

DISEÑO DE SENSORES DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO DE PARÁMETROS
ASOCIADOS A LA CALIDAD DEL AIRE EN VILLAVICENCIO.



JOHAN MAURICIO LEÓN SALAMANCA



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
VILLAVICENCIO

2023

DISEÑO DE SENSORES DE BAJO COSTO PARA EL MONITOREO DE PÁRAMETROS
ASOCIADOS A LA CALIDAD DEL AIRE EN VILLAVICENCIO.

JOHAN MAURICIO LEÓN SALAMANCA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de ingeniero ambiental

Director

MSc. DIEGO ANDREY CORTÉS NARANJO

Magister en Gestión Sostenible y Tecnologías del Agua

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

VILLAVICENCIO

2023

Autoridades Académicas

P. ÁLVARO JOSÉ ARANGO RESTREPO, O. P.

Rector General

P. MAURICIO ANTONIO CORTÉS GALLEGO, O. P.

Vicerrector Académico General

P. JOSÉ ANTONIO BALAGUERA CEPEDA, O. P.

Rector Sede Villavicencio

P. RODRIGO GARCIA JARA, O. P.

Vicerrector Académico Sede Villavicencio

MSc. JULIETH ANDREA SIERRA TOBÓN

Secretaria de División Sede Villavicencio

MSc. WILLIAM PEÑARANDA ZÁRATE

Decano de la Facultad de Ingeniería Ambiental

Dedicatoria

A mi madre, María Julia Salamanca Castro, una mujer de carácter fuerte, que desde muy pequeño me enseñó lo que estaba bien y mal, una mujer entregada a su familia y a su hogar, la mujer que interrumpía sus horas de sueño para levantarme y ayudarme a ir a la escuela desde pequeño, la que siempre creyó en mí y me decía que yo era capaz de lograr todo aquello que me propusiera. Mi más grande pilar y apoyo en la vida; quien, a pesar de no haber terminado su secundaria, siempre me recalcó lo importante que era el estudio en la vida, con su mítica frase de: *“El estudio es lo más importante que heredan, el día que nosotros faltemos”*, a ti mi amada madre, gracias por todo durante este largo proceso.

A mi padre, Cristóbal León Parrado, un orgulloso conductor de camión que ha trabajado duro toda su vida por su familia, quien me ha enseñado la humildad, el esfuerzo y el valor del trabajo duro, aquel que, sin haber terminado su primaria, desde pequeño me enseñó el gusto por los números y es mi ejemplo a seguir como persona, el encargado de que jamásuviésemos necesidades en nuestro hogar, a ti amado padre, infinitas gracias por todo lo que has hecho por mí durante esta etapa de mi vida.

A mis mascotas, Cloeh, París, Lucas y Frida; ellos quienes siempre me han brindado amor incondicional, que durante muchas noches no durmieron por acompañarme en la realización de mis trabajos a lo largo de la carrera, quienes siempre me recibían alegres tras llegar a casa luego de una jornada de estudios.

A mis hermanos, por hacerme creer en mis capacidades y siempre decir que soy una persona inteligente que logrará grandes cosas durante su vida.

Agradecimientos

A mi director Diego Andrey Cortés Naranjo, que más allá de ser un gran maestro y guía durante el desarrollo de esta investigación, es un gran amigo, aquel que no dudó en ayudarme y siempre estar dispuesto a resolver mis dudas, alguien que durante mi proceso de formación me recalcó que yo era una persona muy capaz y me otorgó el apodo de “*prodigio*”, una persona que al igual que yo, es un apasionado de las nuevas tecnologías y siempre está pensando en cómo utilizarlas dentro del ámbito ambiental, infinitas gracias querido amigo. A la Universidad Santo Tomás, por todos aquellos docentes que influyeron en mi paso por la carrera, por la ayuda prestada en el desarrollo de esta investigación y por haberme brindado la oportunidad de ser parte de un proyecto en Estados Unidos, también, por haberme formado íntegramente bajo un pensamiento crítico y ético. Y en último lugar, pero no por esto menos importante, a todos los compañeros y amigos que conocí durante mi pregrado, aquellos que hicieron que la carga académica fuese más amena y los días de clase mucho más alegres.

Contenido

	Pág.
Resumen.....	12
Abstract.....	13
1.Introducción.....	14
2.Objetivos.....	18
2.1. Objetivo general.....	18
2.2. Objetivos específicos.....	18
3.Antecedentes.....	19
4.Marco de referencia.....	23
4.1. Marco teórico.....	23
4.1.1. Contaminación del aire.....	23
4.1.2. Monitoreo y sensores de calidad del aire.....	24
4.1.3. Análisis estadístico de los monitoreos de la calidad del aire.....	25
4.2. Marco conceptual.....	26
4.3. Marco legal.....	27
5.Metodología.....	30
5.1. Fase 1: Diseño, montaje y programación de los sensores de bajo costo empleando ARDUINO.....	32
5.1.1. Actividad 1: Recopilar información sobre la construcción y el funcionamiento de los sensores.....	33
5.1.1.1. Sensores contaminantes criterio.....	33
5.1.1.2. Sensores variables meteorológicas.....	33
5.1.1.3. Componentes importantes para el funcionamiento de los sensores.....	34
5.1.2. Actividad 2: Realizar el código de programación para el funcionamiento específico de cada sensor.....	34
5.1.3. Actividad 3: Validar y compilar el código de programación para cada sensor.....	35
5.2. Fase 2: Toma de información primaria mediante el uso de los sensores de bajo costo en la zona de Catumare, donde existen múltiples fuentes de contaminantes.....	36
5.2.1. Actividad 1: Ubicación de los sensores en la sede Loma linda de la Universidad Santo Tomás.....	38
5.2.2. Actividad 2: Puesta en marcha de la toma de datos por parte de los sensores.....	39

5.2.3.	Actividad 3: Obtención y almacenamiento de datos para su posterior análisis.....	39
5.3.	Fase 3: Análisis estadístico descriptivo en torno a la correlación de los datos obtenidos por los sensores de bajo costo en comparación con otras estaciones de monitoreo de calidad del aire.....	40
5.3.1.	Actividad 1: Organizar y ordenar todos los datos obtenidos durante el muestreo.	40
5.3.2.	Actividad 2: Realizar la correlación entre las múltiples variables y la estadística descriptiva para cada grupo de datos.....	41
5.3.3.	Actividad 3: Obtención de datos por parte de otras estaciones de monitoreo de la calidad del aire.	41
5.3.4.	Actividad 4: Análisis estadístico de los datos obtenidos por los sensores de bajo costo y otras estaciones de monitoreo de la calidad del aire.	42
6.	Resultados y análisis.....	43
6.1.	Fase 1: Análisis estadístico simple de las variables durante 27 días de monitoreo. .	43
6.1.1.	Comparación de las concentraciones obtenidas con la norma colombiana.	44
6.1.2.	Análisis estadístico descriptivo de las múltiples variables obtenidas por los sensores de bajo costo.	45
6.1.3.	Análisis coeficientes de correlación entre las muestras obtenidas por los sensores de bajo costo.....	46
6.1.4.	Gráficas de los valores obtenidos por los sensores experimentales vs los sensores y datos de referencia.....	48
6.2.	Fase 2: Tipo de pruebas estadísticas según la normalidad del conjunto de datos a estudiar.	52
6.2.1.	Pruebas estadísticas por el método U de Mann-Whitney.	53
6.2.2.	Pruebas estadísticas por el método T de Student para grupos independientes.	54
6.2.3.	Análisis de los resultados de las pruebas estadísticas realizadas a todos los parámetros.	55
6.3.	Fase 3: Determinación de los R^2 entre los datos obtenidos por los sensores de bajo costo en comparación con otros sensores para el monitoreo de calidad del aire.	55
6.3.1.	Regresiones lineales para los datos de contaminantes atmosféricos.	55
6.3.2.	Regresiones lineales para los datos meteorológicos.....	59
6.3.3.	Corrección de humedad en los sensores experimentales.....	61
6.3.4.	Consideraciones finales respecto al análisis de los datos de la investigación.	62
7.	Impacto social y humanístico del proyecto.....	64
8.	Discusión de resultados.	65

Conclusiones.....	67
Recomendaciones.	69
Referencias.....	70
Anexos.	74

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Marco legal</i>	27
Tabla 2. <i>Mapeado de conexiones de los sensores</i>	32
Tabla 3. <i>Cantidad de datos perdidos por cada sensor.</i>	43
Tabla 4. <i>Promedios diarios de concentraciones de contaminantes criterio</i>	44
Tabla 5. <i>Estadística descriptiva de la s variables obtenidas por los sensores semiautomáticos</i>	45
Tabla 6. <i>Estadística descriptiva de las variables obtenidas por el sensor automático sin corrección de humedad</i>	45
Tabla 7. <i>Estadística descriptiva de las variables obtenidas por el sensor automático con corrección de humedad</i>	46
Tabla 8. <i>Coeficiente de correlación d e los datos obtenidos por los sensores semiautomáticos</i>	47
Tabla 9. <i>Coeficiente de correlación de los datos obtenidos por el sensor automático sin corrección de humedad</i>	47
Tabla 10. <i>Coeficiente de correlación de los datos obtenidos por el sensor automático con corrección de humedad</i>	47
Tabla 11. <i>Pruebas de normalidad a todos los conjuntos de datos de la investigación.</i>	52
Tabla 12. <i>Pruebas de Mann-Whitney para todos los conjuntos de datos con una distribución no normal.</i>	53
Tabla 13. <i>Pruebas T de Student para grupos independientes para todos los conjuntos de datos con una distribución normal</i>	54
Tabla 14. <i>Diferencia de concentración entre sensor de $PM_{2.5}$ sin corrección de humedad y el sensor de $PM_{2.5}$ con corrección de humedad</i>	61

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología utilizada para esta investigación.	31
Figura 2. Ejemplo de código de programación en ARDUINO para uno de los sensores.	35
Figura 3. Ejemplo de validación y compilación del código de programación en ARDUINO.	35
Figura 4. Mapa de la zona de estudio.	37
Figura 5. Sensores de calidad del aire de bajo costo ubicados en la zona de monitoreo.	38
Figura 6. Sensor de bajo costo realizando monitoreo.	39
Figura 7. Ejemplo de tabulación de los datos obtenidos por los muestreos semiautomáticos y automáticos de los sensores de bajo costo.	41
Figura 8. Vista de la base de datos AQI para la obtención de información secundaria.	42
Figura 9. Comparación de los datos obtenidos por el sensor semiautomático de ozono vs los datos de referencia obtenidos del sensor de ozono PLUME LABS.	48
Figura 10. Distribución temporal del promedio diario del PM _{2.5} entre todos los sensores y los datos de referencia.	49
Figura 11. Distribución temporal del promedio diario de la humedad relativa entre de todos los sensores y los datos de referencia.	50
Figura 12. Distribución temporal del promedio diario de la temperatura entre todos los sensores y los datos de referencia.	51
Figura 13. Regresión lineal entre el sensor de ozono experimental vs el sensor de ozono de PLUME LABS.	56
Figura 14. Regresión lineal entre el sensor de PM _{2.5} experimental sin corrección de humedad vs todos los sensores de referencia.	56
Figura 15. Regresión lineal entre el sensor de PM _{2.5} experimental con corrección de humedad vs todos los sensores de referencia.	57
Figura 16. Regresión lineal entre el sensor de PM _{2.5} experimental sin corrección de humedad vs el sensor de PM _{2.5} experimental con corrección de humedad.	58
Figura 17. Regresión lineal entre el sensor de temperatura experimental vs todos los datos de temperatura de referencia.	59
Figura 18. Regresión lineal entre el sensor de humedad relativa experimental vs todos los datos de humedad relativa de referencia.	60
Figura 19. Localización de los sensores bajo techo.	63

Lista de Anexos

Pág.

Anexo 1. Mapeado de conexiones para los sensores.....	74
Anexo 1.1. Mapeado de conexiones para el anemómetro.	74
Anexo 1.2. Mapeado de conexiones para el sensor de ozono	74
Anexo 1.3. Mapeado de conexiones para el sensor de temperatura y humedad relativa.	75
Anexo 1.4. Mapeado de conexiones para la brújula.....	75
Anexo 1.5. Mapeado de conexiones para el sensor de PM _{2.5}	76
Anexo 1.6. Conexiones del SPS30 a la placa WEMOS D1	77
Anexo 2. Fichas técnicas de los sensores y componentes.	77
Anexo 3. Códigos de programación.	77
Anexo 3.1. Código de programación del anemómetro.	77
Anexo 3.2. Código de programación del sensor de ozono.	78
Anexo 3.3. Código de programación veleta.	79
Anexo 3.4. Código de programación sensor temperatura y humedad relativa.	81
Anexo 3.5. Código de programación sensor material particulado con corrección de humedad.....	82
Anexo 3.6. Código de programación sensor material particulado sin corrección de humedad.....	84
Anexo 4. Excel con todos los datos obtenidos para la investigación.	86
Anexo 5. Fotos tomadas durante el desarrollo de la investigación.....	87

Resumen

El presente proyecto de investigación tiene como objetivo el generar nuevas herramientas para el monitoreo de la calidad del aire, esto con el fin de promover la investigación en torno a la afectación de la salud por parte de los contaminantes atmosféricos en la población de Villavicencio, como a su vez, promover la implementación de estrategias para mitigar dichas problemáticas. Por otra parte, se busca evaluar la efectividad de los sistemas de monitoreo de bajo costo, todo esto mediante un análisis estadístico descriptivo entre estaciones de monitoreo de la calidad del aire de la ciudad con estos nuevos dispositivos de bajo costo.

Para lograr este objetivo se propuso primero, la construcción de los dispositivos de bajo costo implementando algoritmos de programación que permitan la generación de modelos de acceso libre, que a su vez como su nombre lo dicta, son elementos y componentes de bajo costo (en comparación con los utilizados en los sistemas validados), seguido de una metodología para la recopilación de datos en un punto estratégico para el monitoreo de la calidad del aire de la ciudad, esto bajo los niveles máximos permisibles fijados en la resolución 2254 de 2017 y posteriormente se realizaron análisis estadísticos de la correlación entre los datos obtenidos por las estaciones de monitoreo en la ciudad y los arrojados por los sistemas de bajo costo contruidos en este proyecto de investigación.

Estos análisis estadísticos en el período de agosto a septiembre de 2023 lograron determinar tras realizar regresiones lineales simples y múltiples valores de coeficientes de determinación (R^2) desde el más bajo con un 0.8415 para una comparación entre dos sensores de humedad relativa y un $R^2=0.974$ para sensores de $PM_{2.5}$; además, también se encontró una correlación inversa entre la temperatura y la humedad relativa que iban desde -0.95 hasta -0.98, indicando que al aumentar alguna de las dos variables, significaría la disminución de la otra en una medida casi inversamente proporcional.

Para finalizar, en la correlación de los datos monitoreados se encontró un ligero margen de incidencia entre el $PM_{2.5}$ y el % de humedad relativa, el cual ya era un comportamiento esperado según la información obtenida de la bibliografía empleada en el desarrollo de este proyecto.

Palabras clave: Programación, análisis estadístico, sensor de bajo costo, monitoreo remoto, calidad del aire, salud ambiental, electrónica.

Abstract

The present research project aims to generate new tools for monitoring air quality to promote research on the impact of atmospheric pollutants on the health of the Villavicencio population. Additionally, it aims to promote implementing strategies to mitigate these issues. Furthermore, it seeks to evaluate the effectiveness of low-cost monitoring systems through descriptive statistical analysis comparing air quality monitoring stations in the city with these new low-cost devices.

In order to reach our goal, the project initially recommended constructing low-cost devices by implementing programming algorithms enabling the creation of open-access models. These devices prove cost-effective when compared to those employed in validated systems. Following that, the project devised a methodology for gathering data at a strategically selected location for monitoring air quality within the city while adhering to the maximum permissible levels established in Resolution 2254 of 2017. Afterward, the project conducted statistical analyses to establish the correlation between data from the city's monitoring stations and the data produced by the low-cost systems developed in this research endeavor.

These statistical analyses, conducted from August to September 2023, revealed the coefficient of determination (R^2) values through simple and multiple linear regressions. The lowest R^2 value was 0.8415, observed in a comparison between two relative humidity sensors, while the highest R^2 value was 0.974, observed for $PM_{2.5}$ sensors. Additionally, an inverse correlation was found between temperature and relative humidity, ranging from -0.95 to -0.98, indicating that an increase in one of these variables led to a nearly inversely proportional decrease in the other.

In conclusion, we observed a slight correlation between $PM_{2.5}$ and the percentage of relative humidity in the monitored data. This observation aligns with the information we gathered from the literature to develop this project.

Keywords: Programming, statistical analysis, low-cost sensor, remote monitoring, air quality, environmental health, electronics.

1. Introducción

La calidad del aire es un factor relevante en el desarrollo de una ciudad, debido a que esta puede influir directamente en la calidad de vida de la sociedad, pudiendo causar múltiples afectaciones a la salud, un deterioro ambiental y además generando problemas de índole económico y social al momento de tratar enfermedades asociadas a la contaminación del aire, según la Organización Mundial de la Salud (OMS), para el año 2019 se reportó que la contaminación del aire fue responsable directa de 6.7 millones de muertes prematuras al año a nivel global y que también es una de las principales causas de la mortalidad y morbilidad humana (OMS, 2022).

Adicionalmente, dentro del plan decenal de salud pública 2022-2031, la cual es una política que establece los objetivos, las metas y las estrategias en torno a los posibles desafíos en materia de salud pública en Colombia durante los siguientes 10 años, con el fin de garantizar el derecho a la salud, el bienestar integral y la calidad de vida de las personas, esto brinda un respaldo para el desarrollo de la investigación, ya que el objetivo de esta política es dar respuestas efectivas a las necesidades que posea la población y el alcanzar los resultados en salud anhelados, los cuales como se mencionó anteriormente, según la OMS la calidad del aire es uno de los factores de mayor influencia respecto a la salud humana (OMS, 2022).

Debido a la evolución en la industria como a las actividades antrópicas en la actualidad, se ha observado una relación directa entre estas actividades con la contaminación del aire, el cual es un indicador que sirve como un mecanismo de probabilidad directa en las posibles afectaciones a la salud poblacional, además claro está, también como un indicador de salud ambiental, que a su vez tiene como función el prevenir las posibles afectaciones derivadas de ambientes contaminados; como pueden ser las enfermedades respiratorias, el cáncer de pulmón y problemas cardíacos y del sistema nervioso (Kortoçi et al., 2022).

De esta manera para el monitoreo y control de ciertos ambientes se utilizan los sistemas de vigilancia de la calidad del aire en Colombia, mejor conocidos como los “SVCA” que dependiendo del tipo y características de una ciudad o municipio se realiza un montaje específico (consignado en el manual de diseño de sistemas de vigilancia de la calidad del aire) para dicho monitoreo; el cual deberá ser cargado a “SISAIRE” (sistema de información sobre la calidad del aire) donde se realizan actualizaciones periódicas de los datos recopilados por las estaciones, el problema yace en que al consultar dichos datos generalmente hay escasez o vacíos en la información obtenida en los países de Latinoamérica en general (Coker et al.,

2022), esto debido a problemas técnicos del sistema que pueden ir desde el mantenimiento de los mismos que al ser tan costosos suelen tener ciertas demoras en dichos procesos o inclusive al daño de algunos componentes dejando fuera de servicio por meses a estas estaciones.

Así surge la necesidad de optimizar estos sistemas con fines de realizar monitoreos constantes y tener disponibilidad de datos fiables para el uso investigativo en torno a las afectaciones epidemiológicas, como también el control y mitigación de los posibles impactos (Coker et al., 2022), naciendo de esta necesidad los sensores de bajo costo (*LCS*, por sus siglas en inglés) los cuales buscan suplir dicha falencia con un costo bastante inferior de las estaciones tradicionales como al igual tamaños mucho más reducidos e incluso portables (Kortoçi et al., 2022), brindando así una mayor versatilidad.

Por otro lado, el principal inconveniente de los sensores de bajo costo es la precisión y fiabilidad de sus datos, ya que, al ser dispositivos mucho más económicos, la calidad de sus componentes suele ser reducidas en comparación con las estaciones de los SVCA, debido a que los sensores de bajo costo no cumplen con el estándar de la EPA (Environmental Protection Agency) para la medición de contaminantes en el aire. Generando así que sus mediciones no sean tan exactas a la realidad lo cual genera una incertidumbre al momento de realizar muestreos con estos dispositivos, desencadenando en problemas a la hora de realizar investigaciones del aire (He et al., 2022; Zheng et al., 2022; Chojer et al., 2022; Coker et al., 2022; Dubey et al., 2022; Tryner et al., 2022).

Pese a este problema han surgido múltiples herramientas y soluciones para llegar a aumentar la precisión y fiabilidad de los *LCS*, algunos mediante correlación y calibración (Coker et al., 2022) y otros mediante modelos de reconstrucción (Ferrer et al., 2022) dando como resultados en la mayoría de los casos valores de $R^2 > 0.9$ (He et al., 2022; Zheng et al., 2022; Chojer et al., 2022; Dubey et al., 2022); lo que brindaría una descripción bastante acertada a la realidad y que además reforzaría la viabilidad del uso de estos sensores para una red de monitoreo de la calidad del aire paralela a los SVCA con el fin de obtener datos más precisos y un sistema más robusto.

Otro factor a tener en cuenta de la precisión de los datos obtenidos, es que hay ciertas variables meteorológicas las cuales pueden afectar la medición de ciertos contaminantes, para este caso específico se trata de la incidencia de la humedad relativa en las mediciones erróneas del material particulado, generando que al haber niveles de humedad relativa por encima del 70% genere mediciones de PM más elevados que los valores reales (Rojano et al., 2012).

Por lo que esta investigación se centra en algunas áreas específicas como la precisión tras la medición de los datos, la viabilidad del montaje de un sensor con componentes de bajo costo y también la versatilidad y utilidad de los mismos en el contexto de Colombia, basándose en los requisitos normativos en materia de la calidad del aire con un enfoque en los principales contaminantes regidos por ley en la resolución 2254 del 2017, siendo estos los siguientes: $PM_{2.5}$, PM_{10} , monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), ozono troposférico (O_3), dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2); de los cuales para el desarrollo de esta investigación se propone el diseño de sensores para el monitoreo de: $PM_{2.5}$ y O_3 ; de igual forma también se plantea la adición de un anemómetro, termómetro, veleta y un higrómetro, ya que son variables importantes y determinantes a la hora del estudio de la calidad del aire en una zona exterior (Coker et al., 2022).

El ministerio de ambiente y desarrollo sostenible (MADS) ordena bajo la resolución 2254 de 2017 los niveles máximos permisibles de inmisión de ciertos contaminantes asociados a emisiones de cualquier tipo. Dentro de los cuales destaca el material particulado, debido a que es de los más comunes y que tiene gran repercusión en la salud de las personas, principalmente afectando los pulmones bajo irritaciones, infecciones, reducción en el transporte de oxígeno, entre otros tantos problemas (Carazo et al., 2013).

La ciudad de Villavicencio ha sido el ápice de uno de los mayores crecimientos económicos de la región de los llanos orientales, principalmente al ser ésta la capital más grande de la Orinoquía, esto ha conllevado a un incremento de la contaminación atmosférica, siendo este el tema central de esta investigación, ya que, la adquisición de datos en tiempo real es una herramienta necesaria para la implementación de medidas en pro de prevenir las afectaciones a la salud de la población en el corto plazo. Por otro lado, debido a las características geográficas de la ciudad esta cuenta con una ventaja natural en cuanto a dispersión de contaminantes se refiere, pero, precisamente ese es el mayor problema, porque se dejan de lado las estrategias para mitigar la emisión de contaminantes (Duarte, 2018). Aunado a lo anterior, el sistema de monitoreo actual de la ciudad es ineficiente, debido a que este presenta fallos y discontinuidad en sus mediciones, generando así vacíos en la información y afectando la generación de medidas en la reducción de emisiones (Duarte, 2018).

En la actualidad, en la ciudad de Villavicencio existe un sistema para el monitoreo de la calidad del aire (CA), la cuestión está en que este es ineficiente, principalmente debido a los

vacíos en la información, el no tener acceso a los datos en tiempo real y los elevados costos de uso y mantenimiento de dichos dispositivos (Duarte, 2018).

Este proyecto obtiene viabilidad de manera internacional en torno a todas las pautas globales en pro de la reducción, mitigación y control del calentamiento global, la salud ambiental y el desarrollo sostenible. Desde iniciativas como la COP (Conferencia de las Partes) se pautan lineamientos en torno a distintas sustancias o partículas las cuales están presentes en la atmósfera y que llegan a alterar o generar efectos negativos tanto al ambiente como a la vida o salud de las personas; estos son denominados contaminantes atmosféricos (Arbeláez, 2016). Lo anterior desemboca en que deban ser objeto de investigación para promover estrategias y regulaciones normativas con finalidad de mejorar las condiciones del recurso aire resultando en una mejor calidad de vida para las comunidades. Colombia, al pertenecer al grupo de países asistentes a esta iniciativa se compromete a nivel internacional en el desarrollo de investigaciones, promover estrategias y a gestionar el recurso aéreo de manera nacional en busca del cumplimiento de dichos objetivos (Duarte, 2018).

Anexado a todo lo anterior mencionado, dentro del plan de gobierno de la ciudad de Villavicencio en torno al programa de Calidad del Aire, se gestiona un subprograma el cual busca “Formular e implementar el plan ambiental local de mejoramiento de la calidad del aire” con el cual, será menester el desarrollo de nuevas tecnologías y herramientas para la cuantificación de las emisiones como para su monitoreo continuo en beneficio de implementar estrategias de control y mitigación, a la vez de reforzar las normativas para el cuidado de la CA de la ciudad. Lo previo mencionado brinda una perspectiva optimista hacia el desarrollo de este trabajo ya que, es coherente con los objetivos planteados tanto a nivel local, nacional e internacional.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- Desarrollar un sistema con el uso de sensores de bajo costo utilizando el software ARDUINO para el monitoreo de la calidad del aire en la ciudad de Villavicencio, Meta, Colombia.

2.2. Objetivos específicos

- Construir y programar un sistema de monitoreo de variables asociadas a la calidad del aire empleando sensores de bajo costo.
- Evaluar la efectividad del sistema de monitoreo bajo distintas condiciones operacionales.
- Evaluar la correlación de los datos obtenidos por las estaciones de bajo costo comparándolas con muestreos activos y pasivos de contaminantes en el aire en la ciudad de Villavicencio.

3. Antecedentes

Dentro de las investigaciones referentes en el monitoreo de la calidad del aire y el uso de sensores de bajo costo se pueden encontrar una serie de artículos los cuales son un pilar fundamental para poder desarrollar este trabajo de grado, a continuación, se contemplan de manera cronológica.

En una zona costera de Colombia para el año 2012, un estudio realizado por la Universidad de La Guajira publicado por Rojano et al. (2012) se determinó mediante un proceso de investigación la incidencia en la alteración de la medición del PM_{10} causado por los altos niveles de humedad relativa en el ambiente, en este estudio se encontró una correlación de $R^2 = 0.195-0.386$, cuando la humedad relativa era menor al 70%, pero al tener una humedad relativa por encima del 70% los valores de R^2 se aumentaron en un rango desde 0.657 hasta 0.773; determinando de esta manera que sí existe un efecto de la humedad relativa en torno a la determinación del material particulado (Rojano et al., 2012).

Ríos et al. (2021) realizaron una prueba de calibración de sensores de bajo costo para material particulado en una zona urbana del valle de Aburrá, para este estudio se pusieron a prueba un total de 7 sensores todos de la misma referencia, SPS30; esto con la intención de comparar sus datos con un sensor de referencia validado por la EPA, el cual era el sensor BAM 1020, durante casi dos meses de monitoreos se obtuvieron cerca de 470 mil datos, los cuales fueron sesgados en base a un nivel de humedad relativa que no fuese superior al 95%, ya que, dentro del rango de operación óptimo de los sensores SPS30 este es el nivel máximo de humedad relativa que debe existir (Ríos et al., 2021). Al comparar los datos obtenidos de los muestreos mediante métodos de regresión lineal simple y múltiple se encontraron valores de R^2 desde 0.62 hasta 0.67 indicando que el nivel de correlación entre dichos datos no fuese un estimativo tan representativo de las variables reales (Ríos et al., 2021).

En la investigación de Coker et al. (2022) que fue desarrollada en Brasil, se investigó el potencial del sensor PurpleAir para $PM_{2.5}$ en investigaciones de epidemiología relacionada con la CA en Rio Branco, además de realizar una corrección de los datos mediante la metodología de la EPA (*environmental protection agency*) generando una relación entre los niveles de concentración del material particulado con la cantidad de hospitalizaciones diarias por problemas respiratorios mediante el empleo de modelos GAM (*generalized additive models*) y DLNM (*distributed lag non-linear models*), además de mediante regresión lineal se evaluó la conexión entre la concentración del $PM_{2.5}$ y los incendios forestales ocurridos en el

área de estudio; dando como resultado que tras la corrección de sus datos, este sensor poseía un nivel de precisión similar al de las estaciones validadas ([Coker et al., 2022](#)).

En el estudio de Tryner et al. (2022) se llevó a cabo un diseño y testeo de sensores de bajo costo para interiores, en los cuales se priorizaron contaminantes como: PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂, CO, NO₂, y O₃; mediante muestreadores de filtro y sensores, los cuales fueron localizados en nueve (9) posiciones dentro de una cocina en Fort Collins, Colorado, Estados Unidos; durante 168 horas se realizó la medición de los datos en temporadas de incendios forestales y los datos obtenidos fueron calibrados con el método brindado por los fabricantes de sensores de gas; el material particulado fue monitoreado con los sensores PMS5003 y SPS30; el CO₂ con el sensor SCD30; el CO, NO₂ y O₃ con sensores electroquímicos (CO-B4, NO2-B43F y OX-B431 respectivamente), dando como resultado lo esperado en dichas condiciones de testeo, que los niveles más elevados de contaminantes serían de CO, CO₂ y NO₂ debido a que son contaminantes emitidos por la combustión del gas usado al momento de cocinar ([Tryner et al., 2022](#)).

Mientras que por otro lado el O₃ obtuvo los niveles más altos al momento de realizar las mediciones con las ventanas de la cocina abiertas (dando niveles de concentración muy similares a una estación de monitoreo tradicional ubicada a 4.2 km de distancia del área de estudio) obteniendo valores de correlación en los múltiples parámetros de Pearson's $r > 0.82$ en la mayoría de estos a excepción del O₃ en el cual obtuvo valores de correlación de Pearson's $r = 0.48$ a 0.78 ; siendo debido a la lejanía del punto de referencia generando dicha variación en los resultados obtenidos; tras esta investigación se determinó que luego de realizar la calibración en los datos obtenidos por los sensores de bajo costo, estos obtenían valores con una fiabilidad semejante a las estaciones tradicionales de referencia ([Tryner et al., 2022](#)).

Por otro lado, Dubey et al. (2022) plantea que la implementación de los sensores de bajo costo tiene la capacidad de revolucionar la investigación de la contaminación del aire, debido a que estos ofrecen datos de alta resolución espacial, pero, que la exactitud de estos datos es una de las mayores preocupaciones ([Dubey et al., 2022](#)). La investigación evaluó el desempeño de dos sensores de bajo costo para el monitoreo de material particulado, por un lado, el OPC N2 (con un costo aproximado de 400 USD) y el PM Nova Sensor (con un costo que ronda los 20 USD); definiendo cuatro ambientes de prueba distintos, siendo los siguientes; (i) interiores, (ii) interiores con incienso, (iii) aire ambiental (exteriores) y (iv) tráfico, usando un espectrómetro de aerosoles (GRIMM 1.108) como el instrumento de referencia ([Dubey et al., 2022](#)). Los resultados aludieron a que ambos sensores tienen la capacidad para monitorear

el material aerotransportado con una exactitud bastante aceptable como fue demostrado tras una regresión lineal con el instrumento de referencia (GRIMM), obteniendo valores de coeficientes de correlación superiores al 95,4% para el sensor OPC N2 ($R^2=0.954-0.987$) y mayores al 87,2% para el PM Nova Sensor ($R^2=0.872-0.981$) (Dubey et al., 2022). Además, el desempeño de los sensores fue mejor en las mediciones del material particulado de menor tamaño ($PM_{1.0}$ y $PM_{2.5}$) a comparación con los datos obtenidos del PM_{10} . También plantearon que los parámetros meteorológicos (velocidad del viento, temperatura y humedad relativa) no tuvieron ningún impacto significativo en el funcionamiento de los sensores (Dubey et al., 2022).

Así mismo, Kortoçi et al. (2022) desarrollaron un sistema de monitoreo de la contaminación del aire basado en los ciudadanos, para de esta forma determinar los niveles de exposición individual a contaminantes atmosféricos durante las actividades diarias en interiores y exteriores. Presentan un sensor de bajo costo portable para realizar los monitoreos de exposición individual y de esta forma demostrar la validez y los beneficios hacia las mediciones de contaminación basados en los ciudadanos, realizando primero la clasificación de datos entre interiores y exteriores, y luego, validando la consistencia y precisión de los datos en exteriores comparándolos con los datos de un monitoreo de referencia de una estación de gama alta (Kortoçi et al., 2022). Obteniendo como resultado la efectividad de la implementación de estos sistemas bajo tres criterios tras el análisis de los datos obtenidos, los cuales son; (i) proporcionar información detallada sobre la contaminación del aire en una amplia zona geográfica, (ii) identificación de las posibles causas de la contaminación del aire dependiendo del área y (iii) proporcionar a los ciudadanos información personalizada sobre los contaminantes a los cuales está expuesto durante su vida cotidiana (Kortoçi et al., 2022).

Bonilla et al. (2023) llevaron a cabo una investigación en el monitoreo de la concentración del $PM_{2.5}$ usando SBC en Pamplona, una ciudad colombiana, en dicho estudio pautaron cierta metodología extraída de la EPA y el protocolo de los SVCA generando ciertas consideraciones como la comparativa entre normativas, ubicación de los sensores en sitios estratégicos, entre otros (Bonilla et al., 2023). Tras la aplicación de toda la metodología propuesta y una vez realizados los análisis de los datos se encontró que los niveles de concentración para el $PM_{2.5}$ estaban por debajo de la normativa legal vigente de Colombia (resolución 2254 de 2017) y también por debajo de los niveles máximos propuestos por la OMS (Bonilla et al., 2023).

Con toda la información previamente recolectada de múltiples trabajos e investigaciones a nivel global, se toman en cuenta ciertas directrices y factores para el

desarrollo de esta investigación, principalmente datos importantes como la influencia de algunas variables en las mediciones de determinados contaminantes, los rangos y niveles de semejanza posibles a esperar de las mediciones obtenidas por los sensores a utilizar, las recomendaciones y observaciones para un óptimo desarrollo del estudio y los posibles resultados a obtener tras los respectivos análisis de los resultados obtenidos.

Cabe mencionar que con esta investigación se busca dar un valor agregado a los sistemas de monitoreo en Colombia, los cuales tienen por lo general muchas falencias y fallos, generando así vacíos en la información como de igual forma reivindicar a los sensores de bajo costo como una alternativa funcional y eficaz para los controles y monitoreos de la calidad del aire, siendo estos mucho más versátiles y fáciles de adaptar a múltiples escenarios de la vida cotidiana, en resumidas cuentas, esta investigación aporta al estado del arte de los monitoreos de bajo costo mediante la implementación de un sistema semiautomatizado para el estudio de las dinámicas ambientales en torno a la calidad del aire.

4. Marco de referencia

4.1. Marco teórico

4.1.1. Contaminación del aire

En el desarrollo de la vida cotidiana de la mayoría de personas a nivel global sus actividades generan que estas deban pasar una gran proporción de su tiempo diario expuesto a posibles espacios con un aire contaminado, generando así que la calidad del aire (CA) sea un factor determinante en la salud de los individuos, según la OMS la cifra de muertes asociadas a la contaminación del aire interior es de aproximadamente dos millones (para el año 2012) y que además, se considera este factor de riesgo como uno de los cuales puede ser evitado, todo esto en beneficio de la salud poblacional (Carazo et al., 2013).

Dentro de la CA hay que tener en cuenta que puede ser afectada por múltiples contaminantes, los cuales pueden ser de distinto origen: por combustión, por agentes y procesos biológicos, gases y compuestos orgánicos volátiles (mejor conocidos como COV); los cuales tiene un origen como dicta su nombre orgánico y son derivados de los hidrocarburos, provienen de procesos de combustión incompleta, procesos industriales y emisiones de fuentes móviles y fijas (Carazo et al., 2013). Además, cabe recalcar que el nivel de exposición a los contaminantes está generalmente directamente relacionado con otros factores como lo pueden ser el nivel de renta de un territorio (a menor nivel de renta, suelen ser territorios con un menor control de las emisiones y los permisos ambientales, de igual forma poseen menor cantidad de políticas públicas hacia la salud de las personas, derivando en un paupérrimo control de las enfermedades), la ubicación geográfica, y los arraigos culturales (Carazo et al., 2013). Dentro de los países con un gran nivel de renta se asocian otros parámetros como la infraestructura, las fuentes de contaminación, materiales de construcción, entre otros. Por otro lado, en los países con un bajo nivel de renta el uso de la biomasa como combustible para desarrollar múltiples actividades suele ser el factor de mayor incidencia en la afectación de la CA (Carazo et al., 2013).

Durante los últimos años, las afectaciones de la contaminación del aire a la salud humana es algo que no se puede negar, a tal punto que se ha tornado en un riesgo multisistémico no simplemente ligado a las enfermedades cardiovasculares y de los sistemas respiratorios, incluso, sus efectos son demostrados desde bajas dosis de contaminantes (Sunyer y Rivas,

2022). Para el año 2019 la OMS reportó que la contaminación del aire fue responsable directa de 4.2 millones de muertes prematuras y que también es una de las principales causas de la mortalidad y morbilidad humana (OMS, 2022). En el 2015 el *World Bank* (Banco Mundial) llegó a una conclusión similar de la expuesta por la OMS y, además, estimó en billones de dólares el costo para la salud en torno a la contaminación del aire (Sunyer y Rivas, 2022).

En el 2019 Naciones Unidas delegó a un grupo de científicos la elaboración de un plan para determinar las acciones más relevantes en torno a la realización de los objetivos de desarrollo sostenible, entre los cuales destacaba la reurbanización, esto principalmente ligado a los efectos sobre la salud y la contaminación urbana derivada de la movilidad y el transporte (Sunyer y Rivas, 2022). Para 2020 durante el confinamiento por la cuarentena del COVID-19, se demostró a nivel global una reducción drástica en los contaminantes del aire como el NO₂ (Dióxido de nitrógeno, asociado a la combustión de las fuentes móviles), pero por otro lado la reducción del PM no fue uniforme, este es asociado a los residuos agrícolas o la quema de biomasa, dando esto como índice que a nivel mundial las mayores fuentes de contaminación del aire con efectos en la mortalidad es la agricultura y la ganadería intensiva, sin embargo, en zonas urbanas la mayor fuente de contaminantes son las fuentes móviles (Sunyer y Rivas, 2022).

En 2021 la OMS desarrolló nuevos valores de referencia para algunos contaminantes del aire, esto en aras de proteger la salud. Para el NO₂ y PM_{2.5} los valores son entre cuatro y cinco veces inferiores a los criterios de calidad de la UE (Unión Europea) respectivamente (Sunyer y Rivas, 2022).

4.1.2. Monitoreo y sensores de calidad del aire

La OMS ha realizado recomendaciones para la evaluación y el seguimiento de la CA con fines de la protección de la salud humana. La implementación de estos sistemas implica un plan de distribución espacial de los sitios de monitoreo de CA, con prioridad hacia las ciudades pobladas en las cuales se observan niveles de emisiones de contaminantes de origen antropogénico (Campos et al., 2021). Aun así, en los países en desarrollo se estima una escasez de monitores de CA, además, los datos obtenidos por estos sistemas tienen demoras en su procesamiento, generando que estos no sean difundidos de manera eficiente. Por otro lado, esto es conducente a que las estrategias para la mitigación de los efectos nocivos de los contaminantes del aire no sean desarrolladas ni implementadas de manera eficiente para prevenir los riesgos negativos para la salud pública. Según Campos et al. (2021) uno de los

factores más relevantes es el seleccionar apropiadamente la localización para la implementación de los sistemas de monitoreo de la calidad del aire. Optimizando el número de sitios estratégicos para el monitoreo reduce los costos y, además, robustece la toma de datos para su posterior estudio e implementación de estrategias (Campos et al., 2021).

El uso de sensores de bajo costo (SBC) en los monitoreos urbanos se encuentra asociado a problemas en su desempeño, esto debido a la interferencia de otras variables (dígase meteorológicas u otros contaminantes) en las mediciones obtenidas por estos sensores generando que los niveles de concentraciones disten bastante en comparación a los instrumentos de referencia (Ríos et al., 2021). Los SBC han ido obteniendo su posicionamiento como una herramienta la cual busca complementar los monitoreos realizados por los sistemas oficiales y el incentivar la participación de los ciudadanos en tener conocimiento respecto a la calidad del aire ya sea en ambientes como los hogares, oficinas o zonas de estudio (Ríos et al., 2021).

La ubicación de los sensores debe tener una serie de consideraciones para un óptimo muestreo de la contaminación atmosférica, las variables a tomar en cuenta son las condiciones físicas de la zona, la accesibilidad al sitio de monitoreo, facilidad en torno a la instalación y funcionamiento de los dispositivos, disponibilidad a energía eléctrica, acceso a internet y contar con un espacio seguro para evitar daños o robos de los sensores (Bonilla et al., 2023).

4.1.3. Análisis estadístico de los monitoreos de la calidad del aire

En el trabajo de Centurión y Fababa. (2020) para el análisis de la concentración del $PM_{2.5}$ y GEI antes y durante la cuarentena por SARS-COV-2, se analizó, en primer lugar, el tipo de distribución mediante un supuesto de normalidad, el cual dependiendo del tamaño de la muestra se inclina hacia la prueba de Kolmogorov-Smirnov en caso de que sea un $n > 50$ o la de Shapiro-Wilk para $n < 50$, que para el conjunto de datos de la investigación de Centurión y Fababa era normal, dando origen a realizar el análisis estadístico mediante la prueba T de Student para determinar la similitud estadística en base a la significancia obtenida (Centurión y Fababa, 2020) esta prueba es elegida por las condiciones y el tamaño de la muestra, ya que, pese a que existen muchos tipos de pruebas estadísticas, todo radica en las características y tamaños de muestras que tengan un conjunto de datos, siendo este caso la mejor opción la prueba T de Student para grupos independientes debido a que como se mencionó previamente cumple con ciertos criterios, los cuales son, una distribución normal y que sus variables son cuantitativas.

Pero la anterior prueba estadística sólo es representativa para grupos con una distribución normal, en caso de que no todos los datos obtenidos cumplan este requisito se implementará la prueba U de Mann-Whitney, la cual es una prueba no paramétrica que funciona en conjuntos de datos sin una distribución normal (Choque y Hancco, 2018) que al igual que se contraparte se escoge por las condiciones y características del conjunto de datos a analizar, siendo esta también una de las más usadas por múltiples autores.

Durante la investigación realizada por Ríos et al. (2021) a los datos obtenidos de los monitoreos experimentales se les sometió a una comparación de regresión lineal múltiple, esto con el objetivo de determinar el R^2 de los sensores de prueba los cuales fueron SPS30 (al igual que en esta investigación respecto al $PM_{2.5}$) en comparación con los datos de referencia obtenidos por el sensor BAM 1020, dando valores de coeficientes de determinación en un rango desde 0.62 hasta 0.67 (Ríos et al., 2021).

Por lo que, la implementación de metodologías como la regresión lineal serán una herramienta útil para el desarrollo de esta investigación en pro de conocer los grados de correlación entre los sensores experimentales y los datos de referencia obtenidos durante este trabajo de grado.

4.2. Marco conceptual

En términos simples, la *programación* se basa en indicar a un computador, procesador o software la tarea que se debe realizar con una información determinada, es decir, bajo una secuencia de instrucciones y que, además, sean instrucciones en un lenguaje de programación el cual esta computadora, procesador o software puedan entender a lo que se refiere todo esto, con la finalidad de llevar a cabo una tarea que dé la solución a una problemática (Hernández, 2013).

Los *sensores* son dispositivos que pueden detectar cambios en algunos entornos, y de esta forma convertir un fenómeno físico en un voltaje analógico medible o también en una señal digital, la cual posteriormente tras emplear un código de programación refleja un resultado cuantitativo al dato obtenido, esto generalmente mediante una curva de calibración la cual se ha determinado y en el nivel de voltaje obtenido se refleja un valor del fenómeno medido, hay sensores de múltiples calidades y costos, normalmente entre mayor sean los costos de estos su precisión de medida es más alta debido a los componentes que pueda tener implementados (Maloy, 2020).

Dentro del recurso aire se utilizan múltiples herramientas, una de la más conocida es un *sistema de monitoreo* de la calidad del aire, los cuales están compuestos por unas estaciones que pueden ser tanto automáticas, manuales o híbridas; estas se utilizan para la cuantificación de la concentración de distintos contaminantes atmosféricos (Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo sostenible, 2010). Es decir, se encargan de generar medidas de múltiples parámetros que pueden afectar la calidad del aire, todo bajo el propósito de reducir los posibles efectos negativos sobre el ambiente y la salud humana como también la implementación de nuevas leyes y estrategias con la misma finalidad.

La *calidad del aire* se puede definir como un estándar para mitigar las posibles consecuencias de ciertos factores contaminantes sobre el medio ambiente, la economía y principalmente la salud humana. Se entiende como *contaminación atmosférica* aquello que puede afectar la calidad del aire, siendo “la presencia de materias o formas de energía que deriven en riesgo, molestia o daño para las personas y bienes de cualquier naturaleza”, cabe recalcar que siempre ha existido la contaminación atmosférica natural, proveniente de incendios, erupciones volcánicas, descomposición de materia orgánica, entre otros. Fue a partir del descubrimiento del fuego por parte del ser humano que se iniciaron las contaminaciones atmosféricas antropogénicas, lo que se ha incrementado tras las revoluciones industriales y el uso de combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica (Aranguéz et al., 1999).

La *electrónica* podría tomarse como un campo tanto de física como de ingeniería en base al diseño y uso de dispositivos que por lo general son circuitos electrónicos y que su funcionamiento está ligado a un flujo de corriente eléctrica para poder generar, transmitir, recibir y almacenar información determinada; el tipo de información puede variar en muchas formas, ya sean sonidos, imágenes, números o datos, entre otros (Gené, 2011).

4.3. Marco legal

Tabla 1. *Marco legal*

Nombre	Descripción	Aplicación
Resolución 2254 de 2017	Por el cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones	Art. 2, 3 y 4: Dan a conocer los niveles máximos permisibles de inmisión de contaminantes criterio, el nivel máximo para el año 2030 y los contaminantes tóxicos.

Tabla 1. *Continuación*

		Art. 9, 10 y 11: Niveles de prevención, alerta o emergencia
Resolución 2254 de 2017	Por el cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones	Art. 18, 19, 20 y 21: Determinación del ICA (índice de calidad del aire) Art. 22, 23 y 24: Mecanismos de difusión de los datos obtenidos de los monitoreos
Resolución 650 de 2010	Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire.	Art. 2: Brinda el contenido para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire
Resolución 2154 de 2010	Por la cual se ajusta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire adoptado a través de la Resolución 650 de 2010 y se adoptan otras disposiciones.	Complementa y realiza algunos cambios a la información consignada en el manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire.
Decreto 1076 de 2015	Por el medio del cual se expide el Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible	Ofrece una línea base en el contexto de los contaminantes atmosféricos definiéndose por sus tipos, los tipos de controles y las actividades que requieren especial observación, como también los niveles de alerta y emergencia por contaminación del aire.
Resolución 1035 de 2022	Por el cual se adopta el Plan Decenal de Salud Pública 2022-2031 con sus capítulos diferenciales: indígena para los pueblos y comunidades indígenas de Colombia, población víctima de conflicto armado, el Pueblo Rrom y la población negra, afrocolombiana, raizal y palenquera	Art. 2.14.1: Brinda directrices e información sobre el estado actual de ciertos puntos críticos en materia de concentración de PM ₁₀ y PM _{2.5} en distintos lugares del país.
Decreto 1005 de 2022	Por el cual se reglamenta la organización y funcionamiento de la Comisión Intersectorial de Salud Pública	Art. 4: Define las funciones de la comisión intersectorial de salud pública en Colombia en torno al plan decenal de salud pública para el cumplimiento de las necesidades y metas de la salud pública.

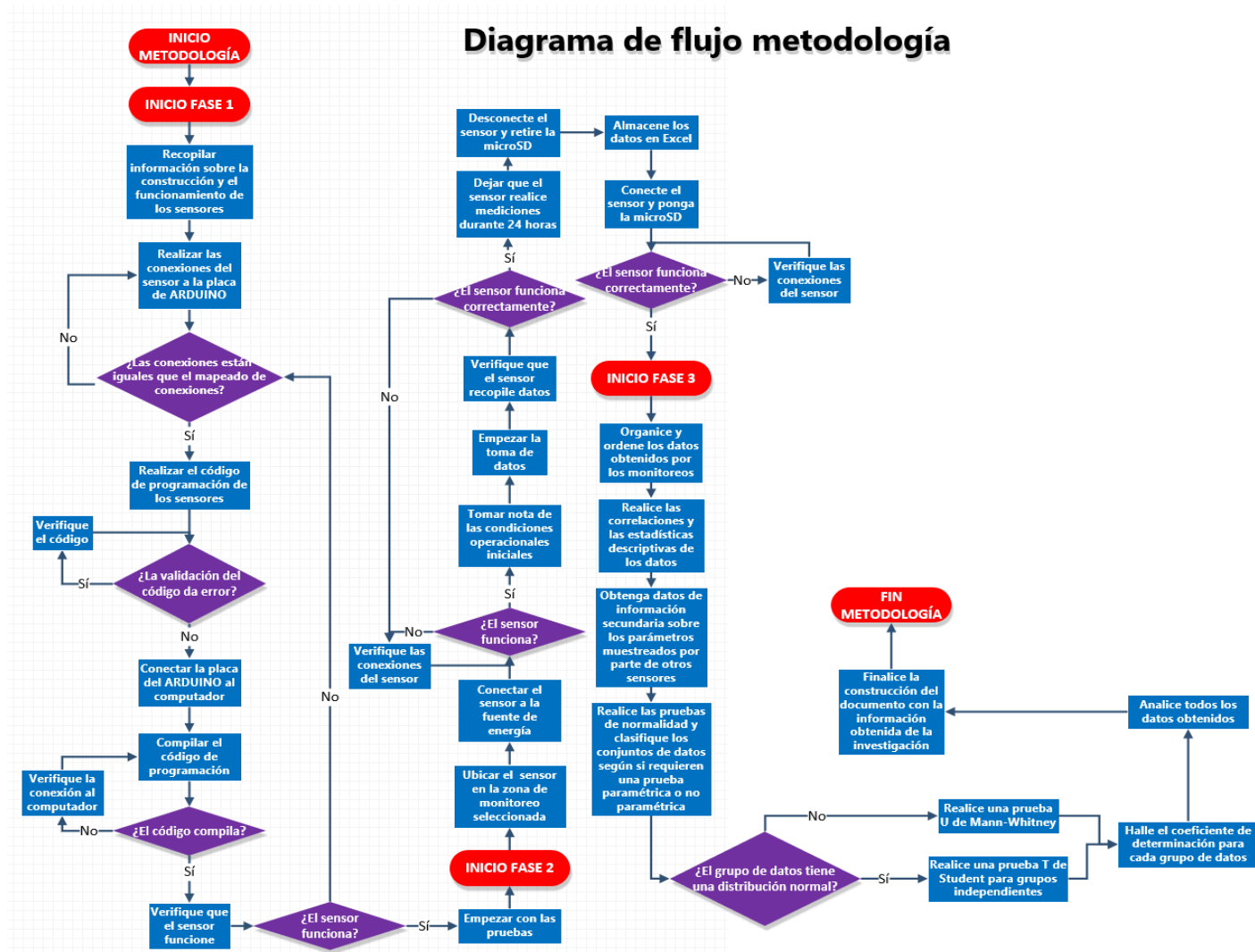
En adición, cabe mencionar que, a día de hoy en Colombia, no se cuenta con una normativa específica para la construcción y uso de sensores no validados en cuanto a las directrices a seguir para la operación de dichos sistemas, más allá del manual de los sistemas de vigilancia de la calidad del aire los cuales son para estaciones tradicionales validadas.

Pero, por otro lado, sí existen guías proporcionadas por la agencia de protección ambiental de Estados Unidos (EPA), tanto en la ubicación como la validación de los datos obtenidos por los sensores de bajo costo y que además brinda las concentraciones máximas de contaminantes a determinados tiempos de exposición; también la unión europea (UE) tiene sus propios niveles máximos de concentración de contaminantes.

5. Metodología

Se implementó una metodología cuantitativa, empleando métodos descriptivos y el uso de herramientas estadísticas como SPSS (Pruebas de supuesto de normalidad, T de Student y Mann-Whitney) y digitales como Excel (Coeficientes de correlación, estadística descriptiva y regresiones lineales) todo con el objetivo de mediar las medias entre los múltiples grupos de datos y así tener resultados concretos para su posterior análisis al finalizar la investigación, el paso a paso se evidencia en la **figura 1**.

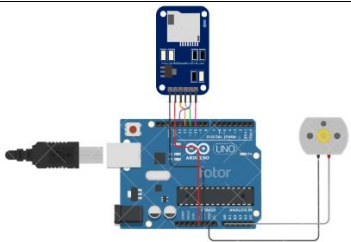
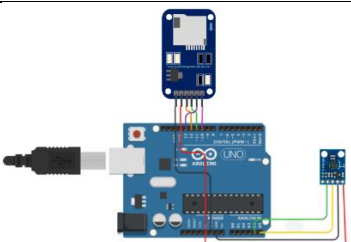
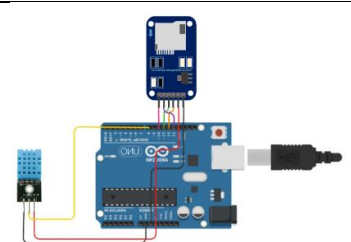
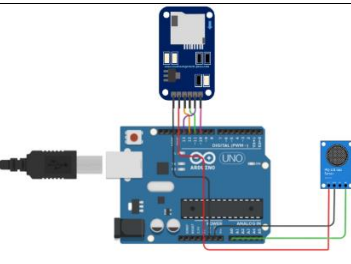
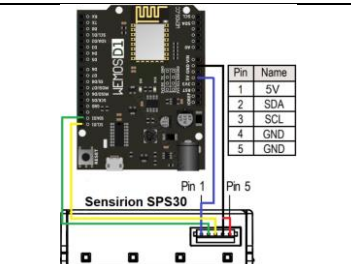
Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología utilizada para esta investigación.



5.1. Fase 1: Diseño, montaje y programación de los sensores de bajo costo empleando ARDUINO

Para comenzar, será necesario la recopilación de información sobre el funcionamiento de todos y cada uno de los componentes y sensores para el desarrollo de la investigación, esto para poder realizar su correcta construcción como de igual forma conocer sus condiciones operacionales y los rangos de sensibilidad y límite de detección de los dispositivos. Lo anterior mencionado bajo ciertos criterios de recopilación de información, como lo son, que venga de una fuente confiable o un manual internacional, información en foros de programación o de los mismos desarrolladores de los componentes, esto con la finalidad de obtener la mejor referencia sobre el funcionamiento de cada componente. Una vez se tenga la información requerida, se procederá a ensamblar todos los componentes de hardware a la placa de ARDUINO para que luego se proceda a la escritura del código de programación en el software de ARDUINO, cuando esté escrito y validado el código este deberá ser compilado a la placa y se verificará el correcto funcionamiento de todos y cada uno de los sensores desarrollados para este proyecto de investigación, seguido de realizar pruebas para corroborar la toma de datos por parte de estos.

Tabla 2. Mapeado de conexiones de los sensores.

Velocidad del viento	Dirección del viento	Temperatura y humedad
		
Ozono	PM 2.5	PM 2.5 con corrección de humedad
		

Para un mayor detalle de las conexiones necesarias para el desarrollo de esta investigación dirigirse al **Anexo 1**.

5.1.1. Actividad 1: Recopilar información sobre la construcción y el funcionamiento de los sensores

Se procede a realizar una investigación sobre el funcionamiento y las conexiones que debe tener cada sensor para su óptimo y correcto funcionamiento, también para conocer sus cualidades y características principales.

5.1.1.1. sensores contaminantes criterio. El sensor MQ-131 es un sensor de baja concentración de ozono en el aire, con un límite de detección desde 10 PPB hasta 2 PPM, requiere de un voltaje de 5 VDC, funciona mediante una curva de calibración la cual brinda un nivel de voltaje a determinada concentración de ozono, generando así un valor aproximado de la concentración en tiempo real.

El sensor SPS30 es un sensor óptico de material particulado el cual tiene la capacidad de realizar mediciones de $PM_{1.0}$, $PM_{2.5}$, $PM_{4.0}$ y PM_{10} , requiere una fuente de alimentación de 5 VDC, tiene un rango de funcionamiento de -10 a 60 °C y además cuenta con límite de detección de 0.3 μm .

5.1.1.2. sensores variables meteorológicas. El DHT11 es un sensor digital que mide la temperatura y la humedad del aire, con un rango de medición de 0 a 50 °C y una precisión de ± 2.0 °C, respecto a la temperatura, como también un rango de medición de 20% a 95% de humedad relativa con un margen de error del 5%, requiere una alimentación de 3-5 VDC todo esto mediante un sensor capacitivo de humedad y un termistor; generalmente usado en estudios y análisis de índole académico para el control de temperatura, monitoreo ambiental y agricultura, entre otros tantos.

La brújula electrónica compas GY-273 QMC5883L es un magnetómetro de triple eje el cual lee los componentes del campo magnético a su alrededor para de esta forma conocer la dirección aproximada del campo magnético terrestre y así calcular la orientación con respecto al norte magnético del planeta tierra, requiere una alimentación de 3-5 VDC y tiene una precisión de ± 2.0 °.

El motor DC 3V tiene un rango de funcionamiento de 3-4.5 VDC con una velocidad máxima de funcionamiento a 15000 RPM, puede medir velocidades del viento a máximo 30 m/s.

Por otro lado, el sensor SHT31 de temperatura y humedad relativa posee un rango de operación desde -40°C a 125°C, un margen de error de ± 0.2 °C y un límite de detección desde

-40°C hasta 90°C. En cuanto a las mediciones de humedad relativa cuenta con unas características de límites de detección de 0-100% y tiene una precisión de $\pm 2\%$; para su alimentación necesita 3.3-5 VDC.

5.1.1.3. componentes importantes para el funcionamiento de los sensores.

Modulo micro SD, es un adaptador el cual proporciona la opción de leer y escribir en tarjetas de memoria micro SD, esto con la finalidad de realizar el almacenamiento de datos de una manera remota y semiautomática; todo esto para facilitar la obtención, almacenamiento y cuantificación de la investigación.

Un ADUINO UNO es un microcontrolador conectado y alimentado mediante un puerto USB, posee 14 pines que pueden ser configurados como entrada o salidas a los que se pueden conectar dispositivos que sean capaz de transmitir o recibir señales entre 0 y 5V, asimismo, posee entradas analógicas las cuales pueden ser usadas para la obtención de datos por partes de sensores en forma de fluctuaciones continuas de un voltaje.

Para un mayor detalle de todas las características de los sensores y componentes utilizados en este trabajo de grado, diríjase al **Anexo 2**.

5.1.2. Actividad 2: Realizar el código de programación para el funcionamiento específico de cada sensor

Empleando el software y hardware de ARDUINO, se obtienen las respectivas librerías (información aquí) para el correcto funcionamiento de cada tipo de componente utilizado en la construcción de los sensores, esto con la intención de comprobar el monitoreo continuo y evitar el mal funcionamiento de los sensores a largo plazo durante el desarrollo de la investigación. A continuación, en la **figura 2** se brinda un ejemplo del código de programación que se desarrollará en específico para cada sensor y sus condiciones operacionales, para mayor detalle de los códigos de programación para cada sensor diríjase al **Anexo 3**.

Figura 2. Ejemplo de código de programación en ARDUINO para uno de los sensores.

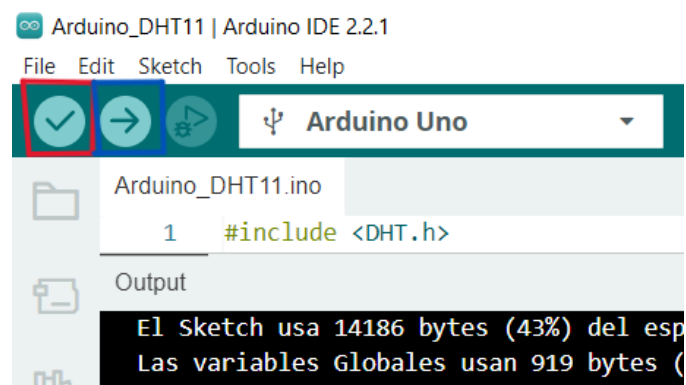
```

1  #include <DHT.h>
2  #include <SPI.h>
3  #include <SD.h>
4  DHT dht(8,DHT11);
5  #define SS 10
6  File archivo;
7  float celsius;
8  float hume;
9  void setup(){
10     Serial.begin(9600);
11     dht.begin();
12     SD.begin(SS);
13     archivo= SD.open("Temp y humedad.txt", FILE_WRITE);
14 }
15
16 void loop()
17 {
18     float TemC = dht.readTemperature();
19     float Humd = dht.readHumidity();
20
21     Serial.print(TemC);
22     Serial.println("°C");
23
24     Serial.print(Humd);
25     Serial.println("%");
26     celsius = TemC;
27     hume = Humd;
28     registrasd();
29 }
30 void registrasd(){
31
32     archivo=SD.open("Temp y humedad.txt", FILE_WRITE);
33     if (archivo){

```

5.1.3. Actividad 3: Validar y compilar el código de programación para cada sensor

Una vez escrito el código de programación para cada sensor, se procede a validar el código, esto mediante una función del software ARDUINO la cual nos brinda información sobre si el código es correcto y no posee errores, como se muestra en la siguiente **figura 3**.

Figura 3. Ejemplo de validación y compilación del código de programación en ARDUINO.

Siendo el recuadro de color rojo el botón para validar o verificar si el código está correctamente escrito y funciona, una vez validado y si la ventana output no muestra ningún error, significa que el código está bien y se procede entonces a compilar o cargarlo en una tarjeta ARDUINO previamente conectada con los componentes específicos de cada sensor y su respectiva programación.

5.2. Fase 2: Toma de información primaria mediante el uso de los sensores de bajo costo en la zona de Catumare, donde existen múltiples fuentes de contaminantes

Se estableció el punto estratégico ubicado en la sede Loma linda de la Universidad Santo Tomás, debido a que cumple con las consideraciones de la guía de la EPA en base a la disponibilidad de wifi, energía eléctrica, una zona segura y de fácil acceso para un monitoreo y estudio constante, con el propósito de posteriormente poder analizar estadísticamente la correlación de los datos obtenidos con los datos de referencia proporcionados por otras estaciones para el monitoreo de la calidad del aire, además, es menester la realización de muestreos en distintas condiciones operacionales para evidenciar las variaciones en el desempeño de los sensores bajo distintos entornos y así poder determinar la efectividad del sistema, los muestreos serán realizados durante un lapso cercano a un mes, y se realizarán mediciones cada minuto, para un total de 1440 datos por día de muestreo, todos estos datos serán diligenciados en una base de datos para su posterior estudio, el objetivo será ver el comportamiento del monitoreo bajo distintas condiciones climáticas para obtener un panorama más completo de la calidad del aire. A continuación, en la **figura 4** se puede observar los puntos de relevancia en la zona de estudio.

Figura 4. Mapa de la zona de estudio.

En la anterior figura se encuentra la ubicación espacial de zonas de relevancia para este estudio, principalmente, la ubicación en donde se dejaron los sensores creados durante este trabajo de grado y zonas a tomar en cuenta como pueden ser fuentes de emisiones cercanas, también resaltan dos de los puntos en donde se ubican los sensores de referencia para el análisis de los datos.

5.2.1. Actividad 1: Ubicación de los sensores en la sede Loma linda de la Universidad Santo Tomás

Debido a las condiciones requeridas para el óptimo funcionamiento de los sensores eran menester ciertos criterios, entre los cuales estaban un acceso constante a energía eléctrica, esto con el fin de tener un monitoreo uniforme tratando de evitar al máximo los vacíos de información de los muestreos y además una conexión a una red Wifi, la cual es necesaria para los sensores de material particulado que son automáticos y realizan el cargue de los datos en tiempo real a una red de monitoreo global; por todo lo anterior mencionado se concluye que la mejor opción es la ubicación de dichos sensores en la sede Loma linda de la Universidad Santo Tomás, la cual además está a una distancia no mayor a 100m de una de las estaciones del SVCA de la ciudad de Villavicencio.

En la **figura 5** se observan los sensores debidamente conectados a una fuente eléctrica y listos para realizar el monitoreo de los parámetros asociados a la calidad del aire.

Figura 5. Sensores de calidad del aire de bajo costo ubicados en la zona de monitoreo.



5.2.2. Actividad 2: Puesta en marcha de la toma de datos por parte de los sensores

Tras realizar la colocación de los sensores y sus respectivas conexiones a una corriente eléctrica y Wifi según sea el caso, se toma nota de las condiciones operacionales iniciales tomando en cuenta la hora, el clima, la densidad de tráfico y las posibles actividades económicas que puedan generar emisiones atmosféricas, se realiza una etapa de quemado de los sensores y tras dos horas de toma de datos se desconectan y se procede a revisar que estén funcionando correctamente y almacenando los datos en las memorias micro SD.

En caso de que no haya ningún problema en cuanto al almacenamiento de los datos y el funcionamiento de los sensores se vuelve a iniciar la toma de datos de manera continua; por otro lado, si algún sensor presenta alguna falla en su monitoreo se observan las conexiones y se revisa que no haya ningún error en su código lo antes posible para retomar la toma de datos. En la **figura 6** se observan algunos de los sensores ya realizando muestreos en óptimas condiciones.

Figura 6. Sensor de bajo costo realizando monitoreo.



5.2.3. Actividad 3: Obtención y almacenamiento de datos para su posterior análisis

Luego de 24 horas de monitoreo ininterrumpido por parte de los sensores se procede a desconectarlos y realizar la toma de datos, empezando por retirar las tarjetas micro SD de los módulos de tarjeta de los sensores y con la ayuda de una laptop se abren los documentos que aparecerán en un archivo de texto o mejor conocido como bloc de notas; de allí se pasan los datos a un documento de Excel para un mayor orden y versatilidad en torno a su procesamiento que se realizará durante la última fase.

Esta actividad es cíclica, de manera tal que en lapsos de tiempo no mayores a 1 semana se proceda a detener los sensores para la extracción de los datos y a su vez, verificar que todos sigan funcionando de manera correcta y si no es el caso solucionar el error lo antes posible.

5.3. Fase 3: Análisis estadístico descriptivo en torno a la correlación de los datos obtenidos por los sensores de bajo costo en comparación con otras estaciones de monitoreo de calidad del aire

Una vez los monitoreos hayan sido concluidos se procede a realizar una prueba de normalidad de todos los datos tomados con los sensores de bajo costo, seguido de un análisis estadístico en torno a la correlación de estos datos adquiridos en comparación con otras estaciones de monitoreo de la calidad del aire de Villavicencio, esto bajo un método de análisis de U de Mann-Whitney o T de Student dependiendo de las características de los grupos de datos; de esta manera el manejo y estudio de dicha información será realizado con el software SPSS y Excel, todo esto con la finalidad de analizar e interpretar la precisión en la medición de los sensores de bajo costo bajo distintas condiciones operacionales.

5.3.1. Actividad 1: Organizar y ordenar todos los datos obtenidos durante el muestreo

Esta actividad al igual que la actividad 3 de la fase 2 es cíclica, por lo tanto, cada vez que se realice una extracción de información de los sensores, se deben organizar y ordenar estos para evitar confusiones debido al grosor de datos (aproximadamente más de 1400 al día por cada variable), además, de esta manera es mucho más sencillo identificar los vacíos en la información generados por las fallas en la red eléctrica de la ciudad y con la ayuda de los sensores de material particulado y su cargue de datos en tiempo real se determinan los momentos en los cuales los sensores estuvieron apagados por falta de energía eléctrica. A continuación, en la **figura 7** se da un ejemplo de la organización de los datos que se lleva a cabo en la herramienta Excel, esto con la finalidad de poder identificar de una manera más fácil la ausencia de datos derivada de fallas en la red eléctrica de la ciudad u otros factores.

Figura 7. Ejemplo de tabulación de los datos obtenidos por los muestreos semiautomáticos y automáticos de los sensores de bajo costo.

	A	B	C	D	E	F	G	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X	Y	AB	AC	AD
1	FECHA	HORA	VV	DV	O3	H%	T°		JIMENA		PM 2.5	JIMENA		T°	H%	PM 2.5	PROM. 24H	PROM. TOTAL			DIEGO
2	24/08/2023	10:09:00 a.m.	0	219	17	61	31		24/08/2023	12:30:00 p.m.	3	24/08/2023	7:00:00 p.m.	29	70	10	8,95	8,94		24/08/2023	12:30:00 p.m.
3	24/08/2023	10:10:00 a.m.	0	206	119	63	31		24/08/2023	5:30:00 p.m.	11	24/08/2023	10:00:00 p.m.	28	75	7	9,60	NORMA		24/08/2023	5:30:00 p.m.
4	24/08/2023	10:11:00 a.m.	0	224	84	58	32		24/08/2023	6:00:00 p.m.	7	25/08/2023	1:00:00 a.m.	24	79	2	8,78	<37		24/08/2023	6:00:00 p.m.
5	24/08/2023	10:12:00 a.m.	0	209	78	59	32		24/08/2023	6:30:00 p.m.	8	25/08/2023	4:00:00 a.m.	24	82	10	11,51			24/08/2023	6:30:00 p.m.
6	24/08/2023	10:13:00 a.m.	0	208	70	57	32		24/08/2023	7:00:00 p.m.	10	25/08/2023	7:00:00 a.m.	27	77	22	9,90			24/08/2023	7:00:00 p.m.
7	24/08/2023	10:14:00 a.m.	0	211	63	50	32		24/08/2023	7:30:00 p.m.	9	25/08/2023	10:00:00 a.m.	33	50	11	8,37			24/08/2023	7:30:00 p.m.
8	24/08/2023	10:15:00 a.m.	0	224	43	54	32		24/08/2023	8:00:00 p.m.	10	25/08/2023	1:00:00 p.m.	35	53	12	10,12			24/08/2023	8:00:00 p.m.
9	24/08/2023	10:16:00 a.m.	0	219	136	52	32		24/08/2023	8:30:00 p.m.	8	25/08/2023	4:00:00 p.m.	34	52	12	12,06			24/08/2023	9:30:00 p.m.
10	24/08/2023	10:17:00 a.m.	0	192	116	52	32		24/08/2023	9:00:00 p.m.	9	25/08/2023	7:00:00 p.m.	30	67	7	10,26			24/08/2023	10:00:00 p.m.
11	24/08/2023	10:18:00 a.m.	0	211	103	55	32		24/08/2023	9:30:00 p.m.	9	25/08/2023	10:00:00 p.m.	28	74	10	4,94			24/08/2023	11:30:00 p.m.
12	24/08/2023	10:19:00 a.m.	0	213	93	52	33		24/08/2023	10:00:00 p.m.	7	26/08/2023	1:00:00 a.m.	27	74	12	6,67			25/08/2023	12:00:00 a.m.
13	24/08/2023	10:20:00 a.m.	0	237	86	61	32		24/08/2023	10:30:00 p.m.	7	26/08/2023	4:00:00 a.m.	26	71	9	7,76			25/08/2023	12:30:00 a.m.
14	24/08/2023	10:21:00 a.m.	0	229	80	65	32		24/08/2023	11:00:00 p.m.	7	26/08/2023	7:00:00 a.m.	28	70	18	9,45			25/08/2023	1:00:00 a.m.
15	24/08/2023	10:22:00 a.m.	0	224	76	59	31		24/08/2023	11:30:00 p.m.	9	26/08/2023	10:00:00 a.m.	35	47	13	8,49			25/08/2023	2:30:00 a.m.
16	24/08/2023	10:23:00 a.m.	0	211	62	64	31		25/08/2023	12:00:00 a.m.	10	26/08/2023	1:00:00 p.m.	36	47	9	7,27			25/08/2023	3:00:00 a.m.
17	24/08/2023	10:24:00 a.m.	0	206	60	61	31		25/08/2023	12:30:00 a.m.	6	26/08/2023	4:00:00 p.m.	35	49	18				25/08/2023	3:30:00 a.m.
18	24/08/2023	10:25:00 a.m.	0	212	20	60	31		25/08/2023	1:00:00 a.m.	2	26/08/2023	10:00:00 p.m.	28	69	8				25/08/2023	4:30:00 a.m.
19	24/08/2023	10:26:00 a.m.	0	225	56	61	31		25/08/2023	1:30:00 a.m.	5	27/08/2023	1:00:00 a.m.	27	70	9				25/08/2023	5:00:00 a.m.
20	24/08/2023	10:27:00 a.m.	0	228	43	62	31		25/08/2023	2:00:00 a.m.	5	27/08/2023	4:00:00 a.m.	26	63	6				25/08/2023	5:30:00 a.m.
21	24/08/2023	10:28:00 a.m.	0	211	35	63	31		25/08/2023	2:30:00 a.m.	5	27/08/2023	7:00:00 a.m.	26	70	7				25/08/2023	7:00:00 a.m.
22	24/08/2023	10:29:00 a.m.	0	214	42	63	31		25/08/2023	3:00:00 a.m.	6	27/08/2023	10:00:00 a.m.	32	54	26				25/08/2023	8:00:00 a.m.
23	24/08/2023	10:30:00 a.m.	0	222	40	65	31		25/08/2023	3:30:00 a.m.	6	27/08/2023	1:00:00 p.m.	33	50	8				25/08/2023	8:30:00 a.m.
24	24/08/2023	10:31:00 a.m.	0	216	40	67	31		25/08/2023	4:00:00 a.m.	10	27/08/2023	4:00:00 p.m.	32	59	10				25/08/2023	9:00:00 a.m.
25	24/08/2023	10:32:00 a.m.	0	219	45	61	32		25/08/2023	4:30:00 a.m.	6	27/08/2023	7:00:00 p.m.	29	69	8				25/08/2023	10:00:00 a.m.
26	24/08/2023	10:33:00 a.m.	0	221	25	65	32		25/08/2023	5:00:00 a.m.	6	27/08/2023	10:00:00 p.m.	27	73	8				25/08/2023	10:30:00 a.m.

5.3.2. Actividad 2: Realizar la correlación entre las múltiples variables y la estadística descriptiva para cada grupo de datos

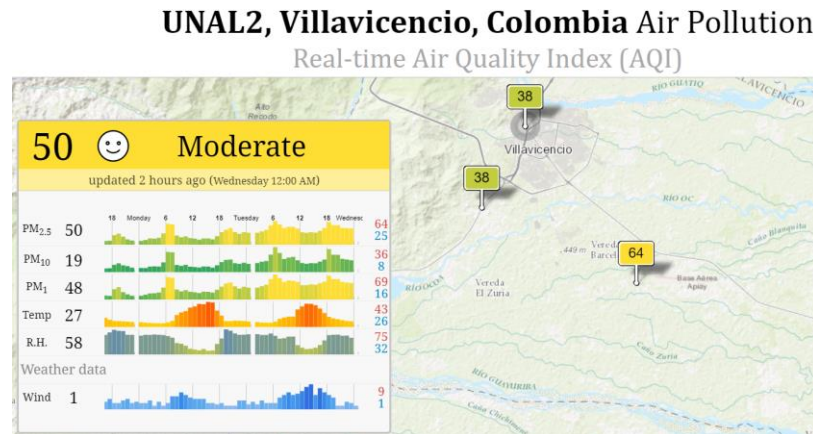
Mediante el uso de Excel y la herramienta que este nos brinda en análisis de datos, se realiza la correlación de los datos entre los sensores como también la estadística descriptiva para cada variable específica, esto con la finalidad de resumir la gran cantidad de información obtenida por cada uno de los sensores y a su vez, mediante la correlación de las distintas variables se determina la relación lineal que puedan tener entre sí y de dicha manera comprender el comportamiento de estas bajo distintas condiciones operacionales.

5.3.3. Actividad 3: Obtención de datos por parte de otras estaciones de monitoreo de la calidad del aire

Aplicando la búsqueda de información secundaria se procede a realizar una indagación referente a datos relacionados a parámetros de calidad del aire para la ciudad de Villavicencio, en este caso específico debido a que no se contaba con datos en tiempo real proporcionados por el SVCA de la ciudad, esto debido a que las estaciones de monitoreo validadas de la ciudad están deshabilitadas y sin funcionar desde hace más de 5 meses, causando entonces que no se pueda realizar una comparación con estos datos de referencia, por esta razón se optó por tomar múltiples referencias de otros sistemas de monitoreo como el de PLUME LABS y el Real-time

Air Quality Index (AQI); todo esto como solución a la realización del proyecto de investigación, ya que, el sistema de monitoreo de la ciudad no está funcionando desde hace meses. La siguiente **figura 8** muestra la interfaz de la plataforma AQI.

Figura 8. Vista de la base de datos AQI para la obtención de información secundaria.



5.3.4. Actividad 4: Análisis estadístico de los datos obtenidos por los sensores de bajo costo y otras estaciones de monitoreo de la calidad del aire

En primer lugar, se realiza una prueba de normalidad en el software SPSS a las variables para determinar si tienen una distribución normal o no, se analizan mediante las pruebas de Kolmogorov-Smirnov y la de Shapiro-Wilk las cuales dependiendo del tamaño de la muestra se opta por una u otra, en este caso como el tamaño de las muestras eran inferiores a 50 (correspondiente a los promedios diarios) se escoge la prueba de Shapiro-Wilk ya que esta es para tamaños de muestra menores que 50.

A continuación, tomando en cuenta la significancia obtenida para cada conjunto de datos se dice que estos son normales siempre y cuando su valor de sig. > 0.05 para ambas variables, con este valor se busca determinar el tipo de prueba estadística más óptima para evaluar la similitud de los datos, siendo que en caso de que dé como resultado una distribución normal se emplearía la prueba T de Student para grupos independientes o en su contraparte si el valor de la significancia es menor a 0.05 para cualquiera de las dos variables, se emplearía un método no paramétrico el cual para este tipo de casos el más recomendado es el de U de Mann-Whitney, por lo que en las siguientes tablas están todos los valores de significancia obtenidos para cada tipo de parámetro y el tipo de prueba que se deberá realizar según las características obtenidas.

6. Resultados y análisis

6.1. Fase 1: Análisis estadístico simple de las variables durante 27 días de monitoreo

A continuación, se presentan todos los datos de las variables que fueron medidas por los sensores experimentales durante un lapso total de casi un mes, en los que en su totalidad fueron un conjunto de 11 variables distintas entre los 6 tipos de sensores. Cada tipo de sensor tenía rangos de monitoreo distintos lo cual generó que el groso de los datos variara según el tipo de sensor, en los sensores semiautomáticos se obtuvo un total de 38686 datos por cada uno, dando una suma de 154744 datos entre los 4 sensores semiautomáticos, esto tomando en cuenta que realizaban mediciones cada minuto, dando un valor aproximado de 1440 datos al día siempre y cuando no hubiese intermitencia en el servicio eléctrico.

Por su parte, los sensores automáticos realizaban mediciones cada 10 minutos, pero al realizar el cargue de datos de manera automática a la hora de exportar los datos dependiendo del rango de fechas seleccionada el lapso de tiempo entre mediciones variaba, al final para el sensor automático de material particulado sin corrección de humedad se obtuvo un total de 1540 datos entre 3 variables distintas como lo fueron el $PM_{2.5}$, la temperatura y la humedad relativa y de igual manera para el sensor automático con corrección de humedad marcando la diferencia solamente en el groso total de datos con un valor de 1003 (esto debido a problemas operativos del sensor que generaron fallas durante la primer semana de monitoreo, generando la pérdida de algunos datos).

Todo lo anterior sumado, daría un total de 157287 datos obtenidos de los muestreos, a continuación, en la siguiente **tabla 3** se demuestra la cantidad de datos perdidos por cada sensor durante los monitoreos debido a las fallas en la red eléctrica de la ciudad.

Tabla 3. Cantidad de datos perdidos por cada sensor.

Sensor	Datos perdidos
Semiautomático de temperatura	631
Semiautomático de humedad relativa	
Semiautomático de velocidad del viento	
Semiautomático de dirección del viento	
Semiautomático de Ozono	
Automático de $PM_{2.5}$ sin corrección de humedad	61
Automático de $PM_{2.5}$ con corrección de humedad	598

6.1.1. Comparación de las concentraciones obtenidas con la norma colombiana

En Colombia existe una normatividad la cual dicta la norma de calidad del aire ambiente, esta es la resolución 2254 del 2017 que en su artículo 2 nos brinda los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio siendo para este caso preciso una concentración máxima de $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el $\text{PM}_{2.5}$ y $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para los niveles de O_3 , en la siguiente **tabla 4** están los datos obtenidos por el monitoreo llevado a cabo durante la investigación.

Tabla 4. Promedios diarios de concentraciones de contaminantes criterio.

Fecha	Concentración PPM media diaria $\text{PM}_{2.5}$ SCH	Concentración PPM media diaria $\text{PM}_{2.5}$ CCH	Límite $\text{PM}_{2.5}$ PPM según Res. 2254 de 2017	Concentración PPB media durante 8 horas	Límite O_3 PPM según Res. 2254 de 2017
24/08/2023	8.1	5.6	37	63	100
25/08/2023	10.1	6.5		67	
26/08/2023	12.5	8.5		80	
27/08/2023	9.6	6.9		70	
28/08/2023	9.4	7.1		62	
29/08/2023	12.0	7.1		29	
30/08/2023	7.7	5.3		43	
31/08/2023	9.5	6.7		106	
01/09/2023	11.6	6.9		93	
02/09/2023	10.8	6.8		45	
03/09/2023	8.0	5.4		47	
04/09/2023	5.1	3.4		47	
05/09/2023	7.5	5.3		48	
06/09/2023	8.5	6.8		49	
07/09/2023	9.1	7.1		49	
08/09/2023	7.2	4.8		49	
09/09/2023	8.4	6.0		49	
10/09/2023	6.4	4.8		50	
11/09/2023	4.4	2.8		96	
12/09/2023	6.2	4.6		84	
13/09/2023	9.0	7.4		68	
14/09/2023	4.8	3.3		74	
15/09/2023	7.6	6.5		115	
16/09/2023	9.3	9.3		84	
17/09/2023	6.2	5.1		121	
18/09/2023	8.9	9.2		120	
19/09/2023	11.8	10.9		118	
20/09/2023	10.3	10.5		115	

Como se observa en los resultados de los monitoreos obtenidos, las concentraciones medias para estos contaminantes criterio no superan lo dispuesto por la norma, dando a entender entonces que la calidad del aire es óptima y no representa una gran amenaza para la salud pública.

6.1.2. Análisis estadístico descriptivo de las múltiples variables obtenidas por los sensores de bajo costo

La **tabla 5** muestra los resultados de la estadística descriptiva realizada a todos los datos obtenidos de los sensores semiautomáticos durante los días de muestreo.

Tabla 5. Estadística descriptiva de las variables obtenidas por los sensores semiautomáticos.

	Velocidad viento	Dirección viento	Ozono	Humedad relativa	Temperatura
Media	$1,21 \times 10^{-4}$	219,577	72,802	69,743	29,111
Error típico	$1,48 \times 10^{-5}$	0,064	0,151	0,082	0,022
Mediana	0	219	66	75	28
Moda	0	219	50	80	25
Desv. Est	0,003	12,516	29,720	16,085	4,260
Varianza	0,00001	156,650	883,260	258,739	18,147
Curtosis	18665,692	2,731	-1,147	-1,004	-0,186
Coe. Asim	133,561	0,825	0,416	-0,404	0,522
Rango	0,440	214	129	84	33
Mínimo	0	102	17	16	20
Máximo	0,440	316	146	100	53
Cuenta	38686	38686	38686	38686	38686

De estos resultados se entiende que para la mayoría de las variables exceptuando la humedad relativa hay una mayor proporción de valores por encima de la media, debido a que su coeficiente de asimetría es positivo; y por otro lado para el ozono, la humedad relativa y la temperatura hay una mayor cantidad de datos separados de la media esto debido a que su curtosis es negativa, indicando una distribución más achatada o plana.

Tabla 6. Estadística descriptiva de las variables obtenidas por el sensor automático sin corrección de humedad.

	Temperatura	Humedad relativa	PM 2.5
Media	29,487	65,464	8,791
Error típico	0,232	0,725	0,162
Mediana	29	69	8
Moda	26	70	6
Desviación estándar	3,756	11,712	5,170
Varianza	14,105	137,180	26,728
Curtosis	-1,110	-1,105	4,972
Coefficiente de asimetría	0,346	-0,457	1,819
Rango	16	44	37
Mínimo	23	41	2
Máximo	39	85	39
Cuenta	261	261	1018

Para este grupo de datos cabe recalcar que el PM_{2.5} posee una buena proporción de los datos cercanos a la media, además de que la media en comparación con la resolución 2254 de 2017 la cual dicta la norma de calidad del aire ambiente; estaría en cumplimiento con su artículo 2 sobre los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio que en este caso para el PM_{2.5} a partir del 1 de julio de 2018 no debe ser superior a 37 µg/m³.

Tabla 7. Estadística descriptiva de las variables obtenidas por el sensor automático con corrección de humedad.

	Temperatura	Humedad relativa	PM 2.5
Media	45,934	35,340	6,369
Error típico	1,121	2,124	0,134
Mediana	50	26	6
Moda	51	24	6
Desviación estándar	11,545	21,868	3,777
Varianza	133,281	478,207	14,264
Curtosis	-0,529	0,059	10,360
Coefficiente de asimetría	-0,971	1,302	2,431
Rango	40	71	37
Mínimo	23	14	0
Máximo	63	85	37
Cuenta	106	106	791

En esta tabla se observan valores atípicos muy elevados respecto a la temperatura llegando a un valor máximo de 63°C y de igual forma una media de aproximadamente 46°C, esto debido a que como dicho sensor tiene una corrección de humedad el cual lo que hace es calentar el aire del muestreo previo a su análisis genera el gran aumento en la temperatura como de igual forma la disminución de la humedad relativa (que de igual manera presenta datos promedio muy inferiores en comparación a los otros sensores) al igual que el caso anterior la concentración de PM_{2.5} no excede los valores exigidos por la norma.

6.1.3. Análisis coeficientes de correlación entre las muestras obtenidas por los sensores de bajo costo

En la **tabla 8**, se observan los coeficientes obtenidos tras la realización de la correlación entre los sensores semiautomáticos para la determinación de la influencia de cada una de las variables entre sí.

Tabla 8. *Coeficiente de correlación de los datos obtenidos por los sensores semiautomáticos.*

	Velocidad del viento	Dirección del viento	Ozono	Humedad relativa	Temperatura
Velocidad del viento	1				
Dirección del viento	-0,003	1			
Ozono	0,013	0,036	1		
Humedad relativa	-0,001	-0,002	0,029	1	
Temperatura	0,004	0,000	-0,044	-0,954	1

Dentro de los resultados el único coeficiente importante a tomar en cuenta es el de la temperatura vs humedad relativa con un valor de -0.954, dictando así que estas variables tienen una relación inversamente proporcional, ya que, al aumentar una de estas la otra va a tender a disminuir.

Tabla 9. *Coeficiente de correlación de los datos obtenidos por el sensor automático sin corrección de humedad.*

	Temperatura	Humedad relativa	Material particulado
Temperatura	1		
Humedad relativa	-0,960	1	
Material particulado	0,353	-0,328	1

Para este caso de la **tabla 9**, se observa un coeficiente similar en cuanto a la temperatura vs la humedad relativa de los sensores semiautomáticos, para este caso con un valor de -0.960; además, cabe mencionar la relación entre el material particulado y los otros dos parámetros que al cotejar frente a la temperatura se obtiene una relación directamente proporcional con un coeficiente de 0.353 lo que indica que al aumentar la temperatura el material particulado tendrá esta misma tendencia, pero en un rango menor, y por otro lado, en la correlación entre el material particulado y la humedad relativa se obtiene un valor de -0.328 indicando que son inversos.

Tabla 10. *Coeficiente de correlación de los datos obtenidos por el sensor automático con corrección de humedad.*

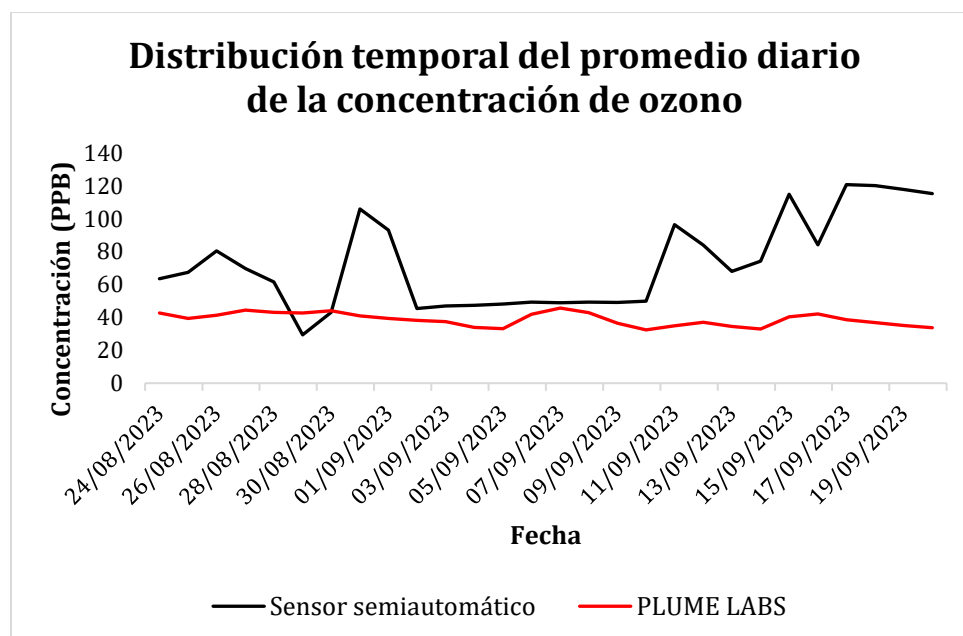
	Temperatura	Humedad relativa	Material particulado
Temperatura	1		
Humedad relativa	-0,980	1	
Material particulado	-0,438	0,475	1

En este último sensor se observa el coeficiente más alto en torno a la temperatura vs la humedad relativa con un valor de -0.980 de correlación, como a su vez se obtienen unas correlaciones inversas en comparación con el sensor automático sin corrección de humedad, dando valores de -0.438 para el coeficiente del material particulado vs la temperatura y de 0.475 para la humedad relativa vs el material particulado, lo cual son características atípicas ya que según la bibliografía, por lo general, al observarse niveles de humedad relativa mayores en teoría la concentración del material particulado es menor (Rojano et al., 2012).

6.1.4. Gráficas de los valores obtenidos por los sensores experimentales vs los sensores y datos de referencia

En la **figura 9** se observa la gráfica de los datos obtenidos por uno de los sensores experimentales utilizado para el desarrollo de la investigación en comparación por los datos obtenidos de una fuente de referencia como lo es en este caso el PLUME LABS.

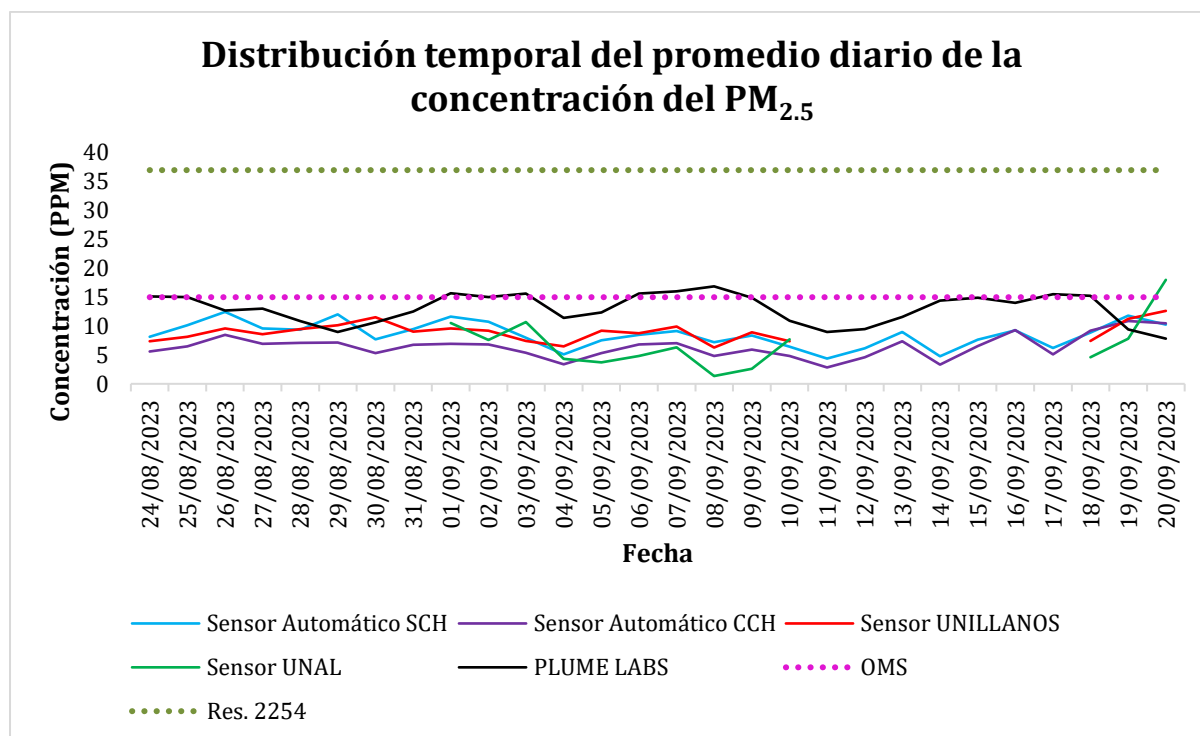
Figura 9. Comparación de los datos obtenidos por el sensor semiautomático de ozono vs los datos de referencia obtenidos del sensor de ozono PLUME LABS.



Como se observa en la figura anterior, para el sensor experimental semiautomático de ozono se denotan claras variaciones más marcadas a comparación de su contraparte de referencia proveniente de PLUME LABS, el cual posee una distribución más uniforme y que nunca excedió valores superiores a 60 PPB, mientras que, el sensor experimental obtuvo

valores en ciertos casos de más del doble obtenidos para la misma fecha por el sensor de referencia.

Figura 10. Distribución temporal del promedio diario del $PM_{2.5}$ entre todos los sensores y los datos de referencia.



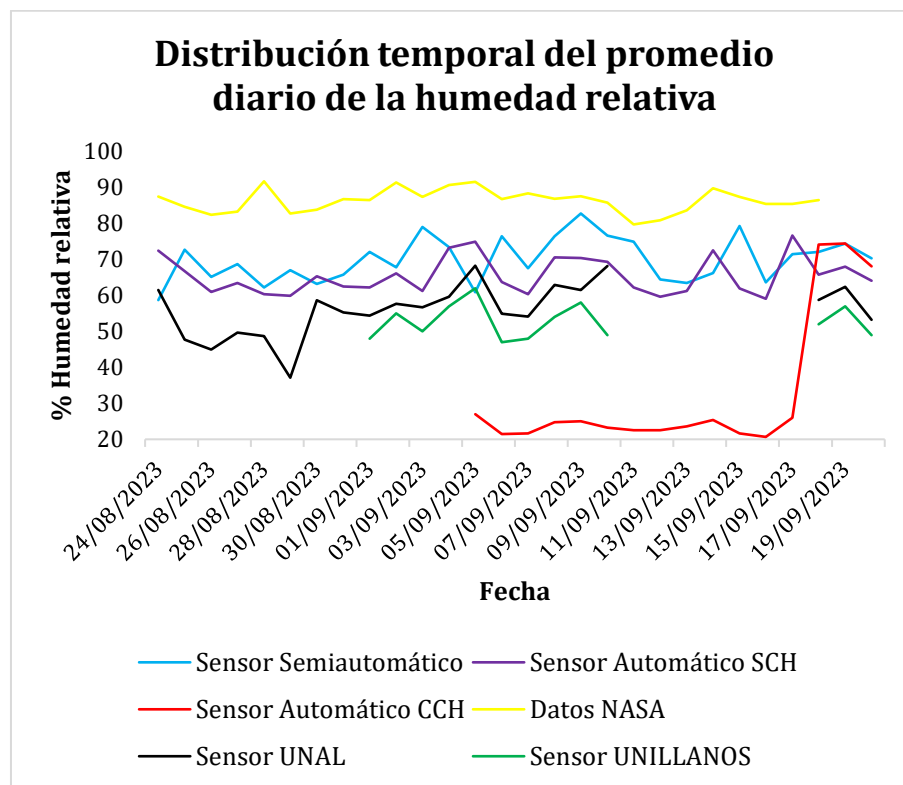
Nota. SCH: Sin corrección de humedad

CCH: Con corrección de humedad

Res. 2254: Resolución 2254 de 2017

Esta gráfica permite identificar una distribución muy similar en su comportamiento entre los sensores experimentales de $PM_{2.5}$, siendo su mayor diferencia en la proporción de cada uno, lo que era algo esperado debido a los antecedentes de influencia de la humedad relativa en el monitoreo de material particulado. Entre otras cosas, la media diaria del sensor de PLUME LABS tiende a ser mayor que todos los demás sensores a diferencia de los últimos días de la investigación que es cuando obtiene los valores más bajos de concentración entre todos los sensores. También en el gráfico se encuentran los valores máximos permisibles de exposición propuestos tanto por la OMS, la cual advierte que no deben ser mayores a $15 \mu g/m^3$ de exposición diaria (OMS, 2022) y, por otra parte, la normatividad vigente en Colombia que dicta que no debe superar los $37 \mu g/m^3$ (Resolución 2254 MADS, 2017); al comparar los valores se obtiene que casi todos los días cumplen con ambos valores máximos.

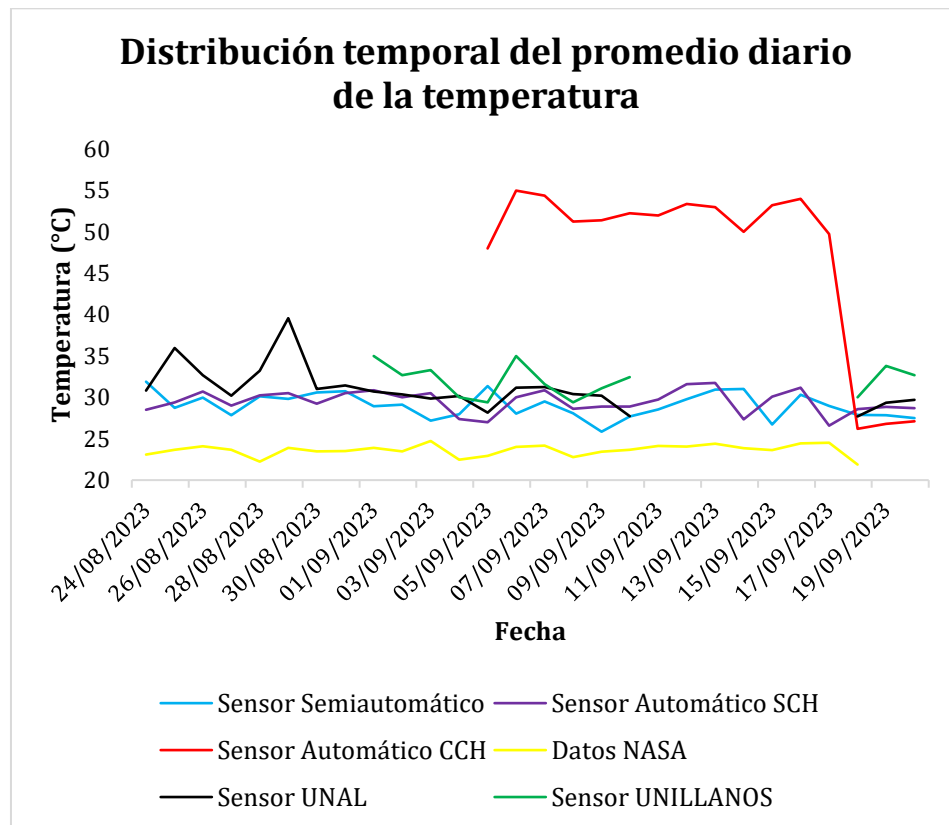
Figura 11. Distribución temporal del promedio diario de la humedad relativa entre de todos los sensores y los datos de referencia.



Nota. SCH: Sin corrección de humedad
CCH: Con corrección de humedad

Se evidencia un comportamiento atípico con respecto al sensor de humedad relativa integrado en el sensor automático de $PM_{2.5}$ con corrección de humedad, teniendo este por lo general una distribución uniforme muy por debajo de la media de los demás datos, pero que de repente durante los últimos días del estudio aumenta sus valores drásticamente y obtiene valores más cercanos a las medias de los demás sensores, esto es debido a que durante estas fechas, la bombilla utilizada para calentar la muestra de aire que ingresaba a los sensores se fundió, provocando entonces que la temperatura de la muestra disminuyera, y por ende, la humedad relativa aumentara. Se observa cierto patrón un tanto similar entre el sensor semiautomático de humedad relativa y el sensor de humedad relativa integrado en el sensor automático de $PM_{2.5}$ sin corrección de humedad teniendo distribuciones parecidas, pero con valores distintos. Los datos obtenidos de la base de datos de la NASA además de tener la distribución más uniforme de todo este grupo de datos, también posee la media más alta de los valores de humedad relativa.

Figura 12. Distribución temporal del promedio diario de la temperatura entre todos los sensores y los datos de referencia.



*Nota. SCH: Sin corrección de humedad
CCH: Con corrección de humedad*

Un comportamiento similar pero inverso al observado en la **figura 11** se percibe en este gráfico, en el que se analiza que la media de temperatura para el sensor de temperatura integrado en el sensor automático de PM_{2.5} con corrección de humedad es la más elevada (y con creces) a comparación de los demás datos de la gráfica, pero de repente, hacia los últimos días tiene una drástica caída en los valores de sus mediciones, lo que fue causado por la falla en la bombilla generando así que las muestras de aire entrarán a temperatura ambiente. De la misma manera también se identifica una distribución con similitudes en ciertas zonas para el sensor de temperatura del sensor automático sin corrección de humedad y el sensor semiautomático de temperatura. También los datos de la NASA se diferencian del resto del grupo, pero esta vez porque su media es la más baja entre el conjunto de datos.

Cabe recalcar que todos los datos mostrados en las gráficas de las figuras anteriores son un promedio diario obtenido del parámetro criterio a estudiar, es decir, durante un lapso de 24 horas se obtuvo el promedio de los valores obtenidos por los sensores, ya fuese temperatura,

humedad relativa, material particulado u ozono; esto con la finalidad de compactar el total de datos y facilitar su análisis y estudio.

6.2. Fase 2: Tipo de pruebas estadísticas según la normalidad del conjunto de datos a estudiar

Como se mencionó durante la metodología, luego de realizar la prueba de normalidad de los múltiples conjuntos de datos de las variables, se procede a implementar una prueba estadística paramétrica o no paramétrica dependiendo de si los datos siguen una distribución normal o no.

Tabla 11. Pruebas de normalidad a todos los conjuntos de datos de la investigación.

Conjunto de datos	Shapiro-Wilk		
	Estadístico	G I	Sig.
Sensor Ozono PL y Sensor Ozono experimental	0,954	28	0,250
	0,904	28	0,014
Sensor PM _{2.5} PL y Sensor PM _{2.5} SCH	0,921	28	0,038
	0,949	28	0,192
Sensor PM _{2.5} UNAL y Sensor PM _{2.5} SCH	0,941	21	0,227
	0,941	21	0,233
Sensor PM _{2.5} UNILLANOS y Sensor PM _{2.5} SCH	0,911	13	0,191
	0,959	13	0,735
Sensor PM _{2.5} PL y Sensor PM _{2.5} CCH	0,921	28	0,038
	0,932	28	0,068
Sensor PM _{2.5} UNAL y Sensor PM _{2.5} CCH	0,941	21	0,227
	0,924	21	0,103
Sensor PM _{2.5} UNILLANOS y Sensor PM _{2.5} CCH	0,911	13	0,191
	0,933	13	0,371
Datos T° NASA y Sensor T° experimental	0,815	26	<0,001
	0,952	26	0,254
Sensor T° UNAL y Sensor T° experimental	0,775	21	<0,001
	0,947	21	0,301
Sensor T° UNILLANOS y Sensor T° experimental	0,923	13	0,276
	0,932	13	0,360
Datos %HR NASA y Sensor %HR experimental	0,962	26	0,428
	0,969	26	0,609
Sensor %HR UNAL y Sensor %HR experimental	0,964	21	0,599
	0,987	21	0,990
Sensor %HR UNILLANOS y Sensor %HR experimental	0,921	13	0,256
	0,979	13	0,976

Nota. PL: PLUME LABS

SCH: Sin corrección de humedad

CCH: Con corrección de humedad

T°: Temperatura

%HR: % de humedad relativa

En la **tabla 11** se conglomeraron todos los datos obtenidos de las pruebas de normalidad realizadas a cada conjunto de datos, dando como resultado el tipo de prueba a realizar para cada uno de estos, los valores con una significancia en color rojo indican que poseen una distribución que no es normal, por tanto, se empleará un método no paramétrico para determinar si se acepta o se rechazan las hipótesis nulas o alternas, el método en este caso para los grupos con dicha característica será la prueba U de Mann-Whitney.

Por otro lado, para aquellos conjuntos que su valor de significancia esté con un color negro, indican que poseen una distribución normal y por lo tanto se aplicará el método de prueba de T de Student para grupos independientes, esto asimismo como lo expresado en el párrafo anterior, para determinar la aceptación o el rechazo de la hipótesis nula.

6.2.1. Pruebas estadísticas por el método U de Mann-Whitney

En la **tabla 12**, se observa un ejemplo de la prueba estadística por el método U de Mann-Whitney la cual es una prueba estadística no paramétrica utilizada en los conjuntos de datos que no tienen una distribución normal.

Tabla 12. Pruebas de Mann-Whitney para todos los conjuntos de datos con una distribución no normal.

Conjunto de datos	U de Mann-Whitney	W de Wilcoxon	Z	Sig. Asintótica (bilateral)
Sensor OZONO PL y Sensor OZONO Experimental	34,000	440,000	-5,87	<0,001
Sensor PM _{2.5} PL y Sensor PM _{2.5} SCH	83,000	489,000	-5,09	<0,001
Sensor PM _{2.5} PL y Sensor PM _{2.5} CCH	19,000	425,000	-6,15	<0,001
Datos T° NASA y Sensor T° Experimental	0,000	351,000	-6,39	<0,001
Sensor T° UNAL y Sensor T° Experimental	160,000	566,000	-2,76	0,006

Tras la obtención de los valores de significancia asintótica de los conjuntos de datos con una distribución no normal, se manifiesta que todos los p-valores son menores que 0.05, rechazando de esta manera la hipótesis nula, por lo que se intuye que las variables implicadas en esta prueba tienen una diferencia significativa entre sus medias y, por ende, en sus valores obtenidos tras los muestreos.

6.2.2. Pruebas estadísticas por el método T de Student para grupos independientes

La **tabla 13** a continuación brinda un ejemplo de una prueba de la prueba estadística T de Student para grupos independientes que es una prueba paramétrica utilizada para conjuntos de datos que sí tienen una distribución normal.

Tabla 13. Pruebas T de Student para grupos independientes para todos los conjuntos de datos con una distribución normal.

Conjunto de datos	Prueba T para igualdad de medias					
	t	gl	P de un factor	P de dos factores	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar
Sensor $PM_{2.5}$ UNAL y Sensor $PM_{2.5}$ SCH	0.559	47	0.289	0.579	0.33333	0.59648
Sensor $PM_{2.5}$ UNILLANOS y Sensor $PM_{2.5}$ SCH	-1.450	39	0.078	0.155	-1.49451	1.03063
Sensor $PM_{2.5}$ UNAL y Sensor $PM_{2.5}$ CCH	4.450	47	<0.001	<0.001	2.47619	0.55650
Sensor $PM_{2.5}$ UNILLANOS y Sensor $PM_{2.5}$ CCH	0.653	39	0.259	0.518	0.64835	0.99353
Sensor T° UNILLANOS y Sensor T° Experimental	3.068	47	0.002	0.004	1.89286	0.61696
Datos NASA %HR y Sensor %HR Experimental	12.280	52	<0.001	<0.001	16.64011	1.35471
Sensor %HR UNAL y Sensor %HR Experimental	-7.050	47	<0.001	<0.001	-13.77381	1.95384
Sensor %HR UNILLANOS y Sensor %HR Experimental	-8.799	39	<0.001	<0.001	-17.0522	1.93798

Con los resultados obtenidos se procede a realizar un filtro dependiendo de si el p -valor > 0.05 , por lo que, tal y como se observa en la **tabla 13**, las p de dos factores que están de color negro y en negrilla se determina que no existe la evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula H_0 : “No existe una diferencia estadísticamente significativa entre la concentración medida y el tipo de sensor utilizado”, cabe recalcar que esto no significa que sea cierta, simplemente estadísticamente hablando es más probable de que sea correcta, lo mismo ocurre con los casos en los que su significancia están de color rojo, los cuales sí rechazan la hipótesis nula pero como bien se mencionó hace un momento, esto no significa que no pueda ser cierta.

6.2.3. Análisis de los resultados de las pruebas estadísticas realizadas a todos los parámetros

Dentro de todos los resultados obtenidos, destaca el hecho de que el material particulado medido por el sensor experimental automático sin corrección de humedad tiene una similitud significativa en comparación con los sensores de referencia de UNILLANOS y de UNAL; mientras que por otro lado, el sensor experimental automático con corrección de humedad posee también una similitud estadística pero sólo con el sensor de referencia de UNILLANOS siendo este el único parámetro de toda la investigación que cumple dicho criterio, para todos los demás sensores y datos de referencia se percibe que estos se inclinan hacia la hipótesis alterna dictando que, H_1 : “existe una diferencia estadísticamente significativa entre la concentración medida y el tipo de sensor utilizado”.

De tal manera se concluye que, la mayoría de datos obtenidos tras la investigación tienen una diferencia significativa entre los datos experimentales a comparación de los datos de referencia de otros sensores de monitoreo, por tanto, se procederá a determinar los R^2 de los grupos de datos para verificar mediante el método de regresión lineal la similitud por parte de estos.

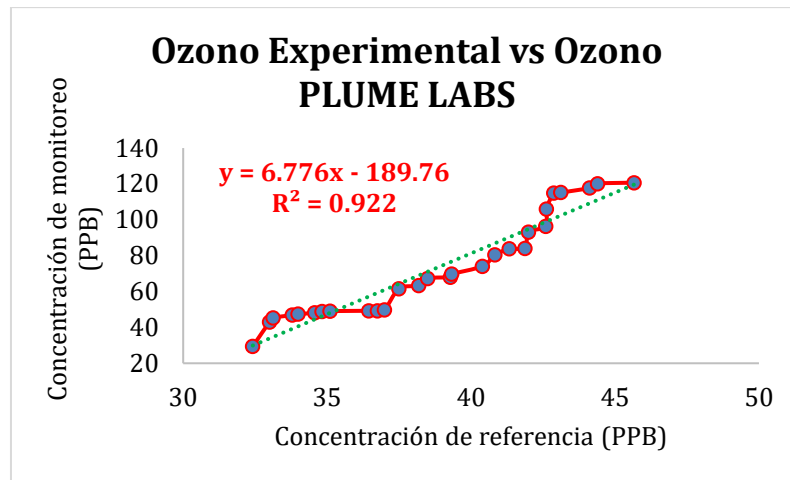
Fase 3: Determinación de los R^2 entre los datos obtenidos por los sensores de bajo costo en comparación con otros sensores para el monitoreo de calidad del aire

Como se mencionó en la fase previa, se determinó el R^2 del conjunto de datos mediante la aplicación de regresión lineal, esto con el objetivo de conocer la relación lineal que hay entre cada uno de los parámetros medidos experimentalmente con los sensores de bajo costo diseñados en este proyecto, comparados con los datos obtenidos por los valores de referencia (sensores o bases de datos) obtenidos de información secundaria.

6.3.1. Regresiones lineales para los datos de contaminantes atmosféricos

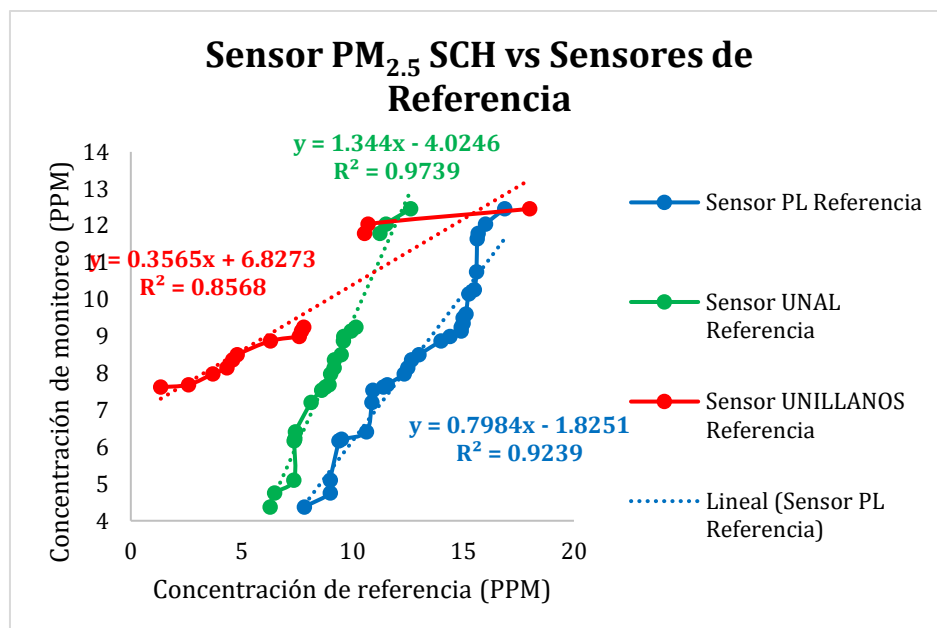
Mediante el uso de las regresiones lineales se obtienen los coeficientes de determinación los cuales dictan la relación lineal que tienen dos variables, es decir, sirven para contemplar las tendencias de los datos y, por lo tanto, si un grupo de datos tienen tendencias similares se entiende entonces que, estadísticamente hablando, son significativamente parecidos.

Figura 13. Regresión lineal entre el sensor de ozono experimental vs el sensor de ozono de PLUME LABS.



Pese al resultado obtenido en la prueba estadística de Mann-Whitney se encontró que el coeficiente de determinación entre el sensor de ozono experimental usado en el proyecto y el sensor ozono de PLUME LABS es de $R^2 = 0.922$, dando a entender que, aunque no es totalmente apegado a los datos de referencia sí se obtienen unos rangos bastante aproximados.

Figura 14. Regresión lineal entre el sensor de PM_{2.5} experimental sin corrección de humedad vs todos los sensores de referencia.



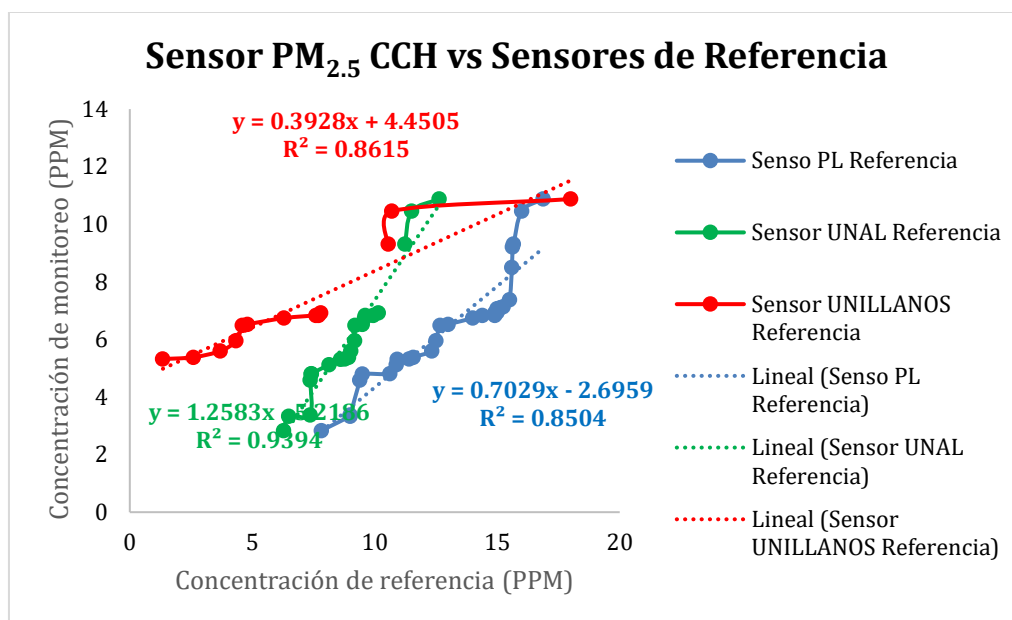
Nota. SCH: Sin corrección de humedad.

Con un $R^2 = 0.924$ se determina que el sensor de $PM_{2.5}$ sin corrección de humedad en comparación con el sensor de referencia de $PM_{2.5}$ de PLUME LABS realiza monitoreos con un nivel de aproximación cercano.

Durante la prueba estadística de T de Student ya se había dado a entender que este conjunto de datos era significativamente similar estadísticamente hablando y tras llevar a cabo esta regresión lineal se obtiene un $R^2 = 0.974$ el cual es el más grande de toda la investigación y que nos da a entender que las mediciones producidas por el sensor de $PM_{2.5}$ sin corrección de humedad son muy cercanas a las del sensor de referencia de $PM_{2.5}$ de la Universidad Nacional.

Aunque en la prueba T de Student se había definido que los datos eran similares, al efectuar la regresión lineal da como resultado un coeficiente de determinación de tan solo $R^2 = 0.857$, esto puede ser debido quizás, al dato atípico del último día de monitoreo del sensor de referencia de $PM_{2.5}$ de UNILLANOS.

Figura 15. Regresión lineal entre el sensor de $PM_{2.5}$ experimental con corrección de humedad vs todos los sensores de referencia.



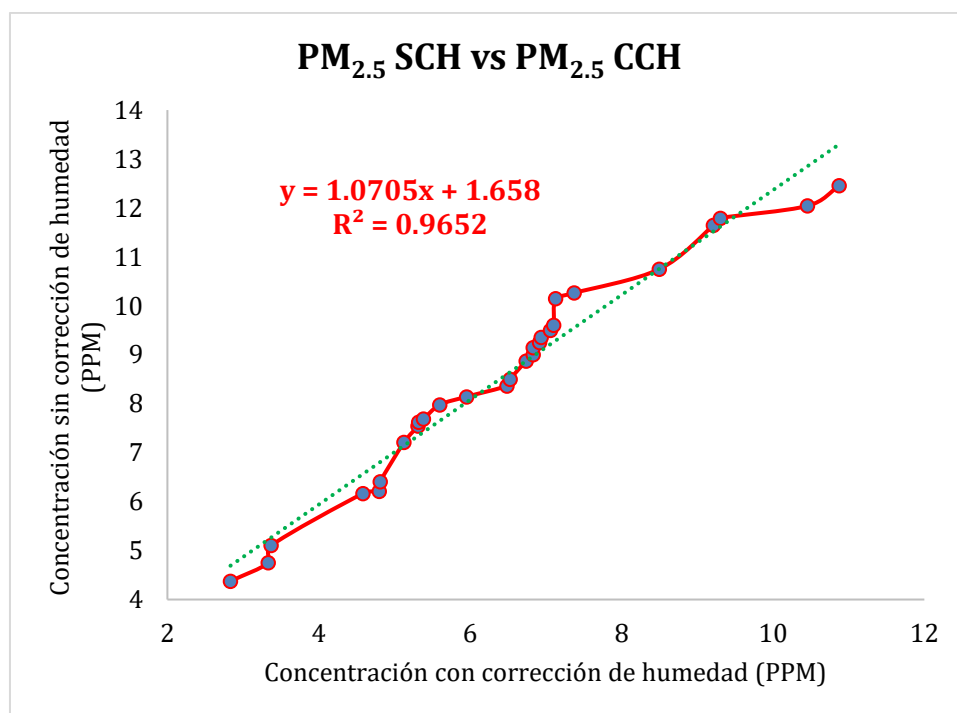
Nota. CCH: Con corrección de humedad.

Durante la prueba de Mann-Whitney se definió que habría una diferencia significativa entre el sensor experimental y el de referencia de PLUME LABS y al ejercer esta regresión lineal da como resultado un $R^2 = 0.8504$ que pese a que no es un valor tan bueno aún sigue siendo bastante decente para un sensor de bajo costo.

Luego de la prueba T de Student se definió que entre el sensor experimental y el de referencia de UNAL sí habría una similitud significativa, con lo que, con un valor de coeficiente de determinación de 0.9394 se intuye que sí son valores significativos.

Aunque durante la prueba estadística ejecutada al sensor experimental con el de referencia de la UNILLANOS se definió que habría una similitud, nos encontramos con un valor de $R^2=0.8615$, el cual está un poco alejado de lo ideal, esto quizás se deba al valor atípico del último día de muestreo del sensor de UNILLANOS, generando que la tendencia variara.

Figura 16. Regresión lineal entre el sensor de $PM_{2.5}$ experimental sin corrección de humedad vs el sensor de $PM_{2.5}$ experimental con corrección de humedad.



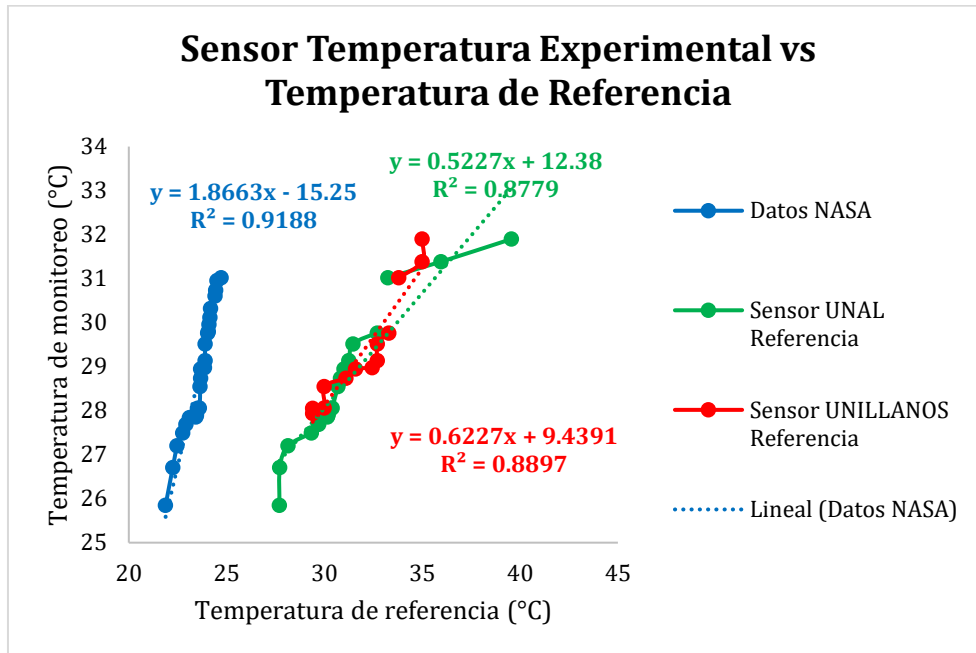
Nota. SCH: Sin corrección de humedad

CCH: Con corrección de humedad

Para este caso se decide el analizar los dos sensores experimentales entre sí sin previamente realizar una prueba estadística para determinar si los datos tendrían una semejanza significativa, pero como se observa al hallar el coeficiente de determinación con un valor de $R^2=0.9652$ se denota que, ambos sensores tienen un nivel de similitud en los datos obtenidos bastante elevada.

6.3.2. Regresiones lineales para los datos meteorológicos

Figura 17. Regresión lineal entre el sensor de temperatura experimental vs todos los datos de temperatura de referencia.

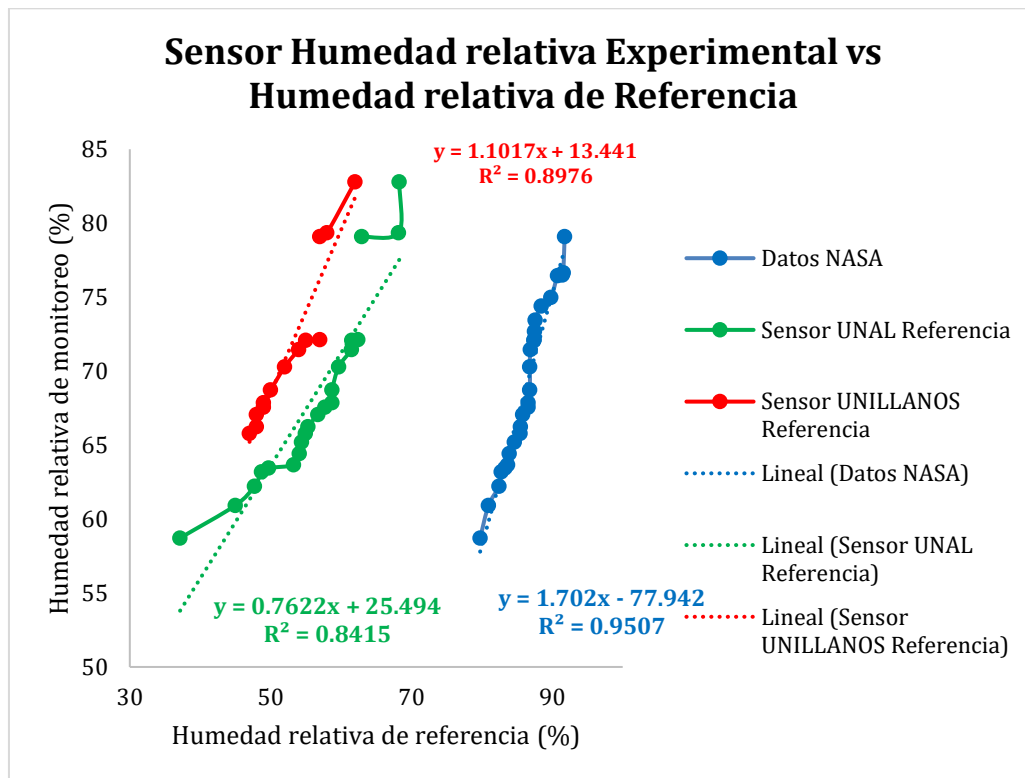


Pese a que se esperaba desde la prueba de Mann-Whitney realizada a estos datos una diferencia significativa entre los mismos, al saber que $R^2=0.919$ da a entender que hay un buen nivel de confianza entre los datos obtenidos por el sensor experimental en comparación con aquellos de referencia por parte de la NASA.

A pesar que se esperaba una diferencia entre los datos del sensor experimental y los datos de referencia de la UNAL el coeficiente de determinación $R^2=0.878$ es un valor bastante decente tomando en consideración que son sensores de bajo costo pero que aun así brindan datos muy decentes en comparación con los datos de referencia.

Al igual que en el caso anterior un $R^2=0.890$ para el sensor experimental pese a no ser tan exacto es un estimativo bastante útil en referencia a los datos obtenidos por parte del sensor de UNILLANOS.

Figura 18. Regresión lineal entre el sensor de humedad relativa experimental vs todos los datos de humedad relativa de referencia.



Con un resultado de $R^2=0.9507$ se considera un dato bastante preciso, brindando así una buena fiabilidad en los datos obtenidos por el sensor experimental en comparación con los datos de referencia de la NASA.

Este coeficiente de determinación es el más bajo de todas las regresiones lineales realizadas para los múltiples conjuntos de datos, con un valor de $R^2=0.8415$ y aun así representa un nivel de fiabilidad bastante decente, dando estimativos con un grado alto de semejanza a las mediciones de datos de referencia de la UNAL.

Esta última regresión lineal vuelve a ser bastante aceptable con un valor de $R^2=0.8976$ denotando que los datos obtenidos por el sensor experimental sí tienen cierto grado de representación en torno a los datos de referencia de la UNILLANOS.

Por lo general, la mayoría de los sensores tienen coeficientes de determinación bastante aceptables, brindando así un estimativo muy cercano al obtenido por los sensores y datos usados como referencia durante la investigación.

6.3.3. Corrección de humedad en los sensores experimentales

Como se ha mencionado en el documento, se utilizaron dos sensores distintos para el monitoreo del PM_{2.5}, ambos son muy similares en sus componentes pero con la ligera diferencia de que uno de estos tiene un mecanismo de corrección de humedad relativa, el cual consiste en que, con la ayuda de un bombillo calentar el aire que ingresa al sensor para de esta forma disminuir lo máximo la humedad en dicha muestra, ya que, como se ha demostrado bibliográficamente el porcentaje de humedad relativa en una muestra de aire afecta el resultado de la medición de la concentración del material particulado (Rojano et al., 2012).

Por lo tanto, a continuación, en la **tabla 14** se determinará qué tanto reduce la concentración de material particulado el calentar el aire de la muestra para así realizar una corrección de humedad generando así que sea más precisa la medición de los sensores.

La ecuación utilizada es la siguiente:

$$Dp = \frac{(Vf - Vi)}{Vi} * 100\%$$

Donde,

Dp: Diferencia porcentual

Vf: Valor final

Vi: Valor inicial

Tabla 14. Diferencia de concentración entre sensor de PM_{2.5} sin corrección de humedad y el sensor de PM_{2.5} con corrección de humedad.

Fecha	PPM sin corrección de humedad	PPM con corrección de humedad	Diferencia porcentual de la concentración.
24/08/2023	8.1	5.6	-31.2%
25/08/2023	10.1	6.5	-36.1%
26/08/2023	12.5	8.5	-31.8%
27/08/2023	9.6	6.9	-27.8%
28/08/2023	9.4	7.1	-24.1%
29/08/2023	12.0	7.1	-40.8%
30/08/2023	7.7	5.3	-30.9%
31/08/2023	9.5	6.7	-29.0%
01/09/2023	11.6	6.9	-40.6%
02/09/2023	10.8	6.8	-36.4%
03/09/2023	8.0	5.4	-32.6%
04/09/2023	5.1	3.4	-34.0%
05/09/2023	7.5	5.3	-29.5%
06/09/2023	8.5	6.8	-19.6%
07/09/2023	9.1	7.1	-22.8%
08/09/2023	7.2	4.8	-33.4%
09/09/2023	8.4	6.0	-28.8%

Tabla 14. *Continuación*

10/09/2023	6.4	4.8	-24.9%
11/09/2023	4.4	2.8	-35.2%
12/09/2023	6.2	4.6	-25.7%
13/09/2023	9.0	7.4	-18.1%
14/09/2023	4.8	3.3	-29.8%
15/09/2023	7.6	6.5	-14.4%
16/09/2023	9.3	9.3	0.6%
17/09/2023	6.2	5.1	-17.4%
18/09/2023	8.9	9.2	3.8%
19/09/2023	11.8	10.9	-7.8%
20/09/2023	10.3	10.5	1.9%
PROMEDIO			-24.9%

Como se evidencia en la tabla anterior al efectuar una corrección de humedad en el sensor de material particulado, en promedio la concentración del PM_{2.5} se reduce en un 25% dando a entender que como ya se mencionó, la humedad relativa genera cierto margen de incertidumbre en los monitoreos de este contaminante.

6.3.4. Consideraciones finales respecto al análisis de los datos de la investigación

Los datos obtenidos para las variables de velocidad y dirección del viento no fueron tomadas en cuenta para el análisis, esto debido a que los resultados obtenidos no fueron representativos, ya que, las condiciones operacionales que tenían estos dos sensores semiautomáticos se veían alteradas porque estaban bajo techo y rodeados de paredes que impedían un flujo sin restricción del viento (como se observa en la **figura 19**), generando así que los datos no fueran fieles a la realidad.

Esto sucedió porque para el funcionamiento de los sensores y evitar su posible daño en los componentes debido a la lluvia era menester la ubicación en dicha zona, pero al revisar el groso de datos obtenidos tras realizados los monitoreos se encontró que en el caso del sensor de velocidad del viento, el valor máximo fue de 0,440 m/s pero por lo general la gran mayoría de datos (más del 95%) eran valores muy cercanos al 0, lo cual supondría un análisis equivocado de las condiciones climáticas reales; mientras que por su parte, para la dirección del viento, tras analizar los datos obtenidos por el sensor semiautomático y comparar con los datos de referencia se evidenció una diferencia en el valor estimado de aproximadamente 150°, lo cual, como se mencionó previamente, daría un análisis demasiado erróneo de la realidad.

Figura 19. Localización de los sensores bajo techo.



7. Impacto social y humanístico del proyecto

El uso de sensores de bajo costo los cuales no requieren un constante mantenimiento ni revisión de los componentes como a su vez la gran versatilidad y facilidad de uso y transporte de estos, proporciona a futuro una gran herramienta para el monitoreo constante de la calidad del aire tanto de sectores urbanos como rurales, principalmente en sitios donde los monitoreos son casi nulos o inexistentes dando al usuario valores aproximados para tomar medidas de mitigación contribuyendo a la salud ambiental.

Podría brindar una herramienta dentro del plan decenal de salud pública, más directamente hacia los Consejos Territoriales de Salud Ambiental (COTSA) los cuales responden directamente a las necesidades y problemáticas sanitarias y ambientales de un territorio, generando pautas, procedimientos y estrategias en aras de consolidar la prevención, mitigación y cuidado de la salud pública entre las entidades gubernamentales y los territorios.

Se reduciría en una gran proporción la ausencia de datos por parte de los entes gubernamentales, que no desarrollan su trabajo de manera constante en cuanto al análisis y publicación de los índices de calidad del aire en tiempo real, generando así afectaciones en la salud pública y el aumento del deterioro ambiental.

Promovería el estudio de la calidad del aire, para de esta forma generar estrategias en cuanto a la mitigación y prevención de los posibles impactos generados por fuentes emisoras de contaminantes atmosféricos, como también se obtendría un beneficio económico en cuanto a la implementación de estas redes de monitoreo en comparación con las estaciones tradicionales, que cuentan con unos costos cientos de veces más elevados que estos sensores.

Además del obvio beneficio económico en cuanto al costo por unidad de los sensores, está el beneficio económico en torno a la reducción de los gastos hacia la salud pública, ya que, al implementar monitoreos más constantes se reducirían los casos de enfermedades respiratorias y por ende se tendría un menor gasto estatal en las enfermedades de esta índole, un claro gran referente de esto es el sistema del SIATA, ubicado en el área del Valle de Aburrá, el cual como sus siglas lo mencionan es un sistema de alerta temprana en el cual se monitorea constantemente variables asociadas a la calidad del aire con el objetivo de alertar a la población de esta región para el cuidado de las posibles afectaciones derivadas de altos niveles de concentración de múltiples contaminantes, evitando así repercusiones graves en la salud y el deterioro ambiental.

8. Discusión de resultados

Los tipos de sensores utilizados se fundamentan bajo las condiciones específicas de la ciudad de Villavicencio, esto debido a que los parámetros medidos durante la investigación son los datos generalmente monitoreados en la ciudad a los cuales se tiene acceso libre a la información, de tal forma se esperaba una investigación más orgánica y de la cual se obtuviesen valores y estimativos significativos para la implementación de nuevas herramientas en función del monitoreo de la calidad del aire de la ciudad.

El grosor total de datos como la frecuencia de medidas fue designado para tener una perspectiva más completa en el comportamiento tanto de los contaminantes atmosféricos como de igual forma las variables meteorológicas, esto brinda una manera más simple de detectar comportamientos más atípicos en los monitoreos y de igual forma, verificar si son generados por alguna falla en los sensores para de esta forma corregir los errores lo antes posible y evitar la incertidumbre en los datos obtenidos.

Empleando la herramienta Excel se obtuvieron los análisis estadísticos simples para los conjuntos de datos, como lo fueron los coeficientes de correlación entre los datos medidos por cada sensor automático comparados entre sí, y los datos de los sensores semiautomáticos comparados entre sí; de igual forma se llevó a cabo la estadística descriptiva de cada parámetro medido por cada sensor para observar y analizar las características específicas de cada conjunto de información para cada variable.

Por medio del programa IBM SPSS Statistics se hicieron las pruebas de normalidad para los grupos de datos como también las pruebas no paramétricas de U de Mann-Whitney para los conjuntos de datos con una distribución no normal y la T de Student para grupos independientes para aquellos conjuntos que sí tuviesen una distribución normal, esto con la finalidad de determinar la aceptación o el rechazo de la hipótesis nula H_0 : “No existe una diferencia estadísticamente significativa entre la concentración y el tipo de sensor” la cual sólo se cumplió con los datos de los sensores de material particulado en comparación con los sensores de UNAL y de UNILLANOS, para el caso de los datos de referencia de PLUME LABS para ambos tipos de sensor de $PM_{2.5}$ (con corrección y sin corrección de humedad) dio como resultado el rechazo de la hipótesis nula y por ende la aceptación de la alterna, la cual se basaba en que sí existía una diferencia significativa entre la concentración y el tipo de sensor.

Mediante un análisis de diferencia porcentual se determinó que los niveles de concentración para $PM_{2.5}$ se redujeron hasta en un 25% al emplear una corrección de humedad,

la cual consistía en calentar la muestra de aire que ingresaba al sensor SPS30 utilizando una bombilla eléctrica.

Los resultados obtenidos en las regresiones lineales dan una visualización bastante optimista en el empleo de los sensores de bajo costo para el monitoreo de parámetros asociados a la calidad del aire, ya que, al hallar el coeficiente de determinación (R^2) se obtuvieron valores en un rango de $R^2=0.8415-0.974$, brindando un elevado margen de fiabilidad en un modelo lineal cuyas estimaciones se ajustan de forma bastante cercana a la variable obtenida por los sensores usados como referencia y todo esto sin la realización de un método de calibración, lo cual podría incrementar aún más los valores del R^2 .

Conclusiones

Basándose en la normativa legal vigente de la calidad del aire en Colombia, es posible afirmar que la ciudad de Villavicencio actualmente posee una buena calidad del aire, ya que, los contaminantes criterios monitoreados en la ciudad y sus alrededores no exceden los límites máximos permisibles, que para este caso específico para el $PM_{2.5}$ era de $37 \mu g/m^3$ para una exposición de 24 horas y el ozono de $100 \mu g/m^3$ para una exposición de 8 horas.

Pese a que el panorama general de la calidad del aire es óptimo para la ciudad de Villavicencio, se debe enfatizar que existen puntos críticos que pueden estar siendo afectados por el desarrollo de actividades económicas o de interés social (construcciones y desarrollo de proyectos públicos) al incrementar las emisiones de múltiples contaminantes, generando así un deterioro considerable en los índices de calidad del aire, los cuales pueden devenir tanto en impactos ambientales como en afectaciones a la salud pública, durante los monitoreos y más específicamente en la **tabla 6** de la estadística descriptiva para el monitoreo del sensor automático sin corrección de humedad, se encontró un pico máximo de $39 \mu g/m^3$ para $PM_{2.5}$, dando un ejemplo de que pese a que de manera general la calidad del aire es buena, existen casos atípicos.

Aunque no son valores iguales en su totalidad a los datos de referencia que puedan existir sobre los contaminantes o las variables meteorológicas, los sensores de bajo costo brindan una gran herramienta en la estimación de estos datos, ya que, como se observó durante el desarrollo de la investigación se obtuvieron R^2 desde 0.8415 hasta 0.974, y esto tomando en cuenta que no se realizó ningún tipo de calibración de datos, los cuales podrían incrementar aún más los valores obtenidos para los coeficientes de determinación, generando así que los datos tengan un mayor grado de semejanza con las variables de referencia.

Las variables meteorológicas de temperatura y humedad relativa son casi inversamente proporcionales, ya que, como se observó durante los monitoreos por parte de los sensores de bajo costo se obtuvieron correlaciones desde -0.954 hasta -0.98, lo que causa que al percibir un aumento de la temperatura la humedad relativa disminuya y esta misma lógica se obtenía al que cuando se reducía la temperatura el valor de la humedad relativa aumentaba.

Las concentraciones de contaminantes en las bases de datos por lo general obtenían los niveles más altos en ciertas horas específicas, principalmente estas horas se veían asociadas con una mayor actividad de fuentes móviles, siendo las horas que más destacaban en los niveles de concentración en un rango de 6am-8am, 10am-2 pm y de 6pm-8pm; que son horarios en los

que generalmente existe gran movilización de transportes debido a que coinciden con inicios y fines de jornadas laborales o de estudio.

La implementación de la corrección de humedad en los sensores que monitorean el material particulado es una gran opción de calibración indirecta de los datos obtenidos, porque como ya se explicó en el documento, existe una correlación entre la humedad relativa y el nivel de concentración de este contaminante y al ejecutar la corrección se redujo en promedio un 25% la concentración para el material particulado, generando así que los datos obtenidos en teoría, fuesen más fieles a la realidad.

La fiabilidad en los datos obtenidos por los dos sensores automáticos de material particulado es representada con un valor de $R^2=0.9652$, lo que da un buen indicio en el funcionamiento de los dos sensores con un monitoreo de características similares en torno a la precisión y exactitud, a tal punto de que sólo llegan a variar debido a la intervención de la corrección de humedad generada en uno de los dos sensores.

Al analizar la normatividad vigente actual en Colombia, más concretamente hacia la resolución 2254 de 2017, se evidencia un desfase en torno al contaminante criterio de ozono, ya que, a nivel global y más específicamente hacia la EPA los valores máximos permisibles para este contaminante se miden en la unidad de PPB mientras que, para Colombia se mide en PPM lo cual genera una diferencia en proporción de 1000 a 1, generando entonces que la ley sea demasiado permisiva con este contaminante.

Recomendaciones

Se sugiere llevar a cabo un método de calibración para los datos obtenidos de los muestreos efectuados con los sensores de bajo costo, pese a que en algunos casos los R^2 daban valores bastante cercanos a 1, este nivel de semejanza se puede incrementar al implementar algún tipo de método de calibración, generando así que los datos sean mucho más representativos a los datos reales.

Para estudios futuros es importante disponer de una fuente de datos validada con un monitoreo constante en tiempo real, para de esta forma evitar retrasos en el desarrollo de la investigación como también la incertidumbre en los datos obtenidos a la hora de compararlos.

Se recomienda hacer un análisis estadístico en comparación con las estaciones del sistema de vigilancia de la calidad del aire de la ciudad una vez que estas entren en funcionamiento y haya disponibilidad de datos, ya que, durante la temporalidad de la realización de la investigación, todas las estaciones de la ciudad llevaban deshabilitadas desde hace más de 5 meses.

Se recomienda la modificación de los sensores para tornarlos impermeables y de esta forma poder efectuar monitoreos a cielo abierto, dando como resultado que no habrá interferencias en cuanto al monitoreo principalmente de las variables asociadas al viento.

Llevar a cabo un estudio complementario, en el cual se evalúen otros contaminantes criterios dispuestos en la resolución 2254 de 2017, como también con otras versiones de sensores para los parámetros ya estudiados y determinar los más precisos para cada tipo de variable.

Crear un software para el cargue de datos de manera automática y en tiempo real para todas y cada una de las variables medidas por los sensores, esto con la finalidad de optimizar el procesamiento de datos y facilitar su estudio y utilización.

Referencias

- Aránguez, E., Ordóñez, J., Serrano, J., Aragonés, N., Fernández, R., Gandarillas, A & Galán I. (1999). Contaminantes atmosféricos y su vigilancia. *Esp Salud Pública*, 73, 123-132. https://scielo.isciii.es/pdf/resp/v73n2/contam_atmos.pdf
- Arbeláez, C. G. (2016). El acuerdo de París, así actuará Colombia frente al cambio climático. WWF-Colombia. <https://www.wwf.org.co/?266971/Colombia%2Dfrente%2Dal%2Dcambio%2Dclimatico>
- Ariza, N. (2019). Análisis y comparación de sensores ópticos de polvo de bajo costo utilizando el internet de las cosas. [Tesis de pregrado, Universidad Industrial de Santander]. Repositorio. <https://noesis.uis.edu.co/server/api/core/bitstreams/12a027d3-21ca-416c-a900-4842667bb8da/content>
- Bonilla, C., Sánchez, A., Rubio, Y & Corez, M. (2023). Niveles de concentración por PM_{2.5} mediante sensores de bajo costo. Caso de estudio: Pamplona, Colombia. *Revista UIS Ingenierías*, 22(3), 29-38. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n3-2023003>
- Campos, P., Esteves, A., Leitão, A & Pires, J. (2021). Design of air quality monitoring network Luanda, Angola: Urban air pollution assessment. *Atmospheric Pollution Research*, 12(8), 101128. https://www.researchgate.net/publication/353035146_Design_of_air_quality_monitoring_network_of_Luanda_Angola_Urban_air_pollution_assessment
- Carazo, L., Fernández, R., González, F & Rodríguez, J. (2013). Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria. Indoor Air Contaminants and their Impact on Respiratory Pathologies. *Archivos de Bronconeumología*, 1(49), 22-27. <https://www.archbronconeumol.org/es-contaminacion-del-aire-interior-su-articulo-S0300289612001196>
- Centurión, J. & Fababa, E. (2020). Análisis de la concentración de Material Particulado 2.5 y Gases de Efecto Invernadero de Lima Metropolitana antes y durante la cuarentena por SARS-COV-2. [Trabajo de grado, Universidad Peruana Unión]. Repositorio. https://repositorio.upeu.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12840/3268/Julia_Trabajo_Bachillerato_2020.pdf?sequence=5&isAllowed=y

- Chojer, H., Branco, P., Martins, F., Alvim, M & Sousa, S. (2022). Can data reliability of low-cost sensor devices for indoor air particulate matter monitoring be improved? – An approach using machine learning. *Atmospheric Environment*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119251>
- Choque, N. & Hanco E. (2018). Aplicación de actividades de expresión oral para desarrollar el pensamiento divergente en niños y niñas de 5 años de la IEI n°294 Aziruni de la ciudad de Puno. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano – Puno]. Repositorio. <https://vriunap.pe/repositor/docs/d00002866-Borr.pdf>
- Coker, E., Buralli, R., Manrique, A., Makoto, C., Kofi, A & Gouveia, N. (2022). Environmental Research: Association between PM2.5 and respiratory hospitalization in Rio Branco, Brazil: Demonstrating the potential of low-cost air quality sensor for epidemiologic research. *Environmental Research*, 1(214). <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.113738>
- Duarte, I. (2018). Análisis de las emisiones atmosféricas generadas por los vehículos de uso público en función de su antigüedad para el municipio de Villavicencio-Meta. [Trabajo de grado, Universidad Santo Tomás]. Repositorio. <http://repository.usta.edu.co/handle/11634/12085>
- Dubey, R., Kumar, A., Joshi, J., Blankenberg, D., Rao, S., Madhu, B & Raval, S. (2022). Evaluation of low-cost particulate matter sensors OPC N2 and PM Nova for aerosol monitoring. *Atmospheric Pollution Research*, 3(13). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101335>
- Ferrer, P., Barcelo, J & Garcia, J. (2022). Data reconstruction applications for IoT air pollution sensor networks using graph signal processing. *Journal of Network and Computer Applications*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2022.103434>
- Gené, E. (2011). Introducción a la electronica digital. Universitat Oberta de Catalunya. <http://hdl.handle.net/10609/54943>
- He, J., Hsuan, C., Yuan, N., Austin, E., Seto, E & Novosselov, I. (2022). Network of low-cost air quality sensors for monitoring indoor, outdoor, and personal PM2.5 exposure in Seattle during the 2020 wildfire season. *Atmospheric Environment*, 285. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2022.119244>
- Hernández, L. (2013). Fundamentos de la programación. Facultad informática Universidad Complutense. <http://www.fdi.ucm.es/profesor/luis/Fp/FP.pdf>

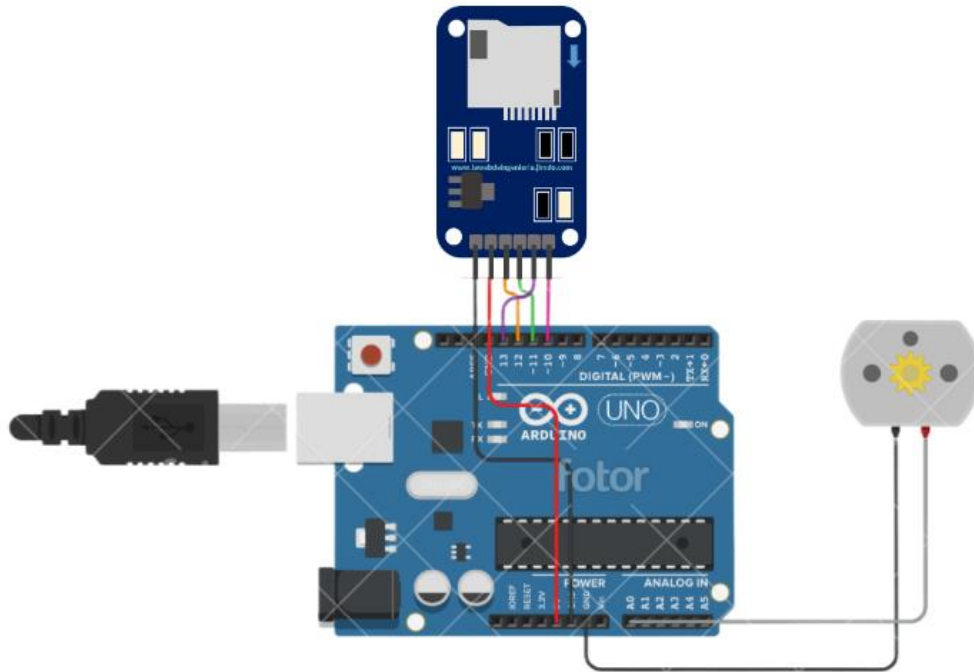
- Kortoçi, P., Hossein, N., Arbayani, M., Lun, P., Varjonen, S., Rebeiro, A., Niemi, J., Nurmi, P., Hussein, T., Petäjä, T., Kulmala, M & Tarkoma, S. (2022). Air pollution exposure monitoring using portable low-cost air quality sensors. *Smart Health*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.smhl.2021.100241>
- Maloy, G. (2020). ¿Qué es un sensor y qué hace? DEWEsoft. <https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-sensor>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). (2010). Manual de Diseño de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/Protocolo_Calidad_del_Aire_-_Manual_Disenio.pdf
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2022). Calidad del aire ambiente (exterior). Who int. [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)
- Ordóñez, G. (2000). Salud ambiental: conceptos y actividades. *Public Health*, 7(3). <https://www.scielo.org/pdf/rpsp/v7n3/1404.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2017). Resolución 2254 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, de 1 de noviembre de 2017. Minambiente.gov.co. <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-2254-de-2017/>
- Ríos, J., Olaya, Y & Nieves, D. (2021). Calibration of Low-Cost Sensor for Particulate Matter in an urban área of the Aburrá Valley. Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud Pública (CASAP). 1-4. 10.1109/CASAP54985.2021.9703400
- Roca, B., Beltrán, M & Gómez R. (2019). Cambio climático y salud. *Revista clínica española*, 5(219), 260-265. <https://doi.org/10.1016/j.rce.2019.01.004>
- Rojano, R., Pérez, J & Freyle, E. (2012). Efecto de la humedad relativa en la determinación de PM10 utilizando un DataRam 4, en una zona costera de Colombia. *Scielo*, 35(2), 204-212. <http://ve.scielo.org/pdf/rtfiuz/v35n2/art10.pdf>
- Sunyer, J & Rivas, I. (2022). Air pollution and health 20 years later. *Medicina Clínica*, 159, 334-335. 10.1016/j.medcli.2022.04.006

- Tryner, J., Phillips, M., Quinn, C., Neymark, G., Wilson, A., Jathar, S., Carter, E & Volckens, J. (2022). Design and testing of a low-cost sensor and sampling platform for indoor air quality. *Building and Environment*, 206. 10.1016/j.buildenv.2021.108398
- Zheng, H., Krishnan, V., Walker, S., Loomans, M & Zeiler, W. (2022). Laboratory evaluation of low-cost air quality monitors and single sensors for monitoring typical indoor emission events in Dutch daycare centers. *Environment International*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107372>

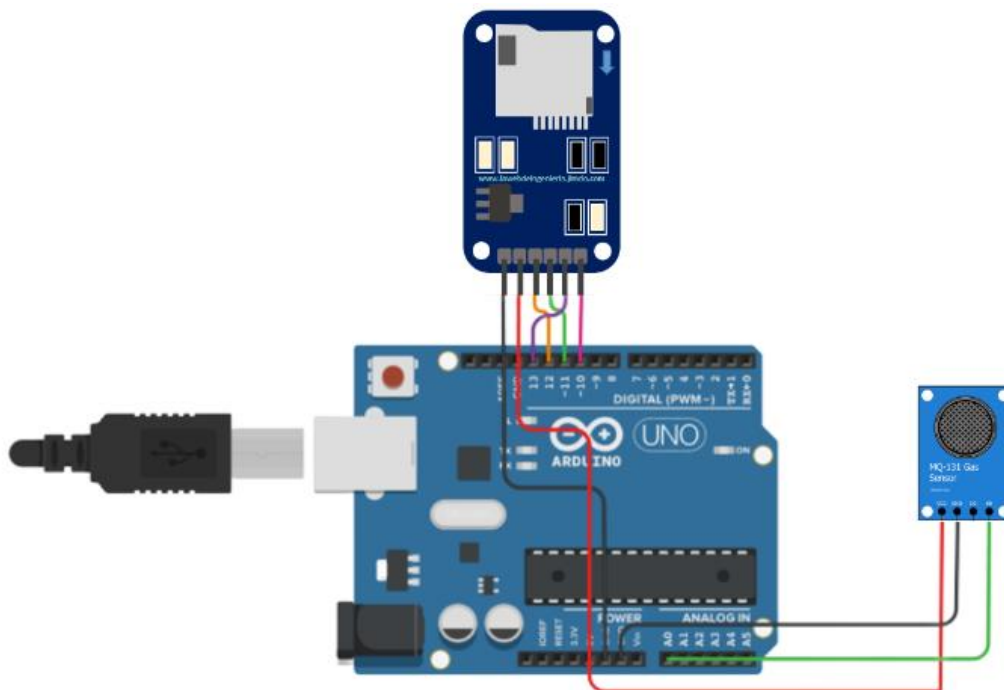
Anexos

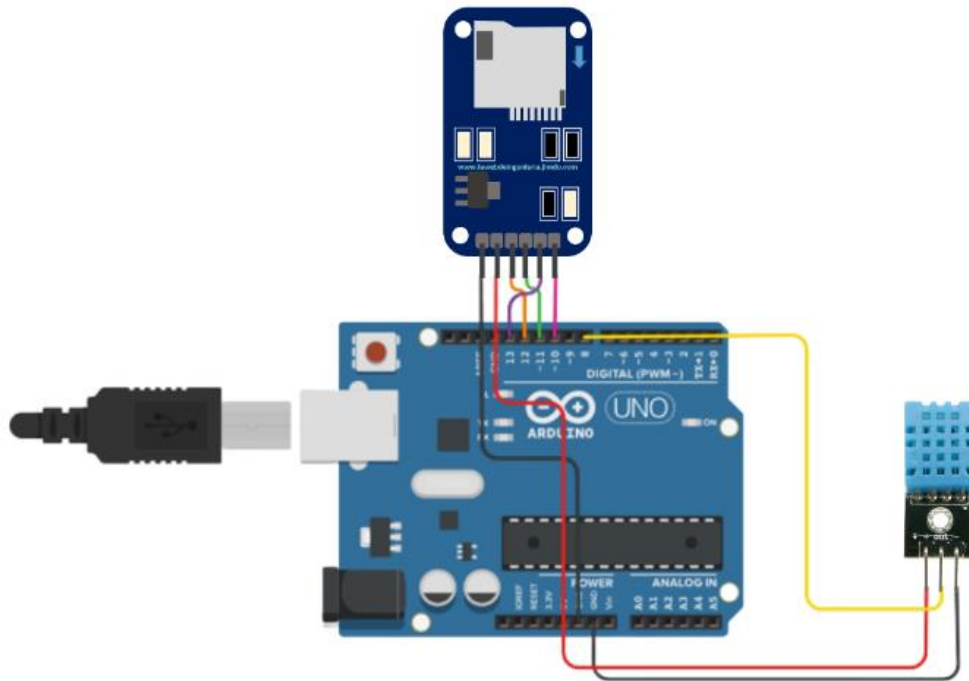
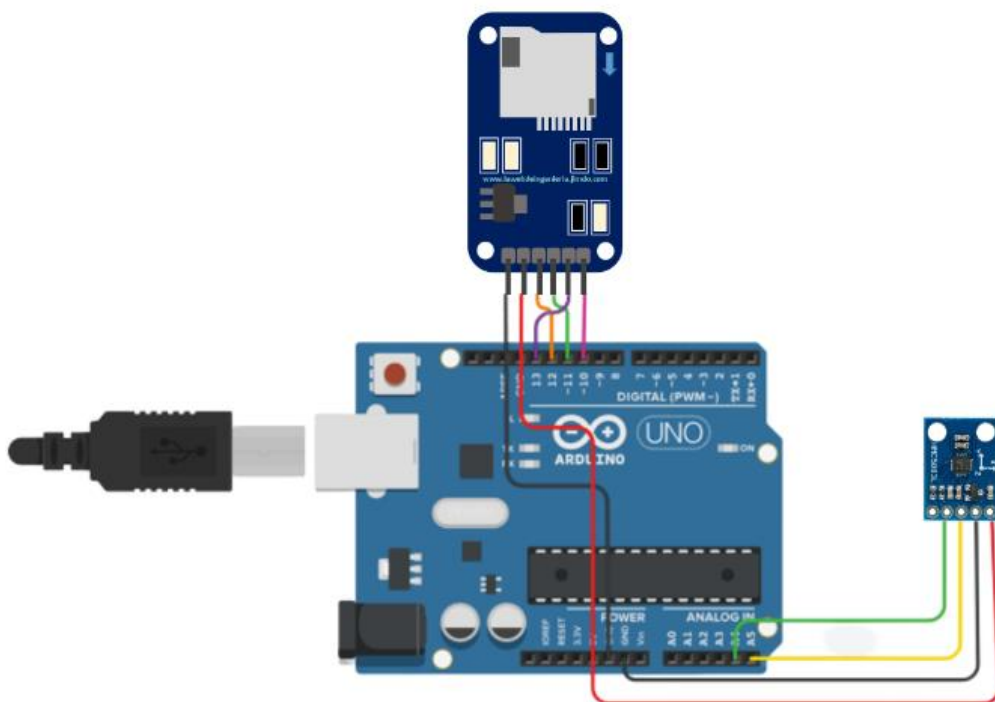
Anexo 1. Mapeado de conexiones para los sensores.

Anexo 1.1. Mapeado de conexiones para el anemómetro.



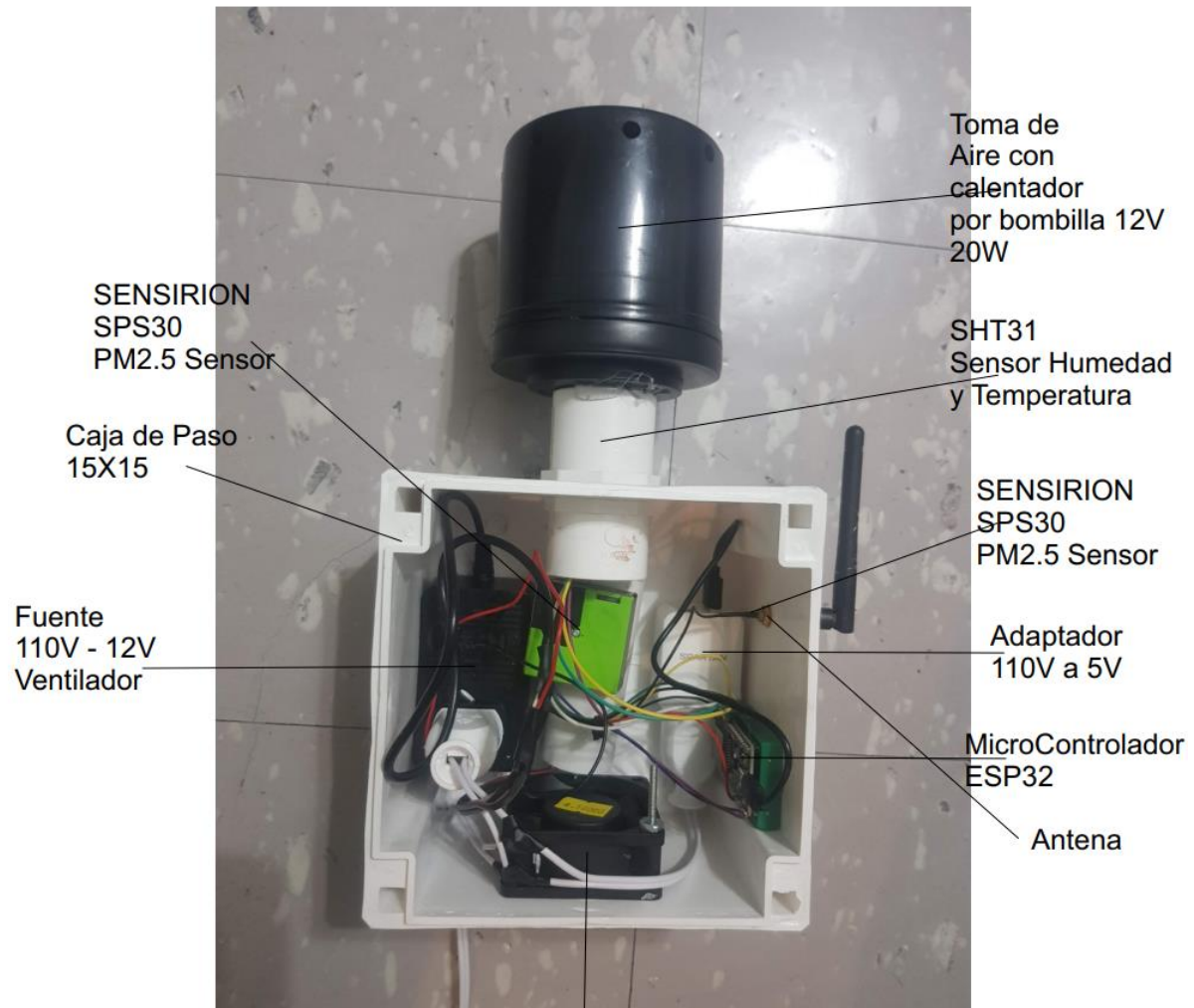
Anexo 1.2. Mapeado de conexiones para el sensor de ozono

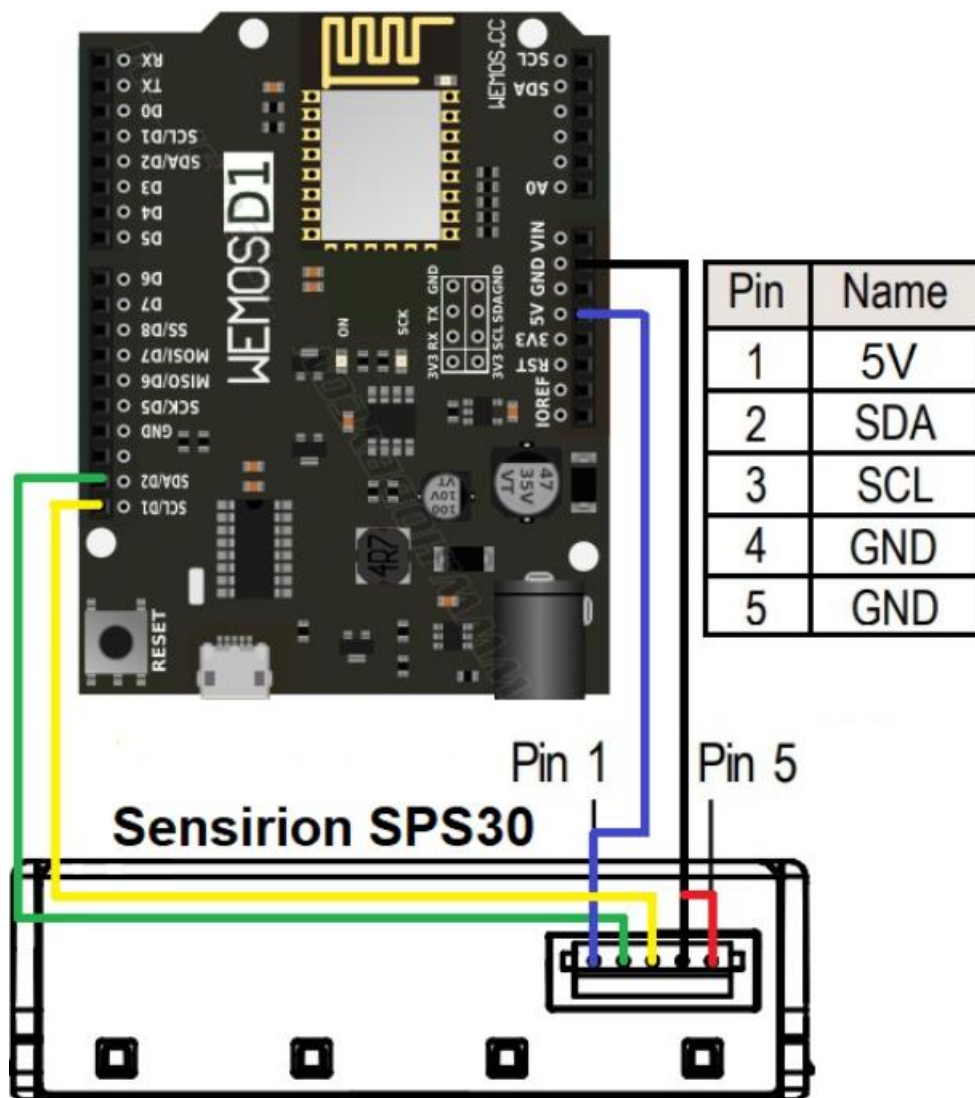


Anexo 1.3. Mapeado de conexiones para el sensor de temperatura y humedad relativa.**Anexo 1.4.** Mapeado de conexiones para la brújula.

Anexo 1.5. Mapeado de conexiones para el sensor de PM_{2.5}

Ambos sensores de PM_{2.5} llevan las mismas conexiones en sus componentes, la única diferencia es que el de corrección de humedad lleva una conexión de una bombilla como se evidencia abajo.



Anexo 1.6. Conexiones del SPS30 a la placa WEMOS D1**Anexo 2.** Fichas técnicas de los sensores y componentes.

[Ficha técnica sensor SPS30](#)

[Ficha técnica sensor MQ131](#)

[Ficha técnica sensor DHT11](#)

[Ficha técnica sensor GY-273 QMC5883L](#)

[Ficha técnica placas ARDUINO](#)

[Ficha técnica placas WEMOS D1](#)

[Ficha técnica módulo tarjeta microSD](#)

[Ficha técnica motor 3 VDC](#)

[Ficha técnica sensor SHT31](#)

Anexo 3. Códigos de programación.**Anexo 3.1.** Código de programación del anemómetro.

```

1  #include <SD.h>
2  #include <SPI.h>
3  #define SS 10
4  File archivo;
5  float velocidad;
6  float velocity;
7  float vel;
8  void setup() {
9    SD.begin(SS);
10   Serial.begin(9600);
11   archivo= SD.open("Velocidad del viento.txt", FILE_WRITE);

12  }

13  void loop() {
14   int sensorValue=analogRead(A0);
15   float outVoltage = sensorValue*(5.0/1023.0);
16   Serial.print("outVoltage= ");
17   Serial.print(outVoltage);
18   Serial.println("V");
19   vel = outVoltage*6;
20   Serial.print("Velocidad: ");
21   Serial.print(vel);
22   Serial.println(" metros por segundo");
23   velocidad=vel;
24   registrasd();
25  }
26  void registrasd(){
27   archivo=SD.open("Velocidad del viento.txt", FILE_WRITE);
28   if (archivo){
29    velocity=velocidad;
30    archivo.println(velocity);
31    Serial.println(" m_s");
32    delay(2000);
33    archivo.close();
34    delay(2000);
35   }
36   delay(60000); // put your main code here, to run repeatedly:

37  }

```

Anexo 3.2. Código de programación del sensor de ozono.

```

1  int valor;
2  #include <SPI.h>
3  #include <SD.h>
4  #define SS 10
5  File archivo;

```

```

6  float ozono;
7  void setup() {
8    Serial.begin(9600); // put your setup code here, to run once:
9    SD.begin(SS);
10   archivo = SD.open("Ozono.txt", FILE_WRITE);
11   }

12   void loop() {
13     valor = analogRead(0);
14     Serial.println(valor);
15     ozono=valor;
16     registrasd();
17   }
18   void registrasd(){

19     archivo=SD.open("Ozono.txt", FILE_WRITE);
20     if (archivo){
21       int ozone = int(ozono);
22       archivo.println(ozone);
23       Serial.println(" PPM");
24       delay(5000);
25       archivo.close();
26       delay(5000);

27     }
28     delay(60000); // put your main code here, to run repeatedly:

29   }

```

Anexo 3.3. Código de programación veleta.

```

1  #include <Wire.h>
2  #include <Adafruit_Sensor.h>
3  #include <Adafruit_HMC5883_U.h>
4  #include <SPI.h>
5  #include <SD.h>
6  #define SS 10
7  File archivo;
8  float grados;
9  float grad;

10 /* Assign a unique ID to this sensor at the same time */
11 Adafruit_HMC5883_Unified mag = Adafruit_HMC5883_Unified(12345);

12 void displaySensorDetails(void)
13 {
14   sensor_t sensor;

```

```

15 mag.getSensor(&sensor);
16 Serial.println("-----");
17 Serial.print ("Sensor:  "); Serial.println(sensor.name);
18 Serial.print ("Driver Ver:  "); Serial.println(sensor.version);
19 Serial.print ("Unique ID:  "); Serial.println(sensor.sensor_id);
20 Serial.print ("Max Value:  "); Serial.print(sensor.max_value); Serial.println(" uT");
21 Serial.print ("Min Value:  "); Serial.print(sensor.min_value); Serial.println(" uT");
22 Serial.print ("Resolution:  "); Serial.print(sensor.resolution); Serial.println(" uT");
23 Serial.println("-----");
24 Serial.println("");
25 delay(5000);
26 }

27 void setup(void)
28 {
29   Serial.begin(9600);
30   SD.begin(SS);
31   archivo= SD.open("Temp y humedad.txt", FILE_WRITE);
32   Serial.println("HMC5883 Magnetometer Test"); Serial.println("");

33   /* Initialise the sensor */
34   if(!mag.begin())
35   {
36     /* There was a problem detecting the HMC5883 ... check your connections */
37     Serial.println("Ooops, no HMC5883 detected ... Check your wiring!");
38     while(1);
39   }

40   /* Display some basic information on this sensor */
41   displaySensorDetails();
42   }

43 void loop(void)
44 {
45   /* Get a new sensor event */
46   sensors_event_t event;
47   mag.getEvent(&event);

48   /* Display the results (magnetic vector values are in micro-Tesla (uT)) */
49   Serial.print("X: "); Serial.print(event.magnetic.x); Serial.print(" ");
50   Serial.print("Y: "); Serial.print(event.magnetic.y); Serial.print(" ");
51   Serial.print("Z: "); Serial.print(event.magnetic.z); Serial.print(" ");Serial.println("uT");

52   // Hold the module so that Z is pointing 'up' and you can measure the heading with x&y
53   // Calculate heading when the magnetometer is level, then correct for signs of axis.
54   float heading = atan2(event.magnetic.y, event.magnetic.x);

```



```

55 // Once you have your heading, you must then add your 'Declination Angle', which is the 'Error' of
    the magnetic field in your location.
56 // Find yours here: http://www.magnetic-declination.com/
57 // Mine is: -13° 2' W, which is ~13 Degrees, or (which we need) 0.22 radians
58 // If you cannot find your Declination, comment out these two lines, your compass will be slightly
    off.
59 float declinationAngle = 0.22;
60 heading += declinationAngle;

61 // Correct for when signs are reversed.
62 if(heading < 0)
63   heading += 2*PI;

64 // Check for wrap due to addition of declination.
65 if(heading > 2*PI)
66   heading -= 2*PI;

67 // Convert radians to degrees for readability.
68 float headingDegrees = heading * 180/M_PI;

69 Serial.print("Heading (degrees): "); Serial.println(headingDegrees);
70 grados = headingDegrees;
71 registrasd();
72 }
73 void registrasd(){
74   archivo=SD.open("grados.txt", FILE_WRITE);
75   if (archivo){
76     int grad = int(grados);
77     archivo.println(grad);
78     Serial.println("");
79     delay(5000);
80     archivo.close();
81     delay(5000);
82   }
83   delay(60000);
84 }

```

Anexo 3.4. Código de programación sensor temperatura y humedad relativa.

```

1  #include <DHT.h>
2  #include <SPI.h>
3  #include <SD.h>
4  DHT dht(8,DHT11);
5  #define SS 10
6  File archivo;
7  float celsius;
8  float hume;

```

```

9  void setup(){
10  Serial.begin(9600);
11  dht.begin();
12  SD.begin(SS);
13  archivo= SD.open("Temp y humedad.txt", FILE_WRITE);
14  }

15  void loop()
16  {
17  float TemC = dht.readTemperature();
18  float Humd = dht.readHumidity();

19  Serial.print(TemC);
20  Serial.println("°C");

21  Serial.print(Humd);
22  Serial.println("%");
23  celsius = TemC;
24  hume = Humd;
25  registrasd();
26  }
27  void registrasd(){

28  archivo=SD.open("Temp y humedad.txt", FILE_WRITE);
29  if (archivo){
30  int temp = int(celsius);
31  archivo.println(temp);
32  Serial.println("°C");
33  int humedad = int(hume);
34  archivo.println(humedad);
35  Serial.println("%");
36  delay(2000);
37  archivo.close();
38  delay(2000);
39  }
40  delay(60000);
41  }

```

Anexo 3.5. Código de programación sensor material particulado con corrección de humedad.

```

1  {
2  "datasource": {
3  "type": "prometheus",
4  "uid": "PBFA97CFB590B2093"
5  },
6  "description": "sps30",
7  "fieldConfig": {
8  "defaults": {

```

```
9  "mappings": [],
10 "thresholds": {
11   "mode": "absolute",
12   "steps": [
13    {
14     a. "color": "green",
15     b. "value": null
16    },
17    {
18     a. "color": "super-light-yellow",
19     b. "value": 12
20    },
21    {
22     a. "color": "orange",
23     b. "value": 35
24    },
25    {
26     a. "color": "semi-dark-red",
27     b. "value": 55
28    },
29    {
30     a. "color": "light-purple",
31     b. "value": 150
32    },
33    {
34     a. "color": "#2c1502",
35     b. "value": 250
36    }
37   ]
38 },
39 "color": {
40   "mode": "thresholds"
```

```

41 "id": 4,
42 "options": {
43 "reduceOptions": {
44 "values": false,
45 "calcs": [
46 "mean"
47 ],
48 "fields": ""
49 },
50 "orientation": "auto",
51 "showThresholdLabels": false,
52 "showThresholdMarkers": true
53 },
54 "pluginVersion": "10.0.3",
55 "targets": [
56 {
57 "datasource": {
58 "type": "prometheus",
59 "uid": "PBFA97CFB590B2093"
60 },
61 "editorMode": "builder",
62 "expr": "PM25{exported_job=\"USTA_Villao_Catumare_6d19ac\"}",
63 "hide": false,
64 "legendFormat": "__auto",
65 "range": true,
66 "refId": "A"
67 }
68 ],
69 "title": "USTA Catumare",
70 "type": "gauge"

```

Anexo 3.6. Código de programación sensor material particulado sin corrección de humedad.

```

1  {
2  "datasource": {
3  "type": "prometheus",
4  "uid": "PBFA97CFB590B2093"
5  },
6  "description": "sps30",
7  "fieldConfig": {
8  "defaults": {
9  "mappings": [],
10 "thresholds": {
11 "mode": "absolute",
12 "steps": [
13 {

```

```
      a. "color": "green",
      b. "value": null
14 },
15 {
      a. "color": "super-light-yellow",
      b. "value": 12
16 },
17 {
      a. "color": "orange",
      b. "value": 35
18 },
19 {
      a. "color": "semi-dark-red",
      b. "value": 55
20 },
21 {
      a. "color": "light-purple",
      b. "value": 150
22 },
23 {
      a. "color": "#2c1502",
      b. "value": 250
24 }
25 ]
26 },
27 "color": {
28 "mode": "thresholds"
29 },
30 "max": 500,
31 "unit": "conµgm3"
32 },
33 "overrides": []
34 },
35 "gridPos": {
36 "h": 7,
37 "w": 4,
38 "x": 20,
39 "y": 7
40 },
41 "id": 7,
42 "options": {
43 "reduceOptions": {
44 "values": false,
45 "calcs": [
46 "mean"
47 ],
48 "fields": ""
49 },
```

```
50 "orientation": "auto",
51 "showThresholdLabels": false,
52 "showThresholdMarkers": true
53 },
54 "pluginVersion": "10.0.3",
55 "targets": [
56 {
57 "datasource": {
58 "type": "prometheus",
59 "uid": "PBFA97CFB590B2093"
60 },
61 "editorMode": "builder",
62 "expr": "PM25{exported_job=\"USTA_Villao_Jimena_b09500\"}",
63 "hide": false,
64 "legendFormat": "__auto",
65 "range": true,
66 "refId": "A"
67 }
68 ],
69 "title": "USTA Jimena",
70 "type": "gauge"
71 }
```

Anexo 4. Excel con todos los datos obtenidos para la investigación.

Obtenga el link con todos los datos obtenidos durante la realización de este trabajo de grado [aquí](#).

Anexo 5. Fotos tomadas durante el desarrollo de la investigación.

