variables de calidad del aire PM2.5 y PM10 es el monitor profesional Atmotube PRO (ver figura 18) de calidad del aire para exteriores e interiores. Dicho sensor cuenta con una batería con hasta 7 días de duración. Es un rastreador de calidad del aire en tiempo real, el cual permite monitorear constantemente el entorno que rodea, midiendo con precisión una amplia gama de material particulado, compuestos orgánicos volátiles (COV) y detecta contaminantes PM2.5 y PM10, Además de considerar sus características de funcionamiento y dimensiones, se evaluó su peso, que es de 18 gramos, lo cual lo hace ideal para ser soportado por el dron [23].

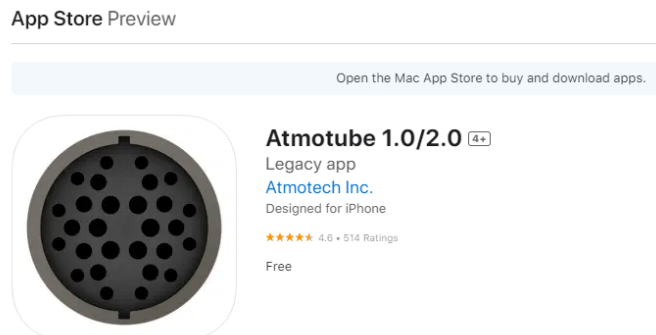
Figura 18.Sensor- monitor profesional Atmotube PRO.



Fuente: Atmotube PRO [23]

De igual forma el sensor seleccionado para el monitoreo de las variables de calidad del aire PM2.5 y PM10 cuenta con la aplicación móvil Atmotube 1.0/2.0 (ver figura 19), disponible para iPhone y también está disponible en la App Store. [24]

Figura 19.Aplicación Atmotube PRO Versión 3.2.24.



Fuente: Aplicación Atmotube PRO [24]

Base para estación fija

Para la fase experimental II, se optó por una base fija metálica (ver figura 20), cuya estructura es robusta y duradera, diseñada específicamente para proporcionar soporte estable y seguro al sensor comercial destinado a la medición del material particulado PM10 y PM2.5. la estructura cuenta con una plataforma superior plana donde se monta el sensor. Esta plataforma está equipada con orificios y ranuras para fijar el sensor firmemente con tornillos o abrazaderas, asegurando que permanezca en su lugar incluso bajo condiciones climáticas adversas.

Figura 20. Estructura de soporte base fija.



Fuente: Autores

Instalación y Configuración del protocolo de monitoreo

Finalmente se procede con la implementación del protocolo de monitoreo móvil para el registro de datos del material particulado PM10 y PM2.5 emitido en la obra del patio taller Este en la ciudad de Neiva- Huila, Esto se logra mediante la instalación y adaptación física del sensor en una aeronave no tripulada tipo dron y estación fija, la cual se despliega en los puntos o zonas previamente seleccionados para la toma de información en ambas fases experimentales, como se muestra en la figura 21.

Figura 21. Sensor adaptado para la medición de calidad del aire.



Fuente: Los autores.

Conectividad toma de datos.

La conectividad para el monitoreo del material particulado PM10 y PM2.5 emitido en la obra del patio taller Este, fue mediante conexión Bluetooth a un dispositivo móvil, utilizando la aplicación Atmotube 1.0/2.0 disponible para iPhone y también está disponible en la App Store. Esta aplicación permite la Visualización de los datos desde un celular en tiempo real mediante su conexión al móvil, recopilando la información del sensor y almacenándola en una base de datos en formato .csv proporcionado por la aplicación, la cual se puede exportar y descargar desde el mismo celular. Este archivo csv es compatible con la mayoría de los programas de hojas de cálculo (como Microsoft Excel, Google Sheets) y sistemas de bases de datos, con una estructura fácil de leer y escribir, lo que facilita su procesamiento y análisis.

5.5 Etapa II. Registro y análisis de datos

5.5.1 Registros de los Datos

Una vez iniciada las actividades asociadas con los procesos constructivos en las actividades de las fases experimentales relacionadas con instalación de sub-base granular y pavimento MR-42 en la vía de acceso de la obra. Se procede con la implementación del protocolo de monitoreo para el registro de datos en tiempo real en dos fases experimentales. En la fase experimental I, se utilizó de un sensor comercial adaptado a un vehículo aéreo no tripulado (dron), mientras la fase experimental II, el sensor fue adaptado a una base fija para la medición de PM10 y PM2.5. Con el objetivo de registrar datos que permitan conocer el Índice de calidad del aire (ICA) en la zona de intervención. Durante estos registros, el sensor recopila información sobre los niveles de calidad del aire relacionados con PM 10 y PM 2.5, la cual se almacena en una base de datos en un archivo formato .csv. Como se observa en la figura 22.

Figura 22. Ejemplo registro de datos.

```

ate;VOC, ppm;AQS;Temperature, °C;Humidity, %;Pressure, hPa;PM1, ug/m³;PM2.5, ug/m³;PM10, ug/m³;Latitude;Longitude
/03/2024 18:18;0.002;62;29;50;947.4;32;35;36;2.943347456;-75.25556621
/03/2024 18:17;0.017;58;29;49;947.4;36;40;41;2.943347456;-75.25556621
/03/2024 18:16;0.005;58;29;48;947.4;36;40;41;2.943243027;-75.25558067
/03/2024 18:15;0.58;29;51;947.5;36;40;41;2.943727493;-75.25559337
/03/2024 18:14;0.58;29;49;947.4;36;40;41;2.94461441;-75.25702681
/03/2024 18:13;0.005;58;29;50;948.4;36;40;41;2.946651459;-75.25948126
/03/2024 18:12;0.014;58;30;49;948.7;36;40;41;2.946321487;-75.26131985
/03/2024 18:11;0.58;30;48;949.4;36;40;41;2.941560745;-75.26320557
/03/2024 18:10;0.58;31;44;949.2;36;40;41;2.940940857;-75.26496773
/03/2024 18:09;0.022;58;31;44;950.1;36;40;41;2.940694809;-75.27056565
/03/2024 18:08;0.022;0;31;46;950.4;138;147;148;2.940694809;-75.27056565
/03/2024 18:07;0.055;0;31;45;950.3;138;147;148;2.940694809;-75.27056565
/03/2024 18:06;0.003;0;30;48;950.4;138;147;148;2.937583923;-75.2806193
/03/2024 18:05;0;0;30;47;956;138;147;148;2.937997818;-75.28031985
/03/2024 18:04;0.048;0;30;48;956.3;138;147;148;2.937400964;-75.28171593
/03/2024 18:03;0.012;55;29;50;956.4;41;44;45;2.938673019;-75.28195694
/03/2024 18:02;0.063;55;29;49;956.4;41;44;45;2.940197197;-75.28267518
/03/2024 18:01;0.007;61;29;49;956.4;33;36;38;2.940197197;-75.28267518
/03/2024 18:00;0.053;78;28;50;956.3;16;19;22;;
/03/2024 17:59;0.08;78;28;52;956.4;16;19;22;;
/03/2024 17:58;0;78;27;34;957.6;16;19;22;;
/03/2024 17:57;0.001;78;27;38;958;16;19;22;;
/03/2024 17:56;0;67;27;45;958.2;28;32;35;;
/03/2024 17:55;0;67;27;52;958.3;28;32;35;;
/03/2024 17:54;0.01;67;26;54;958.2;28;32;35;;
/03/2024 17:53;0.054;67;26;51;958.1;28;32;35;;
/03/2024 17:52;0.031;67;25;49;958;28;32;35;;
/03/2024 17:51;0.023;67;25;49;958;28;32;35;;
/03/2024 17:50;0.061;67;25;49;957.9;28;32;35;;
/03/2024 17:49;0.029;67;25;33;957.9;28;32;35;;
    
```

Fuente: Los autores - Aplicación Atmotube PRO

5.5.2 Análisis de los Datos

Este análisis implicó varios pasos, desde la lectura del archivo .csv hasta la realización de análisis y la visualización de los mismos. Con la importación del archivo .csv el cual se cargó inicialmente en Microsoft Excel y luego se transfirió a Google Sheets, para un procesamiento más accesible. Una vez los datos fueron cargados en ambas plataformas, se procedió a una exploración inicial para comprender su estructura, identificar tipos de datos y evaluar su contenido. Esta etapa se realizó sin aplicar criterios de exclusión, permitiendo un análisis exhaustivo de la totalidad del dataset (o conjunto de datos) (ver figura 22).

Se realizó una conversión al formato de los datos, toda vez que siendo el dato numérico estaban en formato de fecha. Finalizada la conversión de los datos se procedió a la visualización de datos con la ayuda de la herramienta Looker Studio para la fase experimental I y Python para la fase experimental II, y finalmente la interpretación del registro de datos de calidad del aire para PM 10 y PM2.5.

5.6 Etapa III. Retroalimentación de la información

Con los resultados obtenidos se lleva a cabo un análisis integral para identificar patrones y tendencias en las concentraciones de material particulado, donde se propone brindar algunas recomendaciones efectivas que permitan contribuir a la mejora de la calidad del aire, en relación con el Material Particulado menor a 10 micras (PM10) y Material Particulado menor a 2.5 micras

(PM2.5). Estas recomendaciones incluyen medidas técnicas y operativas para reducir las emisiones de material particulado en la obra.

Las concentraciones reportadas son fundamentales para conocer los Índices de Calidad del Aire (ICA). Los resultados de los niveles de PM10 y PM2.5 reflejan directamente el comportamiento de los ICA, lo que permite una interpretación demostrativa de la calidad del aire en función de estos índices.

5.6.1 Socialización partes interesadas

Con base en los resultados se planteó una socialización del proyecto con trabajadores, personal del proyecto y algunos residentes locales (ver figura 23), para explicar eficazmente el proceso de toma de muestras y datos de la calidad del aire en la obra en ejecución del patio taller este, en la ciudad de Neiva.

Figura 23. Socialización con equipo Directivo de Obra y veedores al proyecto.



Fuente: Los autores

6. RESULTADOS

6.1.1 Resultados monitoreo del Material Particulado

Durante los periodos de toma de datos en las dos fases experimentales, se obtuvo una temperatura mínima de 31 °C y máxima de 41.5 °C y una humedad máxima de 49 % con base a los registros generados por el monitor profesional Atmotube PRO (sensor). Estos factores ambientales pueden influir en las concentraciones de material particulado, dado que la temperatura y la humedad afectan tanto la dispersión como la formación de partículas en suspensión.

Revisando las tendencias en los datos obtenidos para PM10 y PM2.5 en las actividades de instalación de subbase granular para la construcción de la vía de acceso en la obra del patio taller asociada a la fase experimental I, se muestran variaciones significativas a lo largo del periodo de estudio, observando que en un 35% de los días monitoreados el material particulado menor a 10 micras (PM10) superaron los 500 µg/m³. De igual forma aproximadamente el 30 % de los días monitoreados, el material particulado menor a 2.5 micras (PM2.5) superaron los 300 µg/m³; siendo los anteriores resultados tendencias altas y muy superiores a los arrojados por la unidad de la de la Corporación Autónoma del Alto Magdalena, CAM, que desde el año 2020, el valor máximo ha sido de 37ug/m³, muy por debajo del límite establecido. Adicionalmente, el dato referido ‘PM10’ durante el mes de diciembre de 2023 el resultado fue de 25 ug/m³, mientras que para el mes de enero de 2024 fue de 21.92 ug/m³, donde ug/m³ son microgramos sobre centímetros cúbicos. [25]

La medición de la calidad del aire es el primer paso para entender y abordar cualquier problema de calidad del aire que pueda existir. Por eso este protocolo permitirá conocer en tiempo real las concentraciones de las variables de interés para determinar la calidad del aire, las cuales pueden ser nocivas para la salud si alcanzan niveles altos o se mantienen durante tiempos prolongados, generando diversos problemas de salud. Además, el protocolo de monitoreo de calidad ambiental, adaptado en un dron, podrá ser utilizado en áreas alejadas de las estaciones meteorológicas fijas, proporcionando datos en tiempo real.

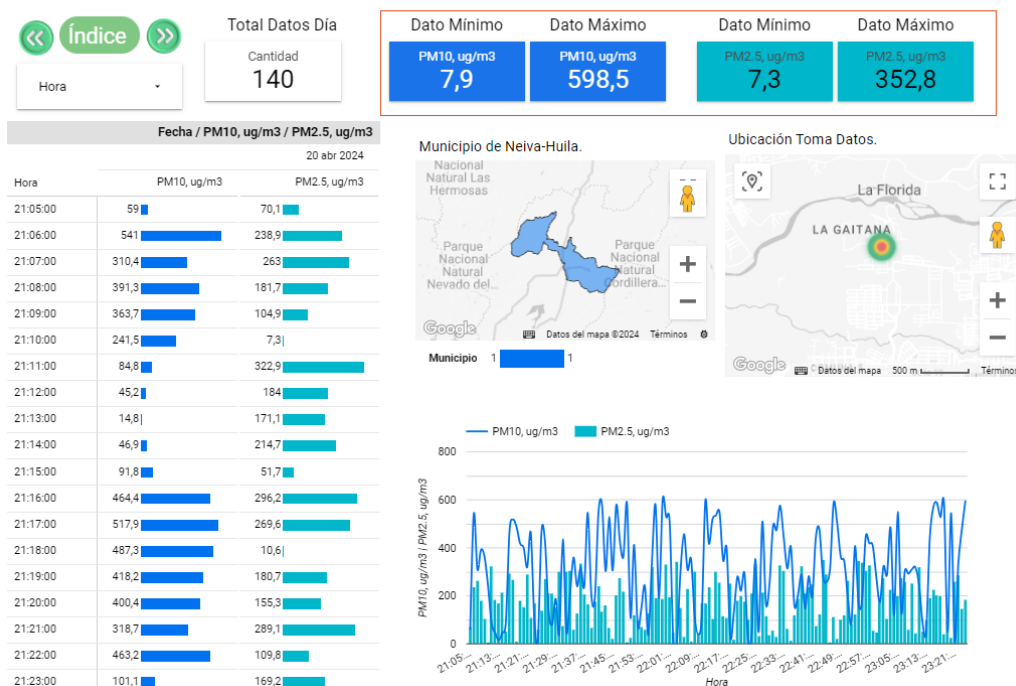
6.1.2 Análisis y visualización de los datos fase experimental I

Con base en los datos registrados y como se observa en la figura 24, este es un ejemplo de los resultados de la concentración de material particulado a 10 micras PM10 y PM 2.5 registradas el 20 de abril de 2024. El PM10 alcanzó un registro máximo de 598.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que la concentración máxima diaria de PM2.5 fue de 352.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Estos en un periodo de menos de 1 hora. Dichos valores evidencian que las actividades de instalación, extensión, humectación y compactación de la subbase granular, generan emisiones considerables de polvo debido al uso de volquetas y maquinaria pesada, lo que podría representar riesgos para la salud de los operarios de la maquinaria y personal que participa directamente en dichas labores en la obra, siempre y cuando se sometan a estas condiciones por largos periodos de tiempo.

En este sentido, debido a la variación en los periodos de tiempo utilizados para la recolección de datos según la Resolución 2254 de 2017, no es posible afirmar con certeza si las concentraciones medidas superan o no los niveles recomendados como perjudiciales para la salud, teniendo en cuenta el promedio de los registros para PM10 con un valor de 309.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 170.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM2.5.

Figura 24. Ejemplo resultado toma de datos día 20 abril de 2024 para PM 2.5 y PM 10.

Datos día 20 de abril de 2024



En la figura 25, se observan los registros de concentración máxima diaria de material particulado a 10 micras (PM10) y 2.5 micras (PM2.5) registrados durante el periodo comprendido entre el 08 y 26 de abril de 2024, donde el valor máximo registrado de PM 10 fue 603.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; mientras que la concentración máxima diaria de Material Particulado a 2.5 micras (PM2.5) fue de 353.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, ambos correspondientes al día 10 de abril de 2024, estos en un periodo de menos de 1 hora. Estos valores extremadamente elevados confirman la prioridad de monitorear las actividades relacionadas con la instalación de la subbase granular, donde se observaron concentraciones significativas de partículas en suspensión (polvo). Esto representa un claro indicio del riesgo ambiental y de salud para todos los involucrados en el proyecto

Es importante destacar que las variaciones observadas en los registros diarios se encuentran particularmente afectados, en primera instancia, por las condiciones ambientales como el clima, temperatura, velocidad del viento y la humedad. Estos factores naturales juegan un papel crucial en la dispersión y concentración del material particulado en la atmósfera. Por ejemplo, la velocidad del viento puede facilitar la dispersión de las partículas, mientras que la humedad relativa puede contribuir a su aglomeración y posterior sedimentación, reduciendo su presencia en el aire.

En segunda instancia, los factores operativos relacionados con la actividad de instalación de la subbase granular también tienen un impacto considerable en los niveles de material particulado registrados, En particular, el volumen de material granular transportado e instalado, la cantidad de volquetas y maquinaria pesada utilizada en la obra, así como la humedad presente en el material, son determinantes clave que influyen en las concentraciones de PM10 y PM2.5.

El valor máximo registrado fue el 10 de abril de 2024 y puede atribuirse a una combinación de estos factores, donde un aumento en la actividad de transporte y manipulación de materiales, sumado a condiciones ambientales desfavorables, resultó en picos de concentración de material particulado. Este análisis subraya la necesidad de un control riguroso tanto de las condiciones operativas como de los factores ambientales para mitigar el impacto en la calidad del aire durante las actividades de construcción.

Por otra parte, y considerando las condiciones de los registros establecidos para la fase experimental I, se obtuvieron un total de 770 datos recolectados durante 14 días de muestreo mediante el sensor acoplado al dron. Durante este período, se observaron variaciones significativas en las mediciones, influenciadas por las actividades realizadas una vez iniciado el muestreo.

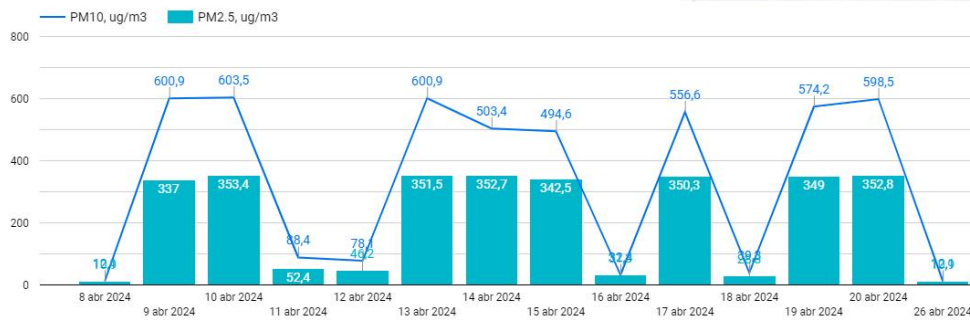
El análisis de los datos muestra que el promedio de las concentraciones de PM10 durante el período de estudio fue de 309.93 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con una desviación estándar de $\pm 178.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que indica una notable variabilidad en las concentraciones diarias. Para PM2.5, el promedio registrado fue de 170.78 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, con una desviación estándar de $\pm 99.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$, reflejando también una considerable fluctuación en los niveles de este material particulado más fino. Estos resultados sugieren que, además de los picos extremos, como el registrado el 10 de abril, existe una tendencia generalizada a la presencia de altos niveles de material particulado en el ambiente durante la ejecución de estas actividades. Esto subraya la necesidad de implementar medidas de control más estrictas, tanto en la gestión de los factores operativos como en la mitigación de las condiciones ambientales adversas, para reducir el impacto sobre la calidad del aire y la salud de los trabajadores.

Figura 25. Resultados toma de datos máximos acumulados por día en el de abril de 2024 para PM 2.5 y PM 10.

Datos Consolidados en la Toma de Datos Para la Calidad del Aire



Registro Fotográfico Fuentes Los Autores



Fuente: Los autores https://lookerstudio.google.com/reporting/1946b7bd-6d34-4766-8a02-0748a9ace896/page/p_etg0qcnjhd

6.1.3 Análisis y visualización de los datos fase experimental II

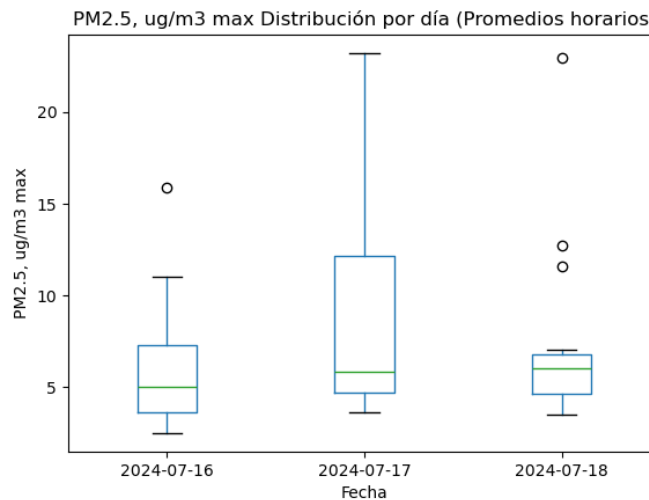
De igual forma, al analizar las tendencias en los datos obtenidos de PM10 y PM2.5 en las actividades de instalación de pavimentación en MR-42 para la construcción de la vía de acceso en la obra del patio taller asociada a la fase experimental II, se observaron variaciones en las mediciones por promedios horarios a lo largo del periodo de estudio comprendido entre el 16 al 18 de julio de 2024.

Como se muestra en la figura 26, que compara la distribución de las concentraciones máximas, se registraron los valores diarios que se extienden desde la caja hasta los valores máximo y mínimo que no son considerados atípicos de material particulado de 2.5 micras (PM2.5).

Para el día 16 de julio de 2024, se registró un valor máximo de 15.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un mínimo de 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un periodo de 24 horas, El 17 de julio de 2024, los valores máximos y mínimos fueron de 23.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 3.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, y finalmente, el 18 de julio de 2024, se observó un valor máximo de 23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un mínimo de 3.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

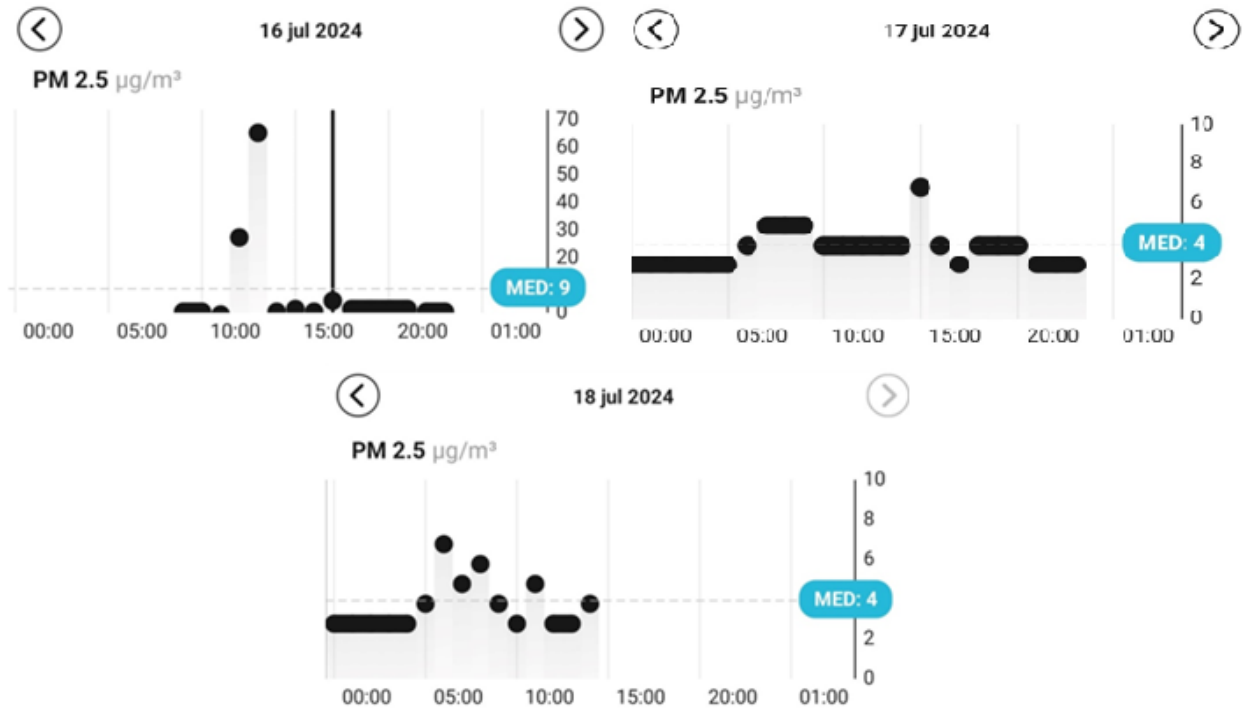
Estos resultados reflejan una tendencia de variabilidad en las concentraciones de PM2.5 durante las actividades de pavimentación, lo que indican un posible estado aceptable de calidad del aire, lo cual supone efecto posibles síntomas respiratorios en grupos poblacionales sensibles. La comprensión de estas variaciones es crucial para la evaluación de los impactos ambientales y la implementación de medidas de mitigación adecuadas durante la ejecución de este tipo de obras.

Figura 26. Resultados de mediciones de PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Máxima distribución por día.



Los resultados obtenidos para las concentraciones de material particulado PM2.5 observado en la figura 27, para los tres días de toma de muestras, se evidencia que para el día 16 de julio se presenta el valor máximo con un dato registrado de 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo este a causa de la disposición del concreto MR-42 por parte de la maquinaria especializada para ello.

Figura 27. Resultados de mediciones de PM 2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por día.



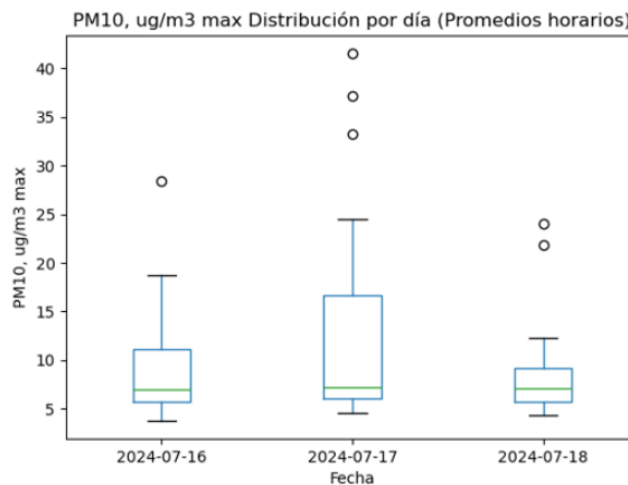
Fuente: Los autores - Aplicación Atmotube PRO

En la figura 28, se establece la comparación a través del análisis estadístico de los datos, de la distribución de las concentraciones mínimas, registrada para los valores diarios que se extienden desde la caja hasta los valores máximo y mínimo que no son considerados atípicos de material particulado de 10 micras (PM10).

De esto, se observa que para el día 16 de julio de 2024, se registró un valor máximo 28.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un mínimo de 3.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un periodo de 24 horas, El 17 de julio de 2024, los valores máximos y mínimos fueron de 41.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 5.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, y finalmente, el 18 de julio de 2024, se observó un valor máximo de 24.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un mínimo de 4.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

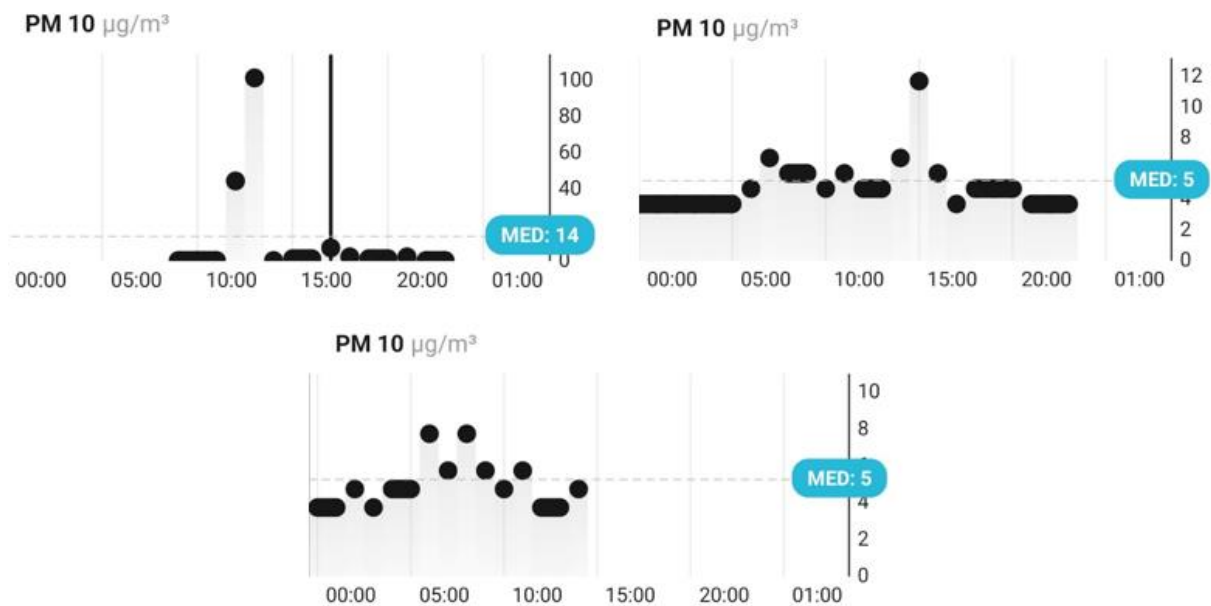
En el análisis realizado para los días de muestras analizado en la figura 29, se registraron los valores diarios de material particulado de 10 micras (PM10), donde para el día 16 de julio de 2024, se registró un valor máximo de 3.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un mínimo de 2.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en un periodo de 24 horas, El 17 de julio de 2024, los valores máximos y mínimos fueron de 5.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 3.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, y finalmente, el 18 de julio de 2024, se observó un valor máximo de 4.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y un mínimo de 2.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 28. Resultados de mediciones de PM 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Máxima distribución por día.



Fuente: Los autores - Aplicación Atmotube PRO-Python

Figura 29. Resultados de mediciones de PM 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ por día.



Fuente: Los autores - Aplicación Atmotube PRO

CONCLUSIONES

Como resultado de este trabajo demostrativo, se logró implementar un protocolo que permite la medición de las concentraciones contaminantes de Material Particulado menor a 10 micras (PM10) y de Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5) utilizando un sensor comercial adaptado a un vehículo aéreo no tripulado tipo dron y estación fija. Esta implementación aporta valiosos datos para futuras investigaciones y desarrollos en el campo del control ambiental y la salud pública en la Ciudad de Neiva.

De acuerdo con los datos registrados en la fase experimental I, se encontró que la mayor cantidad y exposición de PM10 y PM2.5 ocurrió el día 10 de abril de 2024, con valores de 603.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 353.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Aunque estos valores son elevados, no se pueden comparar directamente con los límites máximos de exposición en un periodo de 24 horas establecidos en la Resolución 2254 de 2017. Sin embargo, debido al valor elevado si sucinta un factor de riesgo a exposición por un valor exagerado de material particular, indicando que durante el desarrollo de la actividad en obra y en las condiciones del estudio, se genera un aporte considerable de PM10, que podría ser perjudicial para la salud. Finalmente, aunque se identificaron niveles elevados de PM10, este estudio ofrece a las partes interesadas una oportunidad para mejorar las prácticas laborales y las tecnologías empleadas, con el propósito de implementar estrategias para reducir estos niveles y proteger la salud de los trabajadores.

En la fase experimental II, los datos indicaron que el día 16 de julio de 2024 se registraron las concentraciones más altas de PM2.5 y PM10, con valores de 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 110 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente, durante un periodo de 24 horas. Aunque estos valores parecen superar los límites máximos permitidos para un periodo de 24 horas según la Resolución 2254 de 2017, es importante destacar que los parámetros de monitoreo y evaluación utilizados en este estudio fueron basados en el Manual de Diseño de SVCA, lo cual difiere de la metodología establecida en la mencionada resolución. Por lo tanto, aunque se observa una calidad del aire que podría generar síntomas respiratorios en poblaciones sensibles, las conclusiones deben considerarse en el contexto del marco normativo y técnico utilizado en este estudio.

La diferencia de las concentraciones medidas durante la ejecución de la actividad de instalación de subbase granular asociada en la fase experimental I para la construcción de la vía de acceso en la obra del patio taller este y los días que no se ejecutan dichas actividades, se evidencia que las actividades con maquinarias amarillas a gasolina y/o diésel desempeñan un papel determinante en la concentración de PM10 y PM2.5 en la obra. Así, se observó que esta medición refleja una alta actividad y se sugiere que para poder compararla con la Resolución 2254 de 2017 deben realizarse mediciones permanentes durante dichos procesos constructivos.

Una baja calidad del aire representa un costo significativo en la salud de todos, más aún en la salud de los mismos operarios de estos vehículos, maquinarias y personal directo vinculado a la obra. Estos resultados generados con el monitor profesional Atmotube PRO (sensor) nos muestra un incremento en la contaminación del aire asociado al Material Particulado menor a 10 micras (PM10) y Material Particulado menor a 2.5 micras (PM2.5), en las actividades de movimiento de tierras, por lo que es importante garantizar una mayor protección al personal de toda la obra, con el fin de evitar posibles enfermedades relacionadas con incrementos diarios de la concentración de PM2.5 durante la ejecución de estas actividades.

Este trabajo de grado, basado en los resultados del monitor profesional Atmotube PRO (sensor), reconoce que su precisión puede no estar totalmente alineada con los estándares establecidos en el Artículo 5, 6 y 8 de la Resolución 2254 de 2017, dado que no existen sensores patrón disponibles para su calibración en la ciudad de Neiva. Sin embargo, a pesar de esta limitación, el informe logra su objetivo al desarrollar y probar un dispositivo de monitoreo de bajo costo y alta sensibilidad como un piloto para el seguimiento de la calidad del aire en obras similares en la región.

La socialización asertiva respecto a la toma de muestras de calidad del aire será siempre un proceso continuo que requiere planificación, comunicación clara y una actitud receptiva hacia las preocupaciones de las partes involucradas o interesadas. El objeto al final es construir confianza y garantizar la colaboración de todas las partes para el éxito de este tipo de proyectos y beneficio de la protección del medio ambiente y la salud pública.

RECOMENDACIONES

La alta demanda de transporte de carga durante la ejecución de la obra sugiere la necesidad de Modernización del Transporte de Carga. Esto implica eliminar progresivamente vehículos obsoletos en favor de tecnologías más modernas, como vehículos a gas natural comprimido (GNC) o vehículos eléctricos, que no solo reducen las emisiones contaminantes, sino que también promueven la eficiencia energética y la sostenibilidad del transporte de carga.

Es fundamental establecer mecanismos para cuantificar y monitorear de manera continua las emisiones durante la obra. Por ello, se recomienda Cuantificación y Mejora Continua de las Emisiones, renovando o sustituyendo los vehículos existentes con tecnologías más eficientes para lograr una disminución significativa y sostenida de las emisiones. Además, se insta a la implementación de prácticas de mantenimiento preventivo y programas de capacitación para operadores de maquinaria y conductores de vehículos, con el fin de optimizar el rendimiento y reducir las emisiones contaminantes.

Se invita a la administración municipal de Neiva, contratistas de obra y entidades privadas a explorar y adoptar tecnologías avanzadas de control de emisiones para vehículos a gasolina y diésel. Esto se refiere a la Implementación de Tecnologías Avanzadas de Control de Emisiones, como filtros de partículas diésel (DPF), sistemas de recirculación de gases de escape (EGR) y catalizadores de oxidación diésel (DOC), que han demostrado ser efectivos para reducir las emisiones de material particulado y otros contaminantes atmosféricos.

Para garantizar el cumplimiento normativo y la protección de la salud pública, se recomienda a la Secretaría de Medio Ambiente considerar las disposiciones de la Resolución No. 2254/17. Se sugiere continuar e implementar prácticas de bajo costo como planes piloto para la expansión del monitoreo, seguimiento y control del material particulado en áreas de especial relevancia. Esto se relaciona con el Cumplimiento Normativo y Expansión del Monitoreo, que incluye la realización de campañas de concientización pública sobre los riesgos para la salud asociados con la contaminación del aire y la promoción de comportamientos y prácticas responsables que contribuyan a reducir las emisiones contaminantes.

Para una comparación más adecuada respecto a los parámetros de la resolución 2254/17 por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, es fundamental evaluar la exposición diaria en este tipo de actividades, considerando todo el proceso constructivo. Además, es crucial analizar la influencia del viento en el sensor, dado que el viento generado por las hélices del dron puede afectar significativamente la precisión de las mediciones realizadas. Esta variación podría influir en la evaluación de la calidad del aire, lo cual es relevante para la toma de decisiones orientadas a la protección del medio ambiente y la salud pública.

Por último, se propone el desarrollo de estrategias operativas que incluyan la implementación de medidas de control, como sistemas de riego y barreras contra el polvo, así como ajustes en los procesos de construcción para minimizar las emisiones. Estas estrategias deben tener en cuenta factores como las condiciones meteorológicas y los horarios de trabajo para maximizar su eficacia en la reducción de la contaminación atmosférica. Esto se refiere al Desarrollo de Estrategias Operativas, que implica la colaboración entre las partes interesadas para identificar las mejores prácticas y tecnologías disponibles para mitigar las emisiones y mejorar la calidad del aire en el área de estudio.

REFERENCIAS

- [1] J. M. S. Calderón, Ó. A. N. Trujillo, G. A. R. Flórez, M. C. Santamaría, L. C. V. Echeverri, y A. G. Uribe, «CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL CONPES».
- [2] «Ficha_41000.pdf». Accedido: 18 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://terridata.blob.core.windows.net/fichas/Ficha_41000.pdf
- [3] «Ficha_41001.pdf». Accedido: 18 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://terridata.blob.core.windows.net/fichas/Ficha_41001.pdf
- [4] «Calderón et al. - CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL CO.pdf». Accedido: 27 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/conpes-3943-de-2018.pdf>
- [5] «SISAIRE - IDEAM». Accedido: 20 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/informacion.xhtml?de=contaminantes_evaluados
- [6] «SISAIRE - IDEAM». Accedido: 27 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/aprendizaje.xhtml?de=mejorar_la_calidad
- [7] «Snapshot». Accedido: 17 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [8] El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, «Resolución 2254 de 2017». [En línea]. Disponible en: https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambienteds_2254_2017.htm
- [9] «Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre». Accedido: 28 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/69478/WHO_SDE_PHE_OEH_06.02_spa.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [10] «Calidad del aire ambiente (exterior) y salud». Accedido: 17 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- [11] «SISAIRE - IDEAM». Accedido: 27 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: http://sisaire.ideam.gov.co/ideam-sisaire-web/aprendizaje.xhtml?de=como_se_contamina
- [12] «CALIDAD DEL AIRE - IDEAM». Accedido: 17 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>
- [13] «Gestión del aire - IDEAM». Accedido: 17 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.ideam.gov.co/web/siac/gestionaire>
- [14] «indice_calidad_aire12.pdf». Accedido: 17 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/pib/ambientales/Sima/indice_calidad_aire12.pdf
- [15] «Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf».
- [16] «2012 - DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO PAR.pdf». Accedido: 17 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/3217/321727348012.pdf>

- [17]«CA -034_Informe calidad aire.pdf». Accedido: 23 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.enel.com.co/content/dam/enel-co/esp/C3%B1ol/subestaciones-subestaci%C3%B3n-terminal/CA%20-034_Informe%20calidad%20aire.pdf
- [18]Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente -2014, «Informe sobre el primer período de sesiones de la Asamblea de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente». [En línea]. Disponible en: file:///C:/Users/julian%20trujillo/Downloads/A_69_25-ES.pdf
- [19]«Aerosoles formados por nanomateriales. Monitorización y evaluación de la exposición en entornos laborales». Accedido: 17 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/30658/files/TESIS-2015-019.pdf>
- [20]S. de M. A. y R. Naturales, «Partículas suspendidas PM10 y PM2.5 dañan salud y medio ambiente», gob.mx. Accedido: 28 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/particulas-suspendidas-pm10-y-pm2-5-danan-salud-y-medio-ambiente>
- [21]Verónica Guerrero Mothelet, «Construcción de contaminantes», [En línea]. Disponible en: <https://blogs.ciencia.unam.mx/paradigmaxxi/2016/04/11/construccion-de-contaminantes/>
- [22]«Drones EVO Nano+ | Buy in Autel Robotics Official Store», Autel Robotics. Accedido: 28 de mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://shop.autelrobotics.com/products/drones-evo-nano-plus>
- [23]«Amazon.com: Atmotube Monitor profesional profesional de calidad del aire para exteriores e interiores con batería [PM, COV, probador de temperatura, humedad y presión barométrica], medidor de contaminación : Industrial y Científico». Accedido: 20 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.amazon.com/-/es/profesional-exteriores-temperatura-barom%C3%A9trica-contaminaci%C3%B3n/dp/B07WD5GGZK/ref=sr_1_14?__mk_es_US=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=2FQP33JGWIS1B&dib=eyJ2IjojMSJ9.FrOFjuEmudSvKfqWFhCqzkPMZAAAsGJsArGQTI_M_xKgMohcL3ti-t0akZN_z8zkjX3rwe4-cwhh6aaqJFIVij4C-sgRAZgNujs_AhbsLoXOAtTaOyM6uo5lc8nr7NURAVn6quh0TMvK4-JX_SCECcIMnyceXU_qDD3loHC7QroADn5iMJNE9NpIA4WOQadeJpWvdPdLxKcEjF54J_vIfM8-CkW7qZkie7FDSG1J4OPM.gs2qp_xdI21Y9UP_INH-xKqpy1Y7D-_1_IF9h4oNAZo&dib_tag=se&keywords=MONITOR+PM10+EXTERIOR&qid=1708725919&sprefix=monitor+pm10+exterior%2Caps%2C151&sr=8-14
- [24]«Atmotube 1.0/2.0». Accedido: 20 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://apps.apple.com/us/app/atmotube-1-0-2-0/id1080310110>
- [25]«En Neiva se podrá conocer mensualmente el nivel de calidad de aire que se respira». Accedido: 22 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.alcaldianeiva.gov.co/NuestraAlcaldia/SalaDePrensa/Paginas/En-Neiva-se-podr%C3%A1-conocer-mensualmente-el-nivel-de-calidad-de-aire-que-se-respira.aspx>

ANEXOS

ANEXO 1. Registro fotográfico toma de datos

Figura 30. Proyecto objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 31. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 32. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 33. Actividades de uso del Dron con sensor adaptado para la medición de calidad del aire en zona de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 34. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 35. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 36. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 37. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 38. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 39. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 40. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 41. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 42. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 43. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 44. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 45. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 46. Toma de datos en actividades de movimientos de tierras objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 47. Toma de datos en actividades de pavimento MR-42 objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 48. Toma de datos en actividades de pavimento MR-42 objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 49. Toma de datos en actividades de pavimento MR-42 objeto de estudio.



Fuente: Los autores

Figura 50. Toma de datos en actividades de pavimento MR-42 objeto de estudio.



Fuente: Los autores