

MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE EN LA SEDE UNICOMFACAUCA
POPAYÁN SEGÚN RESOLUCIÓN 2254 DEL 1 DE NOVIEMBRE DEL 2017
DEL MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE Y SU
RELACIÓN CON LA ESTRUCTURA URBANA



JHONNATAN BOLÍVAR BURBANO GUTIÉRREZ
MARTHA MILENA CERÓN BOLAÑOS

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA-UNICOMFACAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA INDUSTRIAL
POPAYÁN, CAUCA
2022

MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE EN LA SEDE UNICOMFACAUCA
POPAYÁN SEGÚN RESOLUCIÓN 2254 DEL 1 DE NOVIEMBRE DEL 2017 DEL
MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE Y SU RELACIÓN
CON LA ESTRUCTURA URBANA.

JHONNATAN BOLÍVAR BURBANO GUTIÉRREZ
MARTHA MILENA CERÓN BOLAÑOS

TRABAJO DE GRADO

DIRECTOR: NELSON EMILIO PAZ RUÍZ
CODIRECTOR: ZULY YULIANA DELGADO ESPINOSA

CORPORACIÓN UNIVERSITARIA COMFACAUCA-UNICOMFACAUCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERA INDUSTRIAL
POPAYÁN, CAUCA
2022

Nota de aceptación.

El director y los jurados han leído el presente documento, escucharon la sustentación del mismo por sus actores y lo encuentran satisfactorio.

Director

Presidente del Jurado

Jurado

Popayán, 12 de diciembre de 2022

DEDICATORIA

El presente proyecto de grado es dedicado principalmente a Dios, quien nos ha dado la sabiduría, la persistencia y la paciencia para concluir con éxito cada objetivo propuesto.

A nuestros padres, quienes a lo largo de nuestras vidas se han preocupado por nuestro bienestar y educación. Quienes nos han enseñado que con esfuerzo, dedicación, amor, responsabilidad y constancia todo se logra. Quienes han sido nuestro ejemplo de superación.

A mi hija Laura Valeria Cerón quien ha sido mi mayor motor. Quien me da la fuerza que necesito para levantarme día con día. A ella por la paciencia, por el amor, por la espera, por su gran compromiso y responsabilidad. Quien es mi principal razón para esforzarme por el presente y el mañana.

A nuestros hermanos y demás familiares por todo su apoyo incondicional.

Martha Milena Cerón Bolaños
Jonathan Bolívar Burbano Gutiérrez

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Ingeominas, por brindarnos su tiempo, sus conocimientos, el espacio y la confianza para culminar con éxito uno de nuestros objetivos propuestos. También agradecemos a nuestro director Nelson Emilio Paz y a nuestra codirectora Zully Yuliana Delgado, quienes, con su experiencia y conocimiento nos han apoyado enormemente. Agradecemos también a la facultad de ingeniería y a su director de programa Helmer Paz Orozco, quien nos ha orientado en todo nuestro proceso de formación académica.

Gracias a Dios por permitirnos vivir cada experiencia de investigación y formación.

A nuestros padres y demás familiares por el esfuerzo y apoyo incondicional.

A todos, muchas gracias.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
CAPÍTULO 1. GENERALIDADES	10
1.1. ANTECEDENTES	10
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	12
1.3. JUSTIFICACIÓN	14
1.4. OBJETIVOS	16
1.4.1. Objetivo general	16
1.4.2. Objetivos específicos	16
1.5. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO	17
1.6. MARCO TEÓRICO	17
1.6.1. Contaminación atmosférica	17
1.6.2. Dióxido de carbono y su impacto en el medio ambiente	18
1.6.3. Dióxido de carbono y su efecto sobre la salud humana	19
1.6.4. Efecto de la temperatura y la presión sobre la medición de CO ₂	21
1.6.5. Niveles máximos permisibles	23
1.6.6. Monitoreo de la calidad del aire	25
1.6.7. Arduino	26
1.6.8. Sensor MG-811	28
1.6.9. Sensor DHT11	29
1.7. MARCO CONCEPTUAL	30
1.7.1. Dióxido de carbono	30
1.7.2. Base de datos	30
1.7.3. Fuentes emisoras de CO ₂	31
1.7.4. Coeficiente de correlación	31
1.7.5. Coeficiente de Pearson	31
1.7.6. Prueba de Chi cuadrado	32

1.8. MARCO GEOGRÁFICO.....	33
1.9. MARCO LEGAL	33
1.10. MARCO METODOLÓGICO	34
1.8.1. POBLACIÓN Y MUESTRA	36
1.8.2. VARIABLES DE ESTUDIO	37
1.8.3. TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	37
CAPÍTULO 2. DISEÑO DE PROTOTIPO DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE (CONCENTRACIÓN DE CO ₂).....	40
2.1. DISEÑO DEL PROTOTIPO DE MONITOREO	40
2.2. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO	41
2.3. CONFIGURACIÓN DE LOS SENSORES DEL PROTOTIPO	43
2.4. ANÁLISIS DE DATOS.....	45
2.4.1. PRUEBAS DE CAMPO	45
2.4.2. TOMA DE DATOS.....	48
CAPÍTULO 3. VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE DATOS	49
3.1. VALIDACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO.....	49
3.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS MEDICIONES.....	52
CAPÍTULO 4. CONTRASTE DE MEDICIONES CON LÍMITES PERMISIBLES DE CO ₂	56
4.1. CONTRASTE DE MEDICIONES.....	56
CAPÍTULO 5. SOCIALIZACIÓN DE RESULTADOS.....	68
5.1. EVIDENCIA DE SOCIALIZACIÓN	68
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	70
6.1. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	70
6.2. RECOMENDACIONES	71
BIBLIOGRAFÍA.....	73
ANEXO 1. MEDICIONES DE CO ₂ REALIZADAS CON EL SISTEMA PROPUESTO	

LISTADO DE ILUSTRACIONES

	Pág.
Ilustración 1. Ubicación de universidad Unicomfacauca.....	33
Ilustración 2. Punto de muestreo Corporación Universitaria Comfacauca – UNICOMFACAUCA.....	35
Ilustración 3. Metodología.....	36
Ilustración 4. Conexión interna – Prototipo de medición de CO ₂	40
Ilustración 5. Conexión Arduino y sensores – Prototipo de medición de CO ₂	41
Ilustración 6. Esquema de ensamblaje de prototipo de monitoreo de CO ₂	42
Ilustración 7. Ensamblaje interno de prototipo de monitoreo de CO ₂	43
Ilustración 8. Conexión a Arduino.....	44
Ilustración 9. Código de programación – Prototipo de medición de CO ₂	45
Ilustración 10. Instalación de prototipo para toma de datos.....	46
Ilustración 11. Prueba de funcionalidad – Prototipo diseñado.....	47
Ilustración 12. Validación del prototipo diseñado.....	50
Ilustración 13. Sistema de monitoreo de ingeominas.....	50
Ilustración 14. Gráfico de dispersión de la variable CO ₂	54
Ilustración 15. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura.....	55
Ilustración 16. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 1.....	57
Ilustración 17. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 1.....	58
Ilustración 18. Gráfico de dispersión de la variable CO ₂ – Día 1.....	58
Ilustración 19. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 2.....	59
Ilustración 20. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 2.....	59
Ilustración 21. Gráfico de dispersión de la variable CO ₂ – Día 2.....	60
Ilustración 22. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 3.....	60
Ilustración 23. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 3.....	61
Ilustración 24. Gráfico de dispersión de la variable CO ₂ – Día 3.....	61
Ilustración 25. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 4.....	62
Ilustración 26. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 4.....	62
Ilustración 27. Gráfico de dispersión de la variable CO ₂ – Día 4.....	63
Ilustración 28. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 5.....	63
Ilustración 29. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 5.....	64
Ilustración 30. Gráfico de dispersión de la variable CO ₂ – Día 5.....	64
Ilustración 31. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 6.....	65
Ilustración 32. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 6.....	65
Ilustración 33. Gráfico de dispersión de la variable CO ₂ – Día 6.....	66
Ilustración 34. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 7.....	66
Ilustración 35. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 7.....	67
Ilustración 36. Gráfico de dispersión de la variable CO ₂ – Día 7.....	67

Ilustración 37. Poster de socialización	68
Ilustración 38. Participación en evento internacional	69
Ilustración 39. Participación en evento virtual	69

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cambio de medición de CO ₂ con temperatura	22
Tabla 2. Cambio de medición de CO ₂ con altitud y presión barométrica	23
Tabla 3. Niveles máximos permisibles en la calidad del aire	24
Tabla 4. Niveles de contaminación aire.....	24
Tabla 5. Descripción de los sensores para la medición de la calidad del aire	25
Tabla 6. Especificaciones – Sensor MG-811.....	29
Tabla 7. Normatividad calidad del aire	34
Tabla 8. Actividades y fases.....	38
Tabla 9. Características – Sensores utilizados en prototipo de monitoreo de CO ₂ diseñado.....	47
Tabla 10. Características – Sensores equipo de monitoreo de Ingeominas Popayán	49
Tabla 11. Porcentaje de proceso de variación – Prueba repetibilidad	51
Tabla 12. Prueba repetibilidad	51
Tabla 13. Coeficiente de correlación – Variable CO ₂	54
Tabla 14. Correlación de Pearson de la variable Temperatura.....	55
Tabla 15. Resultados obtenidos con prototipo de monitoreo propuesto	56
Tabla 16. Análisis de regresión – Resultados obtenidos con prototipo de monitoreo propuesto	56

LISTADO DE ECUACIONES

Ecuación 1. Cálculo de muestra para población finita	36
Ecuación 2. Error cuadrático medio	52
Ecuación 3. Coeficiente de correlación de Pearson	53

RESUMEN

Con el constante crecimiento de las ciudades y el aumento de la población, la calidad del aire se ve afectada de forma incremental. En consecuencia, debe tenerse en cuenta en la planificación urbana, la movilidad, el transporte y la industria de las regiones. Para la medición de la calidad del aire se utilizan sensores electroquímicos de bajo costo cuyo objetivo principal es determinar la calidad del aire en un ambiente determinado.

Esta investigación tuvo como objetivo determinar los niveles de concentración de contaminantes presentes en el aire, mediante un prototipo de monitoreo diseñado con sensores electroquímicos portátiles de bajo costo. A partir de esta medición, se realizó una correlación de los datos obtenidos con el uso del prototipo del medidor fabricado por los estudiantes de la Corporación Universitaria de Comfacauca, y los datos obtenidos con el sistema de monitoreo certificado de la sede de Ingeominas de Popayán – Cauca. El parámetro medido fue el Dióxido de Carbono (CO₂).

El punto de muestreo se ubicó en el bloque A del quinto piso de la Facultad de Ingeniería, en la Corporación Universitaria Comfacauca, sede Popayán – Cauca, ubicada en el centro histórico de la ciudad. Con la obtención de los datos se buscaba la construcción de una base de datos organizada y estructurada para facilitar la validación y el análisis de la información relacionada con la calidad del aire en la ciudad. Finalmente, los resultados fueron socializados con la comunidad estudiantil, para contribuir a la concientización ambiental y buscar estrategias que permitiesen controlar y disminuir las emisiones de contaminantes a la atmósfera para evitar enfermedades de salud pública.

El documento presenta la descripción del diseño y funcionamiento del prototipo construido para la medición de la calidad del aire en la ciudad, la validación de su correcto funcionamiento por medio de la comparación de los resultados con las mediciones realizadas con un prototipo de monitoreo certificado; la comparación de las mediciones validadas con los límites de calidad del aire establecidos a través de la normativa vigente, y la presentación de evidencia relacionada con la socialización de los resultados a la comunidad.

Palabras claves: Calidad del Aire, Parámetros Físicoquímicos, Contaminantes, Planificación Urbana, Sensores Electroquímicos

ABSTRACT

With the constant growth of cities and the increase in population, air quality is increasingly affected. Consequently, it must be taken into account in the urban planning, mobility, transport and industry of the regions. For the measurement of air quality, low-cost electrochemical sensors are used whose main objective is to determine the quality of the air in a given environment.

The objective of this research was to determine the concentration levels of pollutants present in the air, through a monitoring prototype designed with low-cost portable electrochemical sensors. From this measurement, a correlation was made between the data obtained with the use of the prototype of the meter manufactured by the students of the University Corporation of Comfacauca, and the data obtained with the certified monitoring system of the Ingeominas de Popayán headquarters - Cauca. The parameter measured was Carbon Dioxide (CO₂).

The sampling point was located in block A on the fifth floor of the Faculty of Engineering, in the Comfacauca University Corporation, Popayán - Cauca headquarters, located in the historic center of the city. With the collection of data, the construction of an organized and structured database was sought to facilitate the validation and analysis of information related to air quality in the city. Finally, the results were socialized with the student community, to contribute to environmental awareness and seek strategies to control and reduce emissions of pollutants into the atmosphere to avoid public health diseases.

The document presents the description of the design and operation of the prototype built for the measurement of air quality in the city, the validation of its correct operation through the comparison of the results with the measurements made with a certified monitoring prototype; the comparison of the validated measurements with the air quality limits established through current regulations, and the presentation of evidence related to the socialization of the results to the community.

Keywords: Air Quality, Physicochemical Parameters, Pollutants, Urban Planning, Electrochemical Sensors

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire representa una grave amenaza para la salud y calidad de vida de los seres vivos en el planeta. Medir la contaminación en el aire que respiran los seres humanos y compartir los resultados con pares es un paso importante para aumentar la conciencia social para crear un medio ambiente limpio. Por lo general, las mediciones de contaminación se realizan utilizando monitores costosos en ubicaciones fijas. Estas mediciones no brindan información precisa sobre la contaminación en tiempo real en la mayoría de las zonas altamente contaminadas [1]. Por esta razón, es deseable tener acceso a mediciones detalladas en tiempo real para poder analizar e identificar rápidamente niveles alarmantes de contaminantes. Debido al alto costo de estos sensores, se hace necesario crear nuevas estrategias para la medición de los niveles de contaminación del aire, con el fin de hacerlos más accesibles y factibles en términos de medición.

La contaminación del aire es un problema que normalmente es analizado en dos escalas que difieren en el impacto y el tipo de los contaminantes emitidos: los que tienen un impacto de escala global y aquellos que tienen un impacto de escala local [2]. Los principales contaminantes que tienen impacto a escala global son los gases de efecto invernadero y gases destructores de ozono estratosférico, los cuales tienen como consecuencia el calentamiento global.

Los cambios en los patrones climáticos y la destrucción de la capa de ozono que protege a la biosfera de la radiación solar ultravioleta B, también pueden tener algunos efectos locales asociados con el empeoramiento de los efectos de los contaminantes que tienen impacto a escala local. Éstos últimos son los causantes de la baja calidad del aire en centros urbanos, con sus implicaciones sobre la calidad de vida de la población, y están representados principalmente por un grupo de seis contaminantes conocidos como contaminantes “criterio” por sus efectos sobre la salud humana y el ambiente: monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos (compuestos orgánicos volátiles), óxidos de azufre, material particulado y ozono troposférico [3].

La calidad del aire es uno de los factores de importancia en la determinación del índice de calidad de vida de un centro urbano. Una ciudad con buena calidad del aire es preferible para vivir y más atractiva para las inversiones al ser comparada con otras ciudades con condiciones similares de ingreso, acceso a bienes y servicios y oportunidades de empleo, pero con aire contaminado [4]. Un aire de baja calidad o aire contaminado es aquel que produce una evidencia perceptible o medida de poco bienestar, visibilidad reducida, suciedad en edificaciones, afectaciones a la naturaleza o perjuicios sobre la salud. En centros urbanos con

altas concentraciones de población y la alta ocurrencia de procesos productivos, la afectación a la salud resulta ser la consecuencia más importante de la contaminación del aire.

De acuerdo con Lacasaña-Navarro *et al.* [5] “gran parte de los problemas de la contaminación atmosférica son consecuencia del rápido y desordenado crecimiento urbano y de la industrialización, fenómenos que muchas veces no van acompañados de programas cuyo objetivo sea proteger el medio ambiente”. Para identificar el impacto de la calidad del aire en la salud humana, se han llevado a cabo diferentes estudios a nivel nacional e internacional.

En Chile, Morales Martínez [7] realizó la evaluación de la calidad del aire al interior de la sala número 122 de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) – Sede Concepción, la cual tiene tres extractores de aire. En esta evaluación se realizaron mediciones de oxigenación, humedad, temperatura, y CO₂, para dos situaciones (con y sin estudiantes). En conclusión, se estableció que el aula requería un ajuste en los extractores de aire, teniendo en cuenta que la calidad del aire presentaba saturación en CO₂.

En el estudio de González Duque [8] se seleccionaron tres puntos de monitoreo ubicados en el sector centro y oriente de la ciudad de Manizales para realizar la medición de la calidad del aire y el impacto del material particulado (PM10) y lluvia ácida en estas mediciones. Estos datos fueron complementados con la información suministrada por la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS), proveniente de los dos puntos de monitoreo de material particulado (PM10).

Por su parte, González Velandia [9] buscó determinar la calidad del aire en el año 2015 en la Universidad Libre Sede Bosque Popular, según lo establecido en la Resolución 610 del 24 de marzo de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). La conformidad y el cumplimiento de los límites máximos diarios establecidos son: material particulado (PM10): 100 µg/m³, dióxido de azufre (SO₂): 250 µg/m³, dióxido de nitrógeno (NO₂): 150 µg/m³, y ozono (O₃) (8 horas): 80 µg/m³, para la determinación de material particulado (PM10) se realizó de acuerdo con el método de la Agencia de Protección Ambiental (EPA e-CFR) y el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire del año 2010.

Galvis & Torres [10] realizaron una comparación de las mediciones de concentraciones de material particulado 2.5 (PM 2.5) en las estaciones de monitoreo de calidad de aire de Cali, Medellín y Bogotá, en el período de agosto de 2019 a agosto 2020. Los autores hacen hincapié en el impacto de actividades como el transporte de pasajeros y carga en la calidad del aire de las ciudades, debido a que las sustancias emitidas son altamente tóxicas para el medio ambiente y para la

salud de los seres humanos, especialmente en lo relacionado a las enfermedades producidas de tipo respiratorio.

Teniendo en cuenta que, aunque la medición de la calidad del aire contribuye a identificar las problemáticas a tratar para mejorar las condiciones ambientales del entorno, uno de los factores clave consiste en la divulgación de los resultados y en la generación de conciencia sobre los elementos a tener en cuenta para mitigar el impacto en la calidad de vida de la comunidad.

Por esta razón, este trabajo de investigación busca, determinar el estado actual de la calidad del aire en la Corporación Universitaria Comfacauca, sede Popayán - Cauca, de acuerdo con la resolución 2254 del 1 de noviembre del 2017, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Adicionalmente, busca también realizar la socialización de los resultados a la comunidad estudiantil, identificando y proponiendo estrategias para la concienciación de esta problemática y la mejora de la calidad del aire en la ciudad y la región.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

1.1. ANTECEDENTES

La posibilidad de poder brindar una base adecuada y confiable, que permita el desarrollo del proyecto, se ha recopilado analizado e investigado en diferentes artículos científicos y otros proyectos, tanto a nivel nacional como internacional, en lo relacionado con la medición de la calidad del aire.

En cuanto al diseño de medidores de calidad del aire, Ganchozo Moreno [6] realizó la construcción de un prototipo para la medición de las concentraciones del gas de dióxido de carbono en el ambiente. El autor seleccionó algunas zonas de medición estratégicas como áreas industriales o urbanizaciones, recopilando datos de las concentraciones de CO₂; en particular, el prototipo incluía una señalización lumínica para representar los límites permitidos en lo relacionado con la calidad del aire en el ambiente, de acuerdo con los estándares establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) y el Plan Nacional de la calidad del aire en Ecuador.

En Chile, Morales Martínez [7] realizó la evaluación de la calidad del aire al interior de la sala número 122 de la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM) – Sede Concepción, la cual tiene tres extractores de aire. En esta evaluación se realizaron mediciones de oxigenación, humedad, temperatura, y CO₂, para dos situaciones (con y sin estudiantes). En conclusión, se estableció que el aula requería un ajuste en los extractores de aire, teniendo en cuenta que la calidad del aire presentaba saturación en CO₂.

En el estudio de González Duque [8] se seleccionaron tres puntos de monitoreo ubicados en el sector centro y oriente de la ciudad de Manizales para realizar la medición de la calidad del aire y el impacto del material particulado (PM10) y lluvia ácida en estas mediciones. Estos datos fueron complementados con la información suministrada por la Corporación Autónoma Regional de Caldas (CORPOCALDAS), proveniente de los dos puntos de monitoreo de material particulado (PM10), durante el período comprendido entre septiembre de 2009 y abril de 2011. Se evaluaron además los niveles de dioxinas, furanos y dl-PCBs en el material particulado (PM10) y la dinámica del proceso de remoción (*scavenging*) del contenido iónico del material particulado (PM10) a través de la lluvia. Los mayores niveles de material particulado (PM10) fueron obtenidos en la zona centro de la ciudad (sector Fundadores) con valores entre 22 µg/m³ y 67 µg/m³, y una concentración media de 43 µg/m³, niveles de concentración que estuvieron asociados al alto tráfico vehicular. En zonas de

menor influencia de flujo vehicular se obtuvieron valores de material particulado (PM10): entre 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, las variables meteorológicas precipitación, humedad relativa y temperatura, fueron reconocidas como factores influyentes en los cambios de concentración del material particulado (PM10).

Por su parte, González Velandia [9] buscó determinar la calidad del aire en el año 2015 en la Universidad Libre Sede Bosque Popular, según lo establecido en la Resolución 610 del 24 de marzo de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVDT). La conformidad y el cumplimiento de los límites máximos diarios establecidos son: material particulado (PM10): 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dióxido de azufre (SO_2): 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dióxido de nitrógeno (NO_2): 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y ozono (O_3) (8 horas): 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, para la determinación de material particulado (PM10) se realizó de acuerdo con el método de la Agencia de Protección Ambiental (EPA e-CFR) y el protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire del año 2010. Se realizó un muestreo simultáneo y continuo de veinticuatro (24) horas con un equipo de Rack de cinco gases donde se utilizaron tres estaciones para la toma de la muestra. Se llevó a cabo durante un periodo de doce (12) días. Los métodos de muestreo y determinación de gases utilizados se denominan métodos activos utilizando soluciones acuosas absorbentes y específicas para cada uno de los contaminantes y análisis de espectrofotometría, se encontraron concentraciones promedio a condiciones estándar para el material particulado (PM10): 45.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dióxido de azufre (SO_2): 25.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, dióxido de nitrógeno (NO_2): 15.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, y ozono (O_3): 39.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, mediante cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas se encontraron resultados negativos frente a la presencia de compuestos orgánicos volátiles en el material particulado (PM10). Determinando que la calidad del aire en la Universidad Libre Sede Bosque Popular, basados en los contaminantes material particulado (PM 10), y gases contaminantes anteriormente nombrados, cumplen con los niveles máximos permisibles.

Galvis & Torres [10] realizaron una comparación de las mediciones de concentraciones de material particulado 2.5 (PM 2.5) en las estaciones de monitoreo de calidad de aire de Cali, Medellín y Bogotá, en el período de agosto de 2019 a agosto 2020. Los autores hacen hincapié en el impacto de actividades como el transporte de pasajeros y carga en la calidad del aire de las ciudades, debido a que las sustancias emitidas son altamente tóxicas para el medio ambiente y para la salud de los seres humanos, especialmente en lo relacionado a las enfermedades producidas de tipo respiratorio. El material particulado es una sustancia contaminante que se presenta en el medio ambiente con diferentes tamaños, pero según estudios, el PM 2.5 y las partículas de menor tamaño son las causantes de una baja calidad del aire y en efecto de un aumento progresivo de enfermedades

respiratorias graves, generando “alrededor de 4,2 millones de muertes prematuras al año” [11]. Este estudio se realizó en tres de las grandes ciudades de Colombia con el fin de verificar si las medidas de confinamiento tanto nacionales como regionales en cada una de las ciudades, fueron lo suficientemente efectivas para contrarrestar el impacto del material particulado durante la pandemia. De igual forma, establecen el estado de la calidad de aire prepandemia, con el fin de proporcionar un análisis de la inmisión de PM 2.5 en las estaciones que miden esta variable en cada una de las ciudades estudiadas.

Puma y Alfonso [12] desarrollaron su medición en el laboratorio automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil. Para ello, construyeron un prototipo a partir del uso de “cuatro sensores el MQ-7 para la medición de monóxido de carbono, mg-811 para la medición de dióxido de carbono, MQ-4 medición de gas metano y O₂ para oxígeno”. En este proyecto, realizaron mediciones a los tubos de escape de diferentes tipos de vehículos, con el fin de identificar cuáles tendrían un impacto potencialmente mayor en la calidad del aire.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

La polución del aire repercute directamente al medio ambiente, afectando significativamente la flora, la fauna y las diferentes fuentes hídricas y deterioros en la infraestructura física de las ciudades. Las afectaciones en los seres humanos por la calidad del aire se manifiestan principalmente por diferentes trastornos en el sistema respiratorio trayendo consigo lesiones pulmonares y de las vías respiratorias. Adicionalmente, en altas concentraciones y tiempos prolongados de exposición pueden llegar a causar problemas irreversibles para la salud [13].

Desde que se usó el fuego para producir calor hasta los procesos industriales de hoy, el hombre continúa expulsando al aire elementos que lo contaminan, afectando con ello el medio ambiente. El aire es un recurso esencial y su contaminación constituye una agresión a todos los seres del planeta. La organización mundial de la salud (OMS), reconoce que la contaminación del aire “es un importante factor de riesgo para las enfermedades no transmisibles y causa una cuarta parte (24%) de las muertes de adultos por enfermedades cardíacas, 43% por enfermedades pulmonares obstructiva crónica, 25% por infartos y un 29% por cáncer de pulmón en todo el mundo” [14]. A demás, señala que el 91% de los habitantes del planeta respiran aire que contiene altos niveles de contaminación provocando así la muerte de siete millones de personas cada año, afectando especialmente a los niños y deportistas debido a que respiran más rápidamente ingiriendo una mayor cantidad de partículas contaminadas [11].

A nivel mundial, la problemática relacionada con contaminantes atmosféricos en las áreas urbanas viene presentando una tendencia creciente, como resultado de la demanda energética y las emisiones que tienen las actividades productivas y domésticas, producto de los procesos de urbanización, industrialización y flujo vehicular. Países como China, India, Rusia, Japón y Ciudad de México, presentan altos niveles de contaminación atmosférica y en las últimas décadas han vivido varias situaciones de emergencia ambiental. Según el informe del estado de calidad de aire en Colombia para el año 2018, las ciudades con mayores niveles de contaminación son Bogotá, Medellín y Cali, y los contaminantes más comunes son gas licuado de petróleo y material particulado que proviene principalmente de vehículos de carga, volquetas, buses y busetas que se alimentan con combustibles fósiles [15].

Uno de los subproductos que se genera por la quema de combustibles fósiles se denomina material particulado. Este proceso depende de parámetros tales como la composición del combustible, el tipo de máquina, tipo de catalizador y las condiciones de reacción. El material particulado procedente de los combustibles fósiles se caracteriza por contener principalmente sustancias orgánicas (generalmente hidrocarburos no quemados y lubricantes), mezcla de partículas de carbono conocido como “soot” (carbono orgánico y elemental principalmente), sulfatos y agua. La fracción de soot existe en un mayor porcentaje respecto de los sulfatos y el agua, su generación se debe a la combustión incompleta de este hidrocarburo [16].

El alto contenido de azufre en los combustibles es otro factor determinante en la producción de partículas y gases. El incremento de azufre en los combustibles está asociado con el aumento en las emisiones de material particulado y cambios en su composición química por adición de aerosoles ácidos y sulfatos. Por ejemplo, en el proceso de combustión de diésel aproximadamente el 98% del azufre contenido es oxidado a SO₂, el cual es emitido directamente a la atmósfera junto con diferentes gases y partículas generadas, afectando principalmente la calidad del aire [8].

La ciudad de Popayán, al igual que muchas ciudades intermedias del país, ha experimentado un cambio drástico en la urbanización, con crecimiento en el movimiento vehicular, aumento de contaminación atmosférica y pérdida de espacios agrícolas y áreas verdes. El sistema de transporte vehicular se encuentra como uno de los mayores contribuyentes de emisiones, presentadas principalmente en horas pico, donde se puede evidenciar gran congestión vehicular.

Las ciudades son fuentes concentradas de emisiones de CO₂ a la atmósfera. A nivel fundamental, las emisiones de CO₂ en las ciudades se pueden atribuir

principalmente a la combustión de combustibles fósiles como el petróleo, el carbón y el gas natural. La energía química almacenada en los hidrocarburos que componen estos combustibles fósiles se libera en forma de calor cuando se queman, y se produce CO₂ como subproducto de la combustión, a través de la oxidación [17]. En gran medida, ocurre un proceso similar dentro de los organismos vivos, como los humanos y la vegetación, que oxidan la materia orgánica para obtener energía. La vegetación es uno de los únicos sumideros de CO₂ dentro de las ciudades, asimilando el carbono atmosférico durante el día a través de la fotosíntesis.

La combustión de combustibles fósiles impulsa los patrones espaciales dominantes de las emisiones de CO₂ dentro de la ciudad. Los procesos clave incluyen las emisiones relacionadas con los automóviles, las emisiones industriales y la calefacción del hogar. Estos procesos simultáneamente emiten contaminantes, como NO_x y partículas finas. La producción de electricidad también libera grandes cantidades de CO₂ si la central eléctrica depende de combustibles fósiles (principalmente gas natural o carbón), pero para la mayoría de las ciudades de los países desarrollados, estas emisiones se producen fuera de los asentamientos urbanos debido a la preocupación por las emisiones secundarias de otras especies (p.e, NO_x, monóxido de carbono, material particulado) que conducen a la degradación de la calidad del aire.

Uno de los desafíos de cuantificar y comprender las emisiones de CO₂ de las ciudades son las variaciones a pequeña escala asociadas con las redes de carreteras, los edificios comerciales y las residencias que dan como resultado una heterogeneidad similar en los patrones de emisión. Las variaciones en las concentraciones de CO₂ atmosférico detectadas por las mediciones resultan de una combinación de las emisiones mencionadas con procesos meteorológicos, como la presencia de niebla.

De acuerdo con lo anterior, la pregunta de investigación se presenta a continuación:

¿Cuál es el estado actual de la calidad del aire en la zona donde se ubica la Corporación Universitaria Comfacauca sede Popayán con relación a lo exigido por la normatividad vigente?

1.3. JUSTIFICACIÓN

En la actualidad las ciudades hacen frente a un proceso creciente de urbanización, trayendo consigo sobrepoblación a las ciudades. Estudios realizados en el área metropolitana de la ciudad de México determinaron el incremento poblacional de este país, pasando en 1950 de un 6% a un 54% en 2016, y la previsión para 2050

es de un 66% [18]. El Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), reportó un incremento en la población Colombiana pasando en 1950 de un 3% a un 23% en 2019, con una proyección de crecimiento poblacional para 2050 de 80% [19]. Este incremento de población urbana ha ido acompañado de un aumento de consumo energético y transporte, generando gran contaminación atmosférica.

Los principales problemas de contaminación ambiental se presentan por los gases tóxicos emitidos en actividades industriales y de vehículos de combustión interna, con impacto directo sobre el medio ambiente y la salud pública. La exposición de las personas a estos tipos de contaminantes del aire, dependiendo de factores tales como tiempo y concentración, pueden provocar o agravar enfermedades respiratorias especialmente a la población más vulnerable como los niños y ancianos.

Teniendo en cuenta la problemática ambiental existente, es importante monitorear los niveles de contaminantes (en particular el CO₂) y comparándolos con la normatividad colombiana que regula el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible según resolución 2254 del 1 de noviembre del 2017. En la actualidad, se consigue realizar mediciones por diferentes metodologías, dentro de las cuales se encuentran los sensores electroquímicos. Por esta razón y debido a las ventajas de ser dispositivos de bajo costo, portátiles, de respuesta rápida y alta sensibilidad, se determinó su uso en el sistema de medición.

Con este proyecto de investigación, se pretende monitorear y conocer el estado actual de la calidad del aire en un punto estratégico de la Corporación Universitaria ComfacaUCA (UNICOMFACAUCA) sede Popayán, con la finalidad de verificar el cumplimiento de los parámetros de contaminantes establecidos por la resolución 2254 del 1 de noviembre del 2017, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Se ubicó un prototipo de monitoreo con sensores electroquímicos en el quinto piso del Bloque de Ingeniería Industrial, donde se realizó la medición de los contaminantes atmosféricos y se analizaron los respectivos datos, con el fin de generar un impacto social desde la concienciación de la comunidad universitaria, informándoles acerca de las condiciones de la calidad del aire, con el fin de evitar y disminuir el riesgo relacionado con enfermedades o muertes prematuras generadas por la polución ambiental, además de reducir los costos que éstas generan.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Determinar el estado actual de la calidad del aire en la Corporación Universitaria Comfacauca, sede Popayán - Cauca, de acuerdo con la resolución 2254 del 1 de noviembre del 2017, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar un prototipo de monitoreo con sensores electroquímicos para evaluar la calidad del aire en la Corporación Universitaria Comfacauca, sede Popayán – Cauca.
- Determinar la confiabilidad de los datos obtenidos con el prototipo diseñado por los estudiantes de la Corporación Universitaria Comfacauca, frente con los datos obtenidos con el sistema de monitoreo de CO₂ certificado.
- Contrastar si las mediciones obtenidas están dentro de los límites permisibles según la resolución 2254 del 1 de noviembre emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Socializar resultados y proponer alternativas a la comunidad estudiantil para la concientización frente a la problemática ambiental.

1.5. ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO

El documento está estructurado por seis (6) capítulos. Inicialmente se presentan las generalidades del proyecto, incluyendo una revisión de antecedentes presentados en la literatura, la descripción y formulación del problema, justificación, objetivos y marco teórico, incluyendo los conceptos, parámetros y la metodología necesaria para llevar a cabo el desarrollo de esta investigación. En el segundo capítulo se describe de forma detallada el proceso de diseño del prototipo de monitoreo y medición de la calidad del aire.

En el capítulo tres se describe la validación de los datos obtenidos en el proceso de medición con el prototipo diseñado por los estudiantes, con los datos obtenidos con un sistema de monitoreo y medición certificado, así como la comparación con los límites establecidos en la normativa vigente, y se explica la importancia del aporte alcanzado. El capítulo cuatro describe el contraste de mediciones realizado entre el prototipo propuesto por los estudiantes y un equipo de medición de calidad del aire certificado. El capítulo cinco corresponde a la evidencia de la socialización de resultados realizada por los autores de esta investigación. El último capítulo incluye una sección donde se describen las conclusiones principales con relación a los objetivos propuestos, sugerencias y alternativas que se podrían considerar para una o varias situaciones en el contexto de este trabajo.

1.6. MARCO TEÓRICO

Este marco teórico se basa principalmente en conocer la procedencia de contaminantes atmosféricos y sus características, y el daño que estos pueden causar al medio ambiente. Adicionalmente se investigó acerca de la normatividad legal vigente donde se indican los niveles máximos permisibles en la atmósfera, para ello, el cual solo representa un pequeño porcentaje de la normatividad designada por el Ministerio de Medioambiente y Desarrollo Sostenible.

1.6.1. Contaminación atmosférica

La revolución industrial incrementó la problemática medio ambiental relacionada con la contaminación atmosférica, como consecuencia de un aumento en los procesos productivos desarrollados en las fábricas, el aumento de medios de transporte y el uso consecuente de combustibles fósiles como fuente de energía. De esta forma, se ha integrado al medio ambiente sustancias como material particulado, dióxido de carbono, y otros elementos que son perjudiciales para la salud, como los óxidos de azufre y los óxidos de nitrógeno, provocando toxicidad y riesgo para la salud humana.

La calidad de aire hace referencia al estado en que se encuentra la atmósfera al nivel de la troposfera para poder garantizar la salud pública y una buena calidad de vida. Las principales fuentes de contaminación de la atmósfera se pueden clasificar en fuentes biogénicas o antropogénicas; las fuentes biogénicas son el resultado de fenómenos de la vida animal o vegetal, como las emisiones producidas por océanos, volcanes y erosión del suelo; y las fuentes antropogénicas se clasifican en fijas o móviles y son originadas por las actividades humanas realizadas diariamente como procesos industriales, mineros, artesanales, agropecuarios, domésticos [20].

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, han clasificado los contaminantes del aire como contaminantes criterios y no criterios. Dentro de los contaminantes criterios se encuentran el material particulado: PM10 y PM2,5, dióxido de carbono, monóxido de carbono, dióxido de azufre, ozono, provenientes principalmente de la combustión deficiente de sustancias como gas gasolina, queroseno, carbón, petróleo, tabaco o madera. Las chimeneas, las calderas, los calentadores de agua o calefactores y los aparatos domésticos que queman combustible, como las estufas u hornillas de la cocina o los calentadores a queroseno pueden producirlo si no están funcionando bien [21].

La exposición a estos contaminantes se relaciona con diversas enfermedades cardiovasculares, de las vías respiratorias como disminución de la capacidad pulmonar, bronquitis agudas, asma y se considera el culpable de los procesos alérgicos, sobre todo en niños. Otros efectos menores son la irritación ocular y de las mucosas.

1.6.2. Dióxido de carbono y su impacto en el medio ambiente

Los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural, han suministrado la energía que impulsó la Revolución Industrial y el desarrollo económico. Si bien el uso de combustibles fósiles ha contribuido a la mitigación de la pobreza y ha mejorado drásticamente el nivel de vida en el mundo, los efectos adversos de la combustión de combustibles fósiles son cada vez más evidentes.

Cuando el carbón, el petróleo y el gas natural se queman para obtener energía, el carbono que sirve como columna vertebral de estos combustibles fósiles se emite principalmente a la atmósfera como dióxido de carbono (CO₂), el gas de efecto invernadero clave responsable de la mayor parte del clima antropogénico [22]. La combustión de combustibles fósiles libera simultáneamente otros contaminantes del aire, como mercurio, óxidos de nitrógeno (NO_x), material particulado (PM) y compuestos orgánicos volátiles (COV).

Las ciudades, con sus poblaciones grandes y densas, son el lugar donde se produce una combustión sustancial de combustibles fósiles y donde se concentran los impactos de la contaminación del aire. A medida que la población mundial reside cada vez más en las ciudades, se magnifica el papel de las áreas urbanas en la determinación de la trayectoria futura de las emisiones de carbono. Debido a que las emisiones antropogénicas de carbono están íntimamente ligadas a la actividad socioeconómica a través de la combustión de combustibles fósiles, los esfuerzos de investigación sobre las emisiones de carbono de las ciudades brindan oportunidades para la participación de las partes interesadas y orientación sobre otros problemas ambientales, como la calidad del aire.

Además, ciudades y entidades subnacionales de todo el mundo han anunciado compromisos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. A pesar de los ambiciosos objetivos de muchas ciudades para la reducción de gases de efecto invernadero, verificar si estos objetivos se cumplen es una tarea difícil. El entorno urbano se caracteriza por una extrema heterogeneidad en el uso del suelo y la actividad humana [23]. Sin embargo, las ciudades también son escenarios donde se encuentran disponibles diversas observaciones y flujos de datos. Los ejemplos incluyen datos meteorológicos, monitoreo de la calidad del aire y una variedad de conjuntos de datos socioeconómicos, como datos de censos detallados, datos de redes de telefonía celular, información de tráfico y características del edificio. Cuando estos activos se combinan con los avances en instrumentación, computación y comunicaciones que se encuentran en el corazón de la revolución de las ciudades inteligentes, se puede avanzar en la cuantificación y comprensión de los procesos subyacentes que controlan las emisiones de carbono de las ciudades, lo que lleva a decisiones informadas sobre cómo implementar de manera más efectiva los objetivos de reducción de emisiones.

1.6.3. Dióxido de carbono y su efecto sobre la salud humana

El dióxido de carbono es un subproducto de la función celular normal cuando se exhala del cuerpo. El CO₂ también se produce cuando se queman combustibles fósiles o cuando se descompone la vegetación. Los suelos superficiales a veces pueden contener altas concentraciones de este gas, debido a la descomposición de la vegetación o cambios químicos en el lecho rocoso.

Donde los niveles de CO₂ en los suelos son altos, el gas puede filtrarse a los sótanos a través de paredes de piedra o grietas en pisos y cimientos. El CO₂ también puede acumularse en edificios que albergan a muchas personas o animales, y es un síntoma de problemas con la circulación de aire fresco en el edificio o en el hogar.

Los altos niveles de CO₂ pueden desplazar el oxígeno (O₂) y el nitrógeno (N₂), lo que podría causar problemas de salud.

No hay estándares de aire interior para CO₂; sin embargo, los niveles altos de dióxido de carbono en el aire interior podrían ser un indicador de que el sistema HVAC (calefacción, ventilación y aire acondicionado) no está funcionando correctamente.

La cantidad de dióxido de carbono en un edificio generalmente está relacionada con la cantidad de aire fresco que ingresa a ese edificio. En general, cuanto mayor sea el nivel de CO₂ en el edificio, menor será la cantidad de intercambio de aire fresco. Por lo tanto, examinar los niveles de CO₂ en el aire interior puede revelar si los sistemas HVAC están funcionando dentro de las pautas. Los niveles de CO₂ generalmente se miden en porcentaje (%) de aire o partes por millón (ppm). Los niveles altos de CO₂, generalmente por encima de 1000 ppm, indican un problema potencial con la circulación del aire y el aire fresco en una habitación o edificio. En general, los niveles altos de CO₂ indican la necesidad de examinar el sistema HVAC. Los altos niveles de dióxido de carbono pueden causar una mala calidad del aire e incluso pueden apagar las luces piloto de los aparatos que funcionan con gas.

La exposición al CO₂ puede producir una variedad de efectos en la salud. Estos pueden incluir dolores de cabeza, mareos, inquietud, hormigueo o sensación de hormigueo, dificultad para respirar, sudoración, cansancio, aumento del ritmo cardíaco, presión arterial elevada, coma, asfixia y convulsiones.

Los niveles de CO₂ en el aire y los posibles problemas de salud son [24]:

- 400 ppm: nivel medio de aire exterior.
- 400–1,000 ppm: nivel típico encontrado en espacios ocupados con buen intercambio de aire.
- 1000–2000 ppm: nivel asociado con quejas de somnolencia y aire deficiente.
- 2000–5000 ppm: nivel asociado con dolores de cabeza, somnolencia y aire viciado, viciado y estancado. También se pueden presentar problemas de concentración, pérdida de atención, aumento del ritmo cardíaco y náuseas leves.
- 5,000 ppm: esto indica condiciones de aire inusuales donde también podrían estar presentes altos niveles de otros gases. Podría ocurrir toxicidad o privación de oxígeno. Este es el límite de exposición permisible para exposiciones diarias en el lugar de trabajo.

- 40.000 ppm: este nivel es inmediatamente dañino debido a la privación de oxígeno.

1.6.4. Efecto de la temperatura y la presión sobre la medición de CO₂

El dióxido de carbono (CO₂) en el aire normalmente se mide en partes por millón (ppm). A 1000 ppm de CO₂, un volumen de aire que contenga un millón de moléculas de aire contendría una mezcla de 999 000 moléculas de aire y 1000 moléculas de CO₂.

El volumen de aire necesario para contener un millón de moléculas de aire se ve afectado por la temperatura y la presión del aire, también denominada presión barométrica. A medida que disminuye la presión, aumenta el volumen necesario para contener un millón de moléculas de aire. Lo contrario es cierto para la temperatura. A medida que disminuye la temperatura, disminuye el volumen de aire necesario para contener un millón de moléculas. Aunque el volumen de aire se ve afectado por la temperatura y la presión, la concentración de CO₂ no se ve afectada. Si comenzó con 1000 ppm de CO₂, terminará con 1000 ppm de CO₂ a pesar de los cambios en el volumen de aire.

Los sensores de CO₂ más comunes se conocen con el término de ingeniería infrarrojo no dispersivo o NDIR. Un sensor de CO₂ NDIR emite luz infrarroja a través de una muestra de gas en una cámara de muestras. Los fotodetectores sensibles miden la intensidad de la luz infrarroja después de que atraviesa la muestra de gas. Las moléculas de CO₂ son opacas a la luz infrarroja de 4,26 micrones, mientras que el resto de las moléculas de aire no lo son. Entonces, la intensidad de la luz infrarroja disminuye proporcionalmente al número de moléculas de CO₂ que están presentes. La medición de la intensidad de la luz resultante mide el número de moléculas de CO₂ presentes.

Como se explicó anteriormente, el número de moléculas de aire en un volumen determinado se ve afectado por la temperatura y la presión del aire, pero no por la concentración de CO₂ [25]. A presiones bajas o temperaturas altas, habrá menos moléculas de aire en la cámara de muestra, por lo que también habrá menos moléculas de CO₂, aunque las ppm de CO₂ no hayan cambiado. Menos moléculas de CO₂ “engañan” al sensor haciéndole pensar que la concentración de CO₂ es más baja de lo que realmente es. A altas presiones o bajas temperaturas, hay más moléculas de aire en la cámara de muestra y más moléculas de CO₂, aunque la concentración de CO₂ no haya cambiado. Más moléculas de CO₂ “engañan” al sensor haciéndole pensar que la concentración de CO₂ es más alta de lo que

realmente es. Por lo tanto, la calibración de un sensor de CO₂ solo será precisa a una temperatura y una presión de aire.

La Tabla 1 muestra cómo cambiaría la medición de CO₂ sin compensar con temperaturas de 32 °F a 110 °F. Las condiciones iniciales son 1000 ppm de CO₂, 77 °F y presión barométrica a nivel del mar. Como se ve en la tabla, la concentración de CO₂ varía en 150 ppm.

Tabla 1. Cambio de medición de CO₂ con temperatura

Temperatura (°F)	CO ₂ (ppm)
32	1092
35	1085
40	1074
45	1063
50	1053
55	1043
60	1033
65	1023
70	1013
75	1004
77	1000
80	994
85	985
90	976
95	968
100	959

Fuente: [25]

La presión barométrica se ve directamente afectada por la altitud, y la Tabla 2 muestra cómo cambiaría la medición de CO₂ no compensada con altitudes de -1000 a 10 000 pies. Las condiciones iniciales son 77°F y 1,000 ppm de CO₂ al nivel del mar. En este caso, la concentración de CO₂ varía en 349 ppm.

Tabla 2. Cambio de medición de CO₂ con altitud y presión barométrica

ALTITUD (PIES)	PRESIÓN BAROMÉTRICA (INCH HG)	CO ₂ (ppm)
-1000	31,02	1037
0	29,92	1000
1000	28,85	964
2000	27,82	930
3000	26,82	896
4000	25,84	864
5000	24,90	832
6000	23,98	801
7000	23,09	772
8000	22,23	743
9000	21,39	715
10000	20,58	688

Fuente: [25]

1.6.5. Niveles máximos permisibles

La Resolución 2254 de 2017, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece “los niveles máximos permisibles de contaminantes criterio: material particulado (PM10 y PM2.5), dióxido de azufre (SO₂), dióxido de nitrógeno (NO₂), ozono troposférico (O₃) y monóxido de carbono (CO)”.

Las concentraciones máximas permisibles para cada uno de los contaminantes considerados en este trabajo de investigación según Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible se presentan en la Tabla 3. Cuando las concentraciones se expresan en µg/m³, la norma corresponde al valor equivalente a presión normal, nivel del mar y a temperatura de 20 °C.

Tabla 3. Niveles máximos permisibles en la calidad del aire

CONTAMINANTE	NIVEL MÁXIMO PERMISIBLE (ug/m ³)	TIEMPO DE EXPOSICIÓN
PM 10	50	Anual
	75	24 horas
PM 2.5	25	Anual
	37	24 horas
SO ₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 hora
O ₃	100	8 horas
CO ₂	5000	8 horas
	35000	1 hora

Fuente: [26]

Tabla 4. Niveles de contaminación aire

NIVEL	DESCRIPCIÓN
Excelente	La calidad del aire es excelente, no presenta riesgo alguno para la salud humana
Bueno	La calidad del aire se considera satisfactoria, presenta poco o ningún riesgo
Moderado	La calidad del aire es aceptable; sin embargo, para algunos contaminantes puede haber un problema de salud moderado para un número muy reducido de personas que son excepcionalmente sensibles a la contaminación del aire
Bajo	Los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos en la salud. El público en general no es probable que se vea afectado
Insalubre	Todos pueden experimentar efectos en la salud; los miembros de grupos sensibles pueden experimentar efectos de la salud más serios

NIVEL	DESCRIPCIÓN
Peligroso	Advertencia de la salud de la condición de emergencia. Es más probable que toda la población se vea afectada

Fuente: [26]

1.6.6. Monitoreo de la calidad del aire

El monitoreo de la calidad del aire y de las variables meteorológicas se fundamenta en el conocimiento de la evolución de las concentraciones de los contaminantes, las tendencias, la ocurrencia de episodios de contaminación y el comportamiento de las variables meteorológicas que inciden directamente en las condiciones de mezcla y dispersión de contaminantes.

A continuación, se presenta la descripción de los sensores utilizados comúnmente para la medición de la calidad del aire.

Tabla 5. Descripción de los sensores para la medición de la calidad del aire

SENSOR	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
Dióxido de Carbono MG811	Diseñado para para capturar el CO ₂ en el ambiente	Voltaje 5 voltios o más, Salida digital DO (comparador), Salida analógica AO (amplificador), Salida comparador de temperatura, Potenciómetro para ajustar amplificación, Potenciómetro para ajuste de comparador, Peso 10 gramos [27]
Monóxido de Carbono MG811	Detecta el monóxido de carbono (CO) midiendo la concentración de este gas en el aire	Temperatura ambiente: -20°C ~ 50°C, Resistencia de calentamiento: 33 ω \pm 5 ω , Corriente de calefacción: \leq 180 mA, Energía de calefacción: \leq 900 mW, Salida análoga: 0.1 ~ 5 voltaje (a mayor concentración, mayor voltaje), Salida digital: TTL [28]

SENSOR	DESCRIPCIÓN	CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS
Sensor de Dióxido de Nitrógeno MICS 6814	Detecta varias clases de gases. Utiliza el Chip MICS-6814	Monóxido de Carbono CO: 1 ~ 1000 ppm, Dióxido de Nitrógeno NO ₂ : 0.05 ~ 10 ppm, Etanol C ₂ H ₅ OH: 10 ~ 500 ppm, Hidrógeno H ₂ : 1 ~ 1000 ppm, Amoníaco NH ₃ : 1 ~ 500 ppm, Metano CH ₄ : >1000 ppm, Propano C ₃ H ₈ : >1000 ppm, Iso-Butano C ₄ H ₁₀ : >1000 ppm. [29]
Dióxido de Azufre 1684-1038 ND	Detector de gas de dióxido de azufre	Fabricante: SPEC Sensors, LLC, Estado de la pieza: Activa, Tipo: Dióxido de sulfuro, Precisión: ±15%, Salida: USB, Temperatura de operación: -20°C ~ 40°C, Voltaje de la fuente: 2.6 ~ 3.6 voltios, Corriente – Suministro: 4mA. [30]
Material Particulado PWM A4-C6	Detector de material particulado, utilizado generalmente en la detección de la calidad del aire	Marca: MoreSunsDIY, Material: Mezcla, Tipo: Biosensor, Número de modelo: PM2.5 Sensor A4-CG Concentración de partículas, polvo, neblina, Se personaliza: Si, Salida: Sensor Digital, Teoría: Sensor de calidad del aire PM10, Uso: Sensor de Calidad de Aire PM10. [29]
Ozono MQ 131	Detector de ozono es una solución práctica y potente para aplicaciones que requieran censar el ozono	Voltaje de entrada: DC 5 voltios, Voltaje de salida: DC ~ 0.2 ~ 5 voltios, Rango de medición: 310 PPB – 2 PPM, Temperatura de operación: 20°C± 2°C, Humedad de operación: 65% ± 5% RH, Potencia nominal: 900 mW. [31]

Fuente: Elaboración propia

1.6.7. Arduino

Cada laboratorio que ejecuta algún tipo de investigación conductual utiliza varios tipos de equipos y software para el control experimental. El objetivo suele ser registrar eventos (conductuales o fisiológicos) y generar señales (es decir, controlar

o sincronizar diferentes máquinas). Tales tareas, en la mayoría de los casos, requieren una precisión de milisegundo a milisegundo y, por lo tanto, requieren una atención especial, ya que los sistemas operativos (OS) modernos no están diseñados para operar en tiempo real y con tanta precisión. Por lo tanto, se utilizan varios enfoques diferentes, como la programación de la tarea a través de paquetes de software dedicados y optimizados (es decir, E-Prime, Presentation, Psychophysics Toolbox para MATLAB, etc.) o la devolución de tareas críticas a hardware dedicado con alto rendimiento interno, relojes de precisión [32]. En ambos casos, la solución tiende a ser costosa (especialmente para placas externas), subóptima en la medida en que depende en gran medida de la precisión del sistema operativo (esto es válido para todo el software de control experimental) o inadecuada para experimentos específicos. Este último punto es particularmente cierto cuando se prueban varios participantes al mismo tiempo o en experimentos que requieren configuraciones portátiles o inalámbricas alimentadas por batería.

Sin embargo, en algunos casos, muchas tareas de bajo nivel no necesitan paquetes de software específicos ni placas costosas. Por ejemplo, si el experimentador desea que se active un evento cuando se detecta un evento a través de algunos sensores (es decir, sensor táctil, sensor de fuerza, etc.), no es necesario utilizar hardware o software costoso. De hecho, las placas de microcontroladores simples y económicas pueden resolver muchas de estas tareas de laboratorio. Dichos tableros son plataformas informáticas físicas basadas en un microcontrolador simple y un entorno de desarrollo para escribir software. Estos dispositivos se pueden usar para desarrollar objetos interactivos, tomando entradas de una variedad de interruptores o sensores y controlando una variedad de luces, motores y otras salidas físicas. Los proyectos de este tipo generalmente pueden ser independientes o pueden comunicarse con el software que se ejecuta en una computadora. Estas placas han existido durante varios años y, por lo general, ofrecen características similares que difieren solo en la arquitectura del procesador (ARM, ATMEGA, etc.), el lenguaje de programación (C/C++, BASIC, etc.) u otras características (es decir, el número de I/O canales, presencia de canales analógicos, etc.).

El hardware de Arduino consiste en un diseño de hardware abierto con un procesador Atmel AVR. Las placas Arduino se pueden comprar preensambladas, pero la información de diseño de hardware también está disponible para aquellos que deseen construirlas o modificarlas. El software que se utiliza consta de un lenguaje de programación estándar y un firmware que se ejecuta en la placa. El hardware de Arduino se programa utilizando un lenguaje C++ simplificado, en un IDE basado en procesamiento. A continuación, el software se compila y se carga a

bordo. Las placas Arduino también son compatibles con Flash, Processing, MaxMSP y MATLAB, y unas pocas líneas de código a menudo son suficientes para habilitar comportamientos bastante potentes. La estructura básica de programación de un Arduino se compone de al menos dos partes. Estos son los componentes de configuración y bucle. En la configuración, que se ejecuta al principio y solo una vez para configurar el modo pin o la comunicación en serie, se declaran las variables. La segunda parte se ejecuta en un bucle que permite que el script cambie, responda y controle la placa Arduino. Después de declarar las variables, el control de Arduino implica estructuras de control clásicas (SI, SI... DE LO CONTRARIO, FOR, etc.), operadores aritméticos (+, -, /, *, etc.) y operadores de comparación (>, <, etc.) o booleano (Y, O, etc.). También hay un conjunto de comandos para lectura y escritura analógica y digital, como `digitalwrite()` o `digitalread()`. Además, otros comandos pueden establecer retrasos temporales en milisegundos, realizar operaciones matemáticas y trigonométricas básicas (mín./máx., valor absoluto, raíz cuadrada, seno, coseno, etc.) o generar números aleatorios.

Dentro de las ventajas del uso de Arduino se encuentran:

- **Bajo costo.** Arduino es como la alternativa más económica del mercado.
- **Multiplataforma.** Arduino puede programarse utilizando sistemas operativos como Mac, GNU/Linux, Windows, etc.
- **Librerías.** Arduino cuenta con un amplio ecosistema de librerías que pueden reutilizarse.
- **Código abierto.** El código utilizado es abierto y asequible para la comunidad en general.

1.6.8. Sensor MG-811

El MG-811 es altamente sensible al CO₂ y menos sensible al alcohol y al CO. Se puede utilizar en el control de la calidad del aire, el proceso de fermentación, la aplicación de monitoreo del aire en interiores. El voltaje de salida del módulo cae a medida que aumenta la concentración de CO₂.

Las características de este sensor son [33]:

- Alta sensibilidad
- Rango de detección: 350 - 10 000 ppm CO₂
- Tiempo de respuesta: <60 s
- Voltaje del calentador: 6,0 V

- Dimensiones: 16 mm de diámetro, 15 mm de alto excluyendo pasadores, pasadores: 6 mm de alto

En la Tabla 6 se muestran las especificaciones del sensor.

Tabla 6. Especificaciones – Sensor MG-811

SÍMBOLO	PARÁMETRO	ESPECIFICACIÓN	OBSERVACIONES
V _H	Voltaje de calentamiento	6,0 ± 0,1V	AC o DC
R _H	Resistencia de calentamiento	30,0 ± 5% Ω	Temperatura ambiente
I _H	Corriente de calentamiento	@200 mA	-
P _H	Potencia de calentamiento	@1200 mW	-
T _{ao}	Temperatura de operación	-20 – 50	-
T _{as}	Temperatura de almacenamiento	-20 – 70	-
? E?M F	Salida	30 – 50 mV	350 – 10000ppm CO ₂

Fuente: [33]

1.6.9. Sensor DHT11

El DHT11 es un sensor de temperatura y humedad de uso común que viene con un NTC dedicado para medir la temperatura y un microcontrolador de 8 bits para generar los valores de temperatura y humedad como datos en serie.

Utiliza una tecnología de captura de módulos digitales dedicados y la tecnología de sensor de temperatura y humedad para garantizar productos con alta confiabilidad y excelente estabilidad a largo plazo. El sensor incluye un elemento resistivo y una sensación de dispositivos de medición de temperatura NTC húmedos, y con un microcontrolador de 8 bits de alto rendimiento conectado.

Las especificaciones de este sensor son [33]:

- Voltaje de funcionamiento: 3,5 V a 5,5 V
- Corriente de funcionamiento: 0,3 mA (medición) 60 uA (en espera)
- Salida: datos en serie
- Rango de temperatura: 0°C a 50°C
- Rango de humedad: 20% a 90%
- Resolución: la temperatura y la humedad son de 16 bits
- Precisión: $\pm 1^\circ\text{C}$ y $\pm 1\%$

1.7. MARCO CONCEPTUAL

A continuación, se presenta la descripción de los conceptos más relevantes en relación con la investigación realizada.

1.7.1. Dióxido de carbono

El dióxido de carbono es un gas incoloro formado durante la combustión de cualquier material que contenga carbono y un importante gas de efecto invernadero [34]. Toda producción de energía mediante combustión emite dióxido de carbono. Esto incluye la conducción de vehículos, la producción de electricidad, la calefacción, etc. También se produce por la descomposición de la materia orgánica en los suelos en condiciones oxidantes. El dióxido de carbono es un "gas de efecto invernadero" y es una de las principales causas del cambio climático inducido por el hombre.

1.7.2. Base de datos

Una base de datos es una colección organizada de información estructurada, o datos, normalmente almacenados electrónicamente en un sistema informático. Una base de datos generalmente está controlada por un sistema de administración de bases de datos (DBMS). Juntos, los datos y el DBMS, junto con las aplicaciones asociadas con ellos, se conocen como un sistema de base de datos, a menudo abreviado como simplemente base de datos [35].

Los datos dentro de los tipos más comunes de bases de datos en funcionamiento actualmente se modelan normalmente en filas y columnas en una serie de tablas para que el procesamiento y la consulta de datos sean eficientes. Luego, se puede acceder, administrar, modificar, actualizar, controlar y organizar fácilmente los

datos. La mayoría de las bases de datos utilizan lenguaje de consulta estructurado (SQL) para escribir y consultar datos.

Las principales propiedades de las bases de datos son:

- Integridad de los datos
- Acceso para múltiples usuarios de forma concurrente
- Seguridad en el acceso
- Respaldo de los datos
- Acceso a la información a través de lenguajes programáticos comunes

1.7.3. Fuentes emisoras de CO₂

Las principales fuentes globales de emisión de CO son la combustión incompleta de combustibles fósiles y biocombustibles, la quema de biomasa a cielo abierto y la oxidación de compuestos orgánicos volátiles (COV) en la atmósfera [36].

1.7.4. Coeficiente de correlación

Los coeficientes de correlación se utilizan para medir qué tan fuerte es una relación entre dos variables. Hay varios tipos de coeficientes de correlación, pero el más popular es el de Pearson. La correlación de Pearson (también llamada R de Pearson) es un coeficiente de correlación comúnmente utilizado en la regresión lineal. De hecho, cuando alguien se refiere al coeficiente de correlación, suele estar hablando del coeficiente de Pearson [37].

1.7.5. Coeficiente de Pearson

El coeficiente de correlación de Pearson (r) es una medida de la asociación lineal de dos variables. El análisis de correlación generalmente comienza con una representación gráfica de la relación de pares de datos usando un diagrama de dispersión [38]. Los valores del coeficiente de correlación varían de -1 a +1. Los valores positivos del coeficiente de correlación indican una tendencia de una variable a aumentar o disminuir junto con otra variable. Los valores negativos del coeficiente de correlación indican una tendencia a que el aumento de los valores de una variable se asocie con la disminución de los valores de la otra variable y viceversa. Los valores del coeficiente de correlación cercanos a cero indican una baja asociación entre variables, y los cercanos a -1 o +1 indican una fuerte asociación lineal entre dos variables. El cuadrado del coeficiente de correlación es

el coeficiente de determinación, que da la proporción de la variación de una variable que puede explicarse a partir de la variación de la otra variable.

1.7.6. Prueba de Chi cuadrado

La prueba Chi cuadrado es un procedimiento estadístico para determinar la diferencia entre los datos observados y esperados. Esta prueba también se puede utilizar para determinar si se correlaciona con las variables categóricas de nuestros datos. Ayuda a averiguar si una diferencia entre dos variables categóricas se debe al azar o a una relación entre ellas [39].

Chi-cuadrado es una prueba estadística que examina las diferencias entre las variables categóricas de una muestra aleatoria para determinar si los resultados esperados y observados se ajustan bien.

Estos son algunos de los usos de la prueba Chi-cuadrado:

- La prueba de Chi-cuadrado se puede usar para ver si los datos siguen una distribución de probabilidad teórica bien conocida como la distribución Normal o Poisson.
- La prueba de chi-cuadrado le permite evaluar la bondad de ajuste del modelo de regresión entrenado en los conjuntos de datos de entrenamiento, validación y prueba.

1.8. MARCO GEOGRÁFICO

El proyecto de investigación se llevó a cabo en el piso 5 del bloque A de la facultad de Ingeniería Industrial, de la Corporación Universitaria Comfacauca - UNICOMFACAUCA, ubicada en la calle 4 N° 8 – 30 sector histórico de la ciudad de Popayán – Cauca.

Ilustración 1. Ubicación de universidad Unicomfacauca



Fuente: [40]

1.9. MARCO LEGAL

A continuación, se presenta la normatividad relacionada con la calidad del aire y su medición en el país.

Tabla 7. Normatividad calidad del aire

NORMATIVIDAD	OBJETO
Ley 253 de 1996	“Por medio de la cual se aprueba el Convenio de Basilea sobre el control de los movimientos transfronterizos de los desechos peligrosos y su eliminación”
Decreto 948 de 1995	“Por el cual se reglamentan, parcialmente, la Ley 23 de 1973, los artículos 33, 73, 74, 75 y 76 del Decreto - Ley 2811 de 1974; los artículos 41, 42, 43, 44, 45, 48 y 49 de la Ley 9 de 1979; y la Ley 99 de 1993, en relación con la prevención y control de la contaminación atmosférica y la protección de la calidad del aire”
Resolución 2254 de 2017	“Por la cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones”
Resolución 1962 de 2017	“Por la cual se expide el límite del indicador de cociente del inventario de emisiones de gases de efecto invernadero del Etanol Anhidro Combustible Desnaturalizado y se adoptan otras disposiciones”
Resolución 1447 de 2018	“Reglamenta el sistema de monitoreo, reporte y verificación de las acciones de mitigación a nivel nacional”
Resolución 650 de 2010	“Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire”

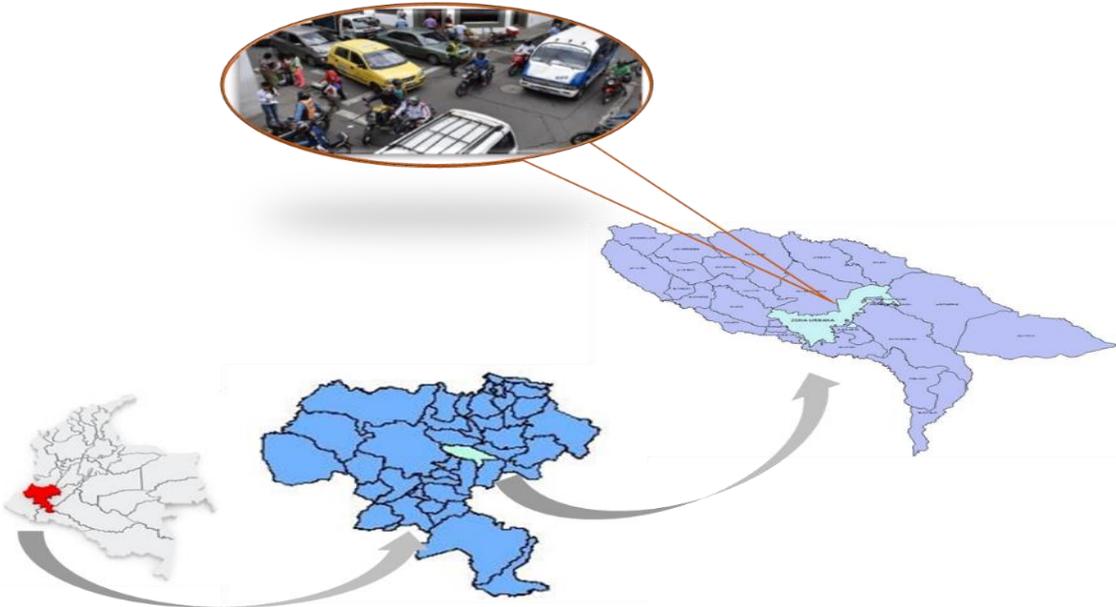
Fuente: [26], [41] y [42]

1.10. MARCO METODOLÓGICO

El punto de monitoreo para el estudio de calidad de aire se realizó en la Corporación Universitaria Comfacauca - UNICOMFACAUCA, ubicada en la calle 4 N° 8 – 30 sector histórico de la ciudad de Popayán – Cauca (Ver

Ilustración 2).

Ilustración 2. Punto de muestreo Corporación Universitaria Comfacauca – UNICOMFACAUCA

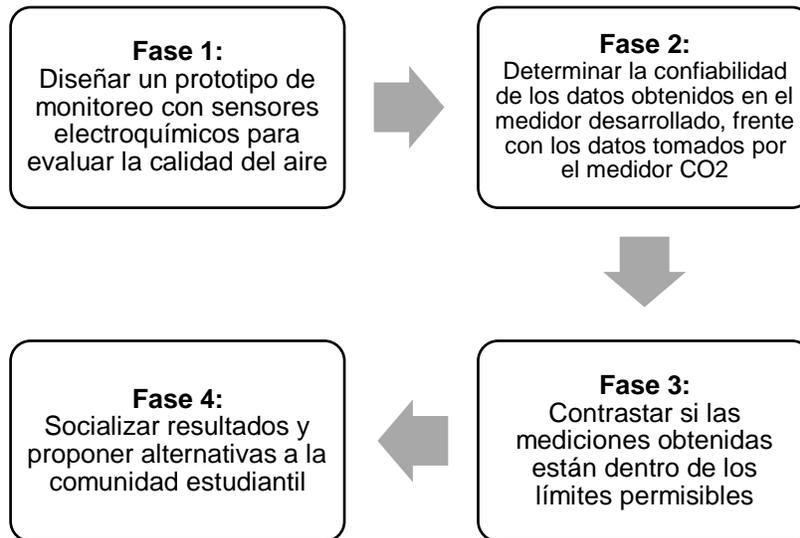


Fuente: Elaboración propia, tomado de imágenes Google

La metodología desarrollada para este trabajo investigativo es cuantitativa de tipo explicativo, en concordancia con lo establecido por Creswell (2009). Una investigación de este tipo busca explicar relaciones de causalidad en torno a una problemática o fenómeno a estudiar, generando conclusiones a partir de la toma y análisis de información cuantitativa.

En la Ilustración 3 se presenta el marco metodológico propuesto.

Ilustración 3. Metodología



Fuente: Elaboración propia

1.8.1. POBLACIÓN Y MUESTRA

Para el cálculo del tamaño de muestra de la investigación, es importante resaltar que la población objetivo es finita, teniendo en cuenta que se realizaron en promedio 16.581 mediciones al día, durante siete (7) días consecutivos, con el prototipo diseñado por los estudiantes. Aguilar-Barojas [44] propone la siguiente formulación “cuando se conoce el total de unidades de observación que la integran o la población es menor a 10.000”:

Ecuación 1. Cálculo de muestra para población finita

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q}$$

Fuente: [44]

Donde:

n = Tamaño de muestra

Z = Valor de Z crítico, calculado en las tablas del área de la curva normal. Llamado también nivel de confianza

N = Tamaño de la población o universo

p = Probabilidad de ocurrencia (éxito) del evento estudiado

q = (1 – p) = Probabilidad de no ocurrencia del evento

e = Error de estimación máximo aceptado

Población: La población o universo de esta investigación corresponde a los datos recopilados con el el prototipo diseñado y elaborado por los estudiantes. En este caso, se tomaron en promedio 16.581 datos diarios, durante siete (7) días consecutivos, para un total de 116.066 datos.

Muestra: Considerando una probabilidad de éxito (p) del 50% y una probabilidad de falla (q) del 50%, un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%, se estima una muestra de 383 datos de CO₂:

$$n = \frac{166.066 * (1,96)^2 * 0,5 * 0,5}{(0,05)^2 * (166.066 - 1) + (1,96)^2 * 0,5 * 0,5} \cong 383$$

1.8.2. VARIABLES DE ESTUDIO

Las variables que se midieron en este estudio corresponden a la concentración del contaminante CO₂, junto con medidas como humedad y temperatura:

Variable	Característica	Unidad de medición
Concentración del contaminante CO ₂	Rango entre 400 y 5000 ppm dependiendo de la calidad del aire	Ppm
Temperatura	Medición del calentamiento o enfriamiento del aire	°C
Humedad	Cantidad de vapor en el aire	%

1.8.3. TÉCNICAS PARA LA RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Para la recolección de datos se utilizó el prototipo diseñado, el cual realizaba la toma de los datos a través del sensor utilizado y los almacenaba en la herramienta de diario de campo. Adicionalmente, se utilizó la herramienta ofimática de Microsoft Excel para trasladar los datos obtenidos a tablas para su análisis correspondiente.

Esta herramienta también permite realizar la comparación de los datos obtenidos con el sistema propuesto, contra los datos obtenidos con un equipo para la medición

de CO₂ calibrado. Para el desarrollo del proyecto y la comparación con el sistema certificado, se utilizaron herramientas estadísticas como prueba de chi cuadrado.

Tabla 8. Actividades y fases

FASE	ACTIVIDAD	INSTRUMENTO	PRODUCTO
<p><u>FASE 1:</u></p> <p>Diseñar un prototipo de monitoreo con sensores electroquímicos para evaluar la calidad del aire en la Corporación Universitaria Comfacauca, sede Popayán – Cauca.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Selección y cotización de los sensores y microcontrolador. ● Diseño y montaje del prototipo. ● Verificación la calidad de medición de sensores. ● Programación del código. <p>Diseño de sistema de almacenamiento de datos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Sensores. ● Protoboard. ● Jumpers. ● Placa Arduino. ● Cable de comunicación. (USB) ● C++ ● Base de datos. 	<p>Prototipo de monitoreo calidad del aire</p>
<p><u>FASE 2:</u></p> <p>Determinar la confiabilidad de los datos obtenidos en el medidor desarrollado, frente con los datos tomados por el medidor certificado de CO₂.</p>	<p>Verificación de la conformidad de los datos de acuerdo con la normatividad vigente y su cumplimiento.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Análisis de datos. ● Normatividad vigente (Resolución 2254 de 2017). 	<p>Datos de concentración atmosférica</p>
<p><u>FASE 3:</u></p> <p>Contrastar si las mediciones obtenidas están dentro de los límites permisibles según la resolución 2254 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.</p>	<p>Verificar los resultados encontrados en la investigación de la calidad del aire.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Análisis de datos. ● Presentación oral. 	<ul style="list-style-type: none"> ● Informe de datos sobre emisiones. ● Informe de resultado de análisis de datos.
<p><u>FASE 4:</u></p>	<p>Realizar la socialización de los</p>	<ul style="list-style-type: none"> ● Poster. ● Presentación 	<p>Evidencia de socialización de</p>

FASE	ACTIVIDAD	INSTRUMENTO	PRODUCTO
Socializar resultados y proponer alternativas a la comunidad estudiantil para la concientización frente a la problemática ambiental.	resultados obtenidos a la comunidad	oral.	resultados del proyecto a la comunidad.

Fuente: Elaboración propia

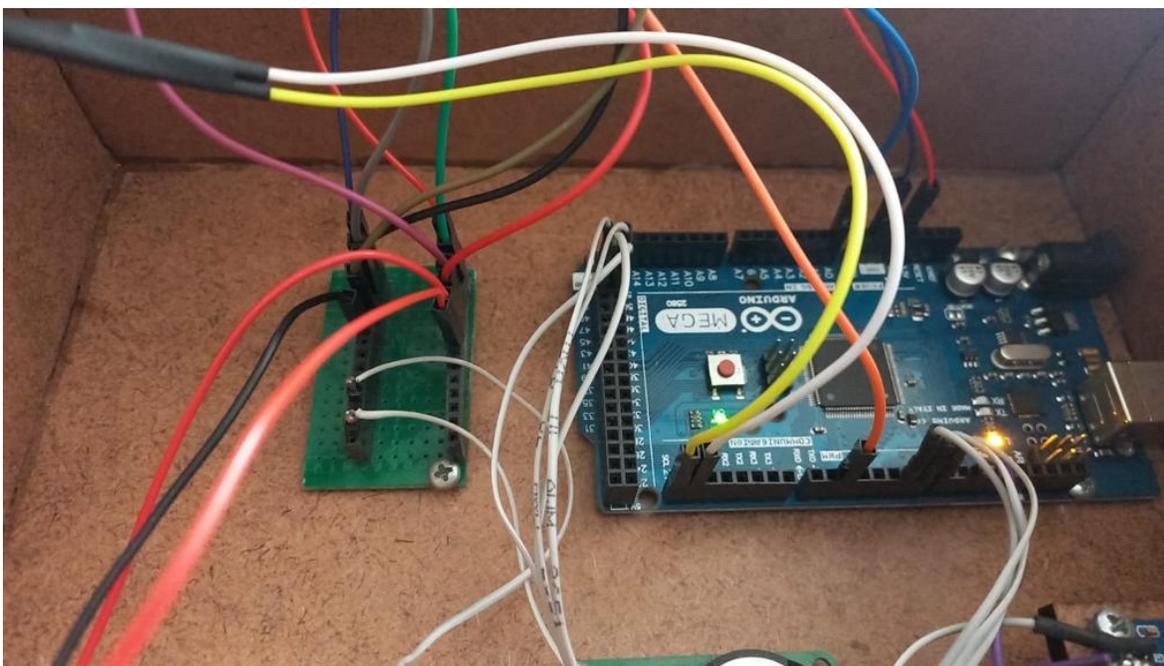
CAPÍTULO 2. DISEÑO DE PROTOTIPO DE MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE (CONCENTRACIÓN DE CO₂)

A continuación, se detallan los elementos correspondientes al diseño y montaje del prototipo de monitoreo de CO₂.

2.1. DISEÑO DEL PROTOTIPO DE MONITOREO

En las ilustraciones Ilustración 4 y Ilustración 5 se puede observar el diseño interno del prototipo de medición de CO₂, el cual está constituido por una placa Nano IO Shield, encargada de proveer pines de conexión al Arduino. Este microcontrolador es el encargado de llevar a cabo el proceso de captura de los datos que son recolectados por el sensor de medición (MG811), que censa los niveles de concentración de CO₂, teniendo en cuenta las recomendaciones del fabricante.

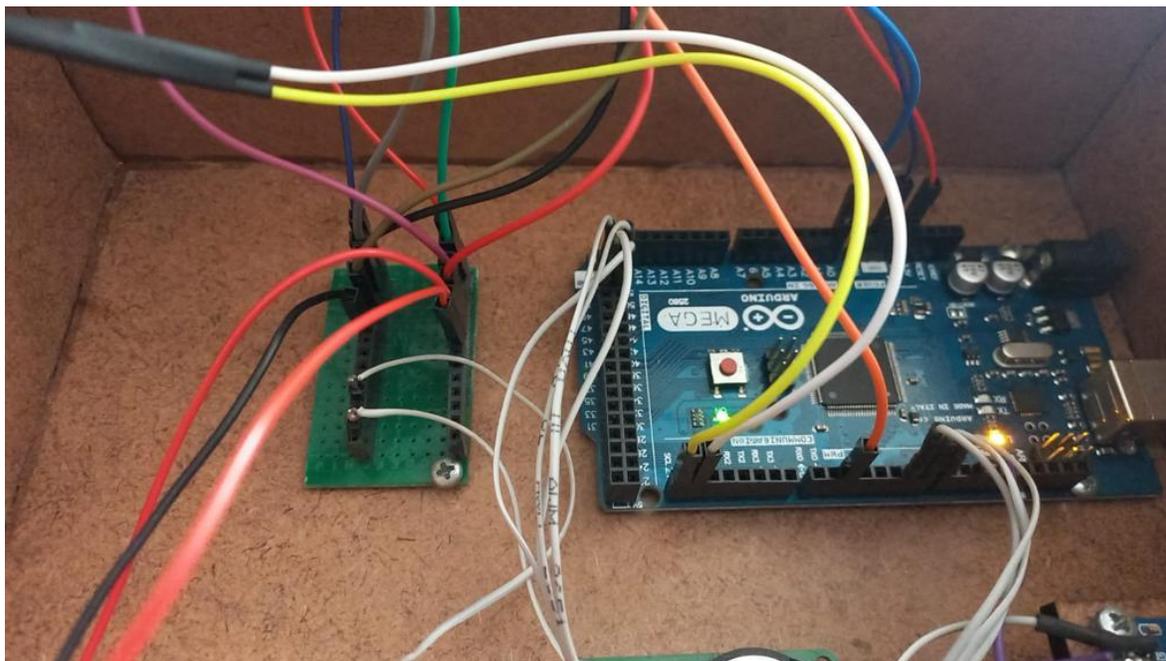
Ilustración 4. Conexión interna – Prototipo de medición de CO₂



Fuente: Elaboración propia

En la Ilustración 5 se pueden observar las conexiones físicas que tiene la tarjeta donde fueron soldados todos los elementos que componen el prototipo de medición de CO₂.

Ilustración 5. Conexión Arduino y sensores – Prototipo de medición de CO₂



Fuente: Elaboración propia

Se utilizó una plataforma Arduino Uno, basada en un microcontrolador AT mega 328P que tiene catorce pines de entrada/salida, y una conexión a un ordenador por puerto USB. El programa de medición habilita apropiadamente el uso de los sensores electroquímicos y envía mediciones cada tres segundos (3 s) a un terminal propio de esta plataforma (Arduino).

Además, se diseñó una base de datos que permitió realizar la lectura y captura de los datos, en la bitácora de trabajo de campo correspondiente. Los datos almacenados se analizaron y se contrastaron con la normatividad legal vigente.

2.2. CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

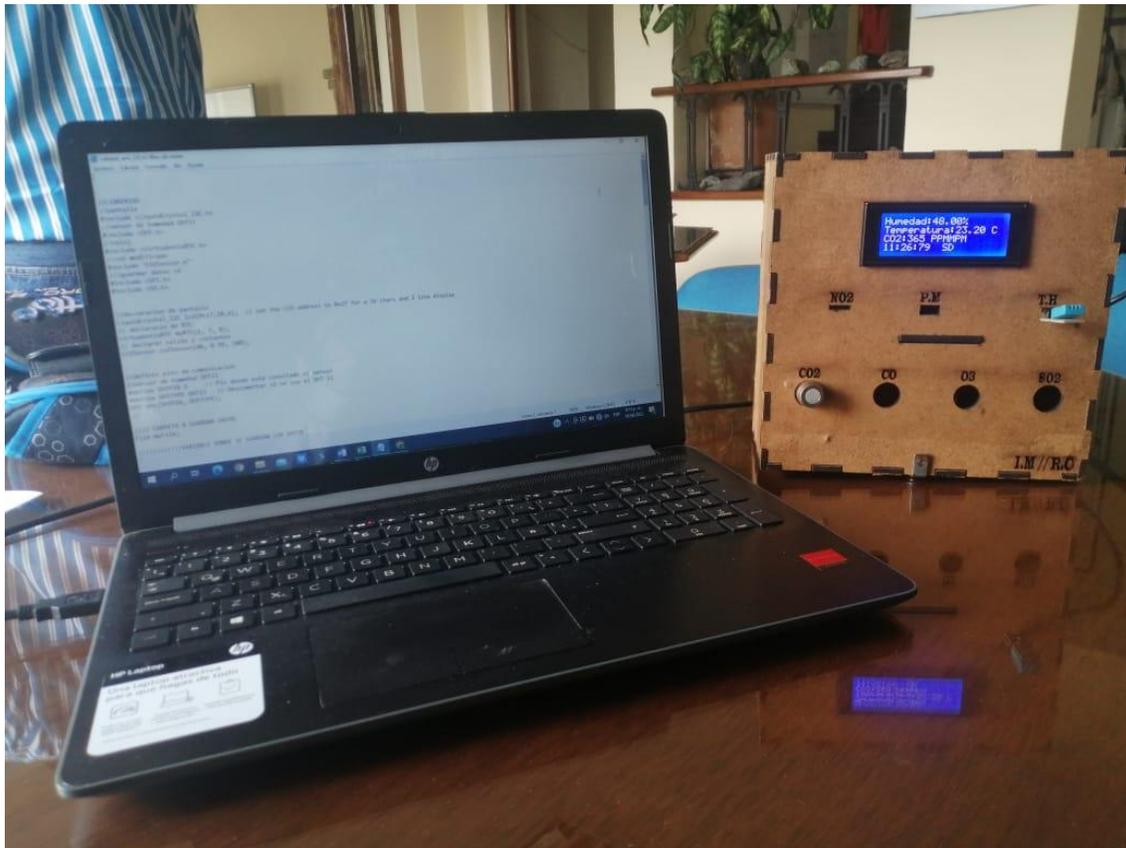
A continuación, se presentan los esquemas de montaje y ensamblaje del prototipo de monitoreo de CO₂ (Ver Ilustración 6). El prototipo diseñado está compuesto por tres (3) sensores (MQ-2, MQ-7 y MG-811), y una placa de microcontrolador Arduino nano.

El prototipo tiene un sensor digital de temperatura y humedad relativa del aire (sensor DHT11). Cuenta con una salida de señal digital calibrada, que se conecta a un microcontrolador de 8 bits. Mide parámetros de temperatura en grados centígrados y humedad en porcentaje entre el 65% ± 51%, y muestra el consumo

de batería del prototipo, actualizando de forma automática los valores recopilados en pantalla.

El prototipo presenta una alta sensibilidad al gas natural, y cuenta con una alarma acústica que advierte cuando la concentración de CO₂ excede el límite establecido.

Ilustración 6. Esquema de ensamblaje de prototipo de monitoreo de CO₂



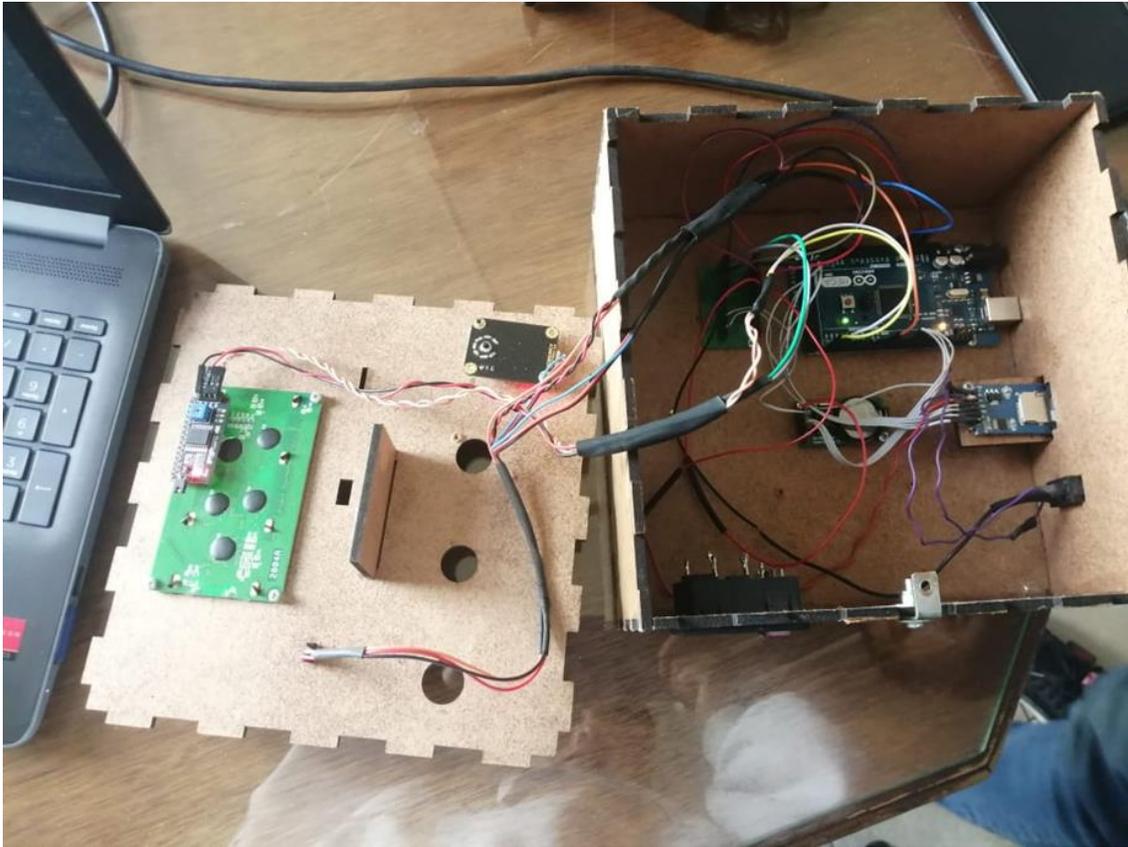
Fuente: Elaboración propia

Previo al ensamblaje de los elementos del prototipo, se realizó una indagación para identificar cuáles entradas de conexión eran óptimas para obtener el mejor funcionamiento del equipo, teniendo en cuenta que maneja entradas analógicas y digitales, y traen los sensores de medición de gases.

Las entradas digitales permiten obtener una lectura verdadera o falsa de la medición, lo que permite conocer si un sensor detecta el gas para el cual esta predeterminado. Por consiguiente, con esta entrada no puede realizarse un análisis más detallado de los valores que se puede llegar a medir. Asimismo, las entradas analógicas permiten tener un control de los valores que puede llegar a captar los sensores y realizar un análisis de rangos de operación de acuerdo con los valores

predeterminados. Las entradas analógicas permiten medir valores de concentración en ppm (Ver Ilustración 7).

Ilustración 7. Ensamblaje interno de prototipo de monitoreo de CO₂



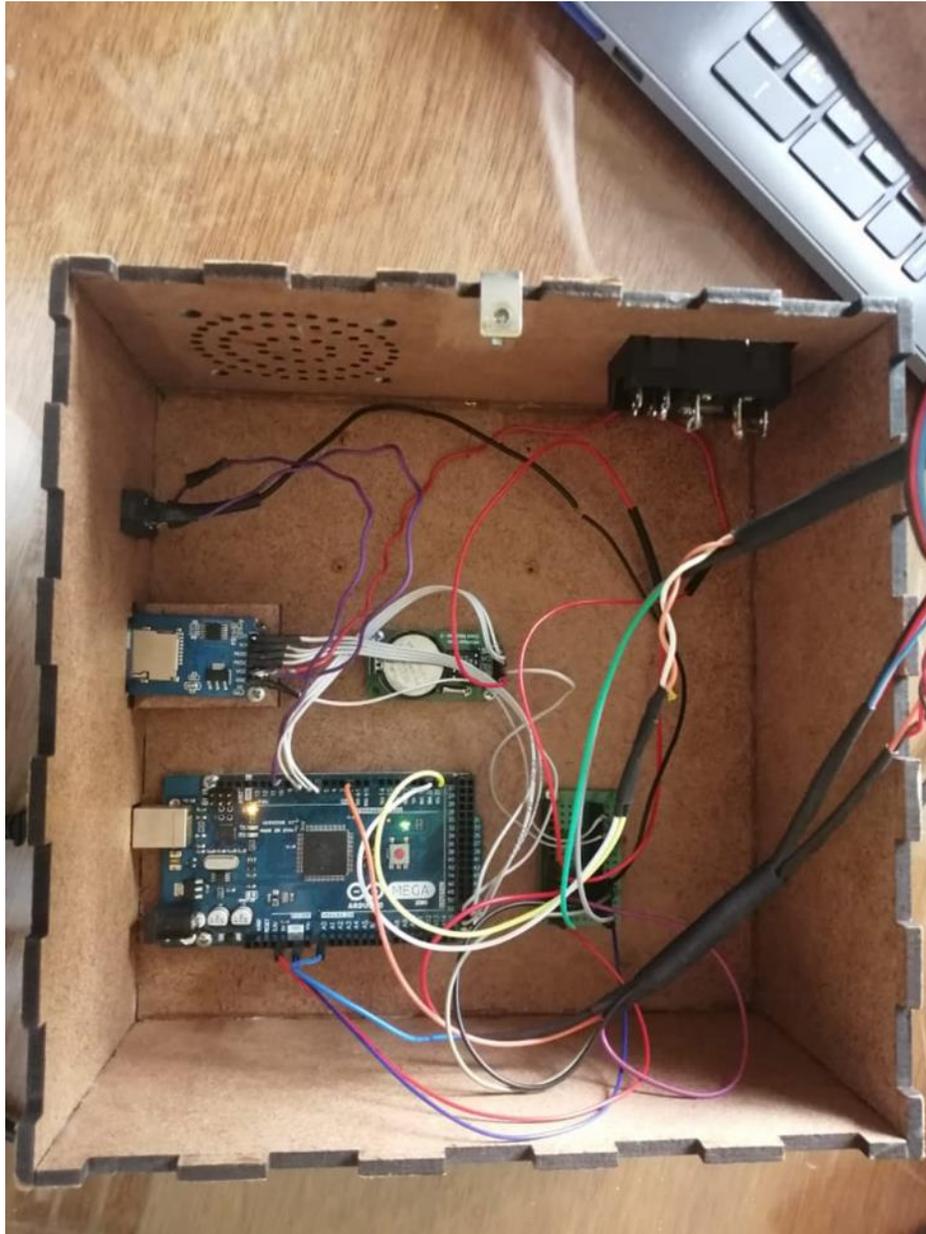
Fuente: Elaboración propia

2.3. CONFIGURACIÓN DE LOS SENSORES DEL PROTOTIPO

La configuración de los sensores se desarrolló en la plataforma del lenguaje ensamblador de Arduino, declarando cada entrada analógica a través de la cual la placa va a hacer la lectura de datos de los sensores (Ver Ilustración 8).

El sensor MG-811 es sensible a la medición de Dióxido de carbono (CO₂), según lo indica el fabricante en su Hoja de datos. Este sensor está conectado de forma analógica a la placa del Arduino, y su lectura de datos se realiza por el pin A2 como se puede apreciar en la Ilustración 9 de la declaración de la programación de dicho sensor.

Ilustración 8. Conexión a Arduino



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 9. Código de programación – Prototipo de medición de CO2

```
//LIBRERIAS
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <DHT.h>
#include <virtuabotixRTC.h>
#include "CO2Sensor.h"
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

virtuabotixRTC myRTC(6, 7, 8);
CO2Sensor co2Sensor(A0, 0.99, 100);
#define DHTPIN 2
#define DHTTYPE DHT11
.
.
.
myFile = SD.open("clima.txt", FILE_WRITE);
lcd.setCursor(10, 3);
lcd.print("SD");
if (myFile) {
  myFile.print("hora:");
  myFile.print(hor);
  myFile.print(" ,minuto: ");
  myFile.print(minu);
  myFile.print(" ,segundo: ");
  myFile.print(seg);
  myFile.print(" ,humedad: ");
  myFile.print(hum);
  myFile.print(" ,temperatura: ");
  myFile.print(tem);
  myFile.print(" ,co2: ");
  myFile.println(c02);

  myFile.close();
} else {
  lcd.setCursor(10, 3);
  lcd.print("101");
}
}
```

Fuente: Elaboración propia

2.4. ANÁLISIS DE DATOS

2.4.1. PRUEBAS DE CAMPO

Con el fin de realizar las pruebas de campo correspondientes, se realizó la instalación del prototipo de monitoreo y medición de calidad de aire en el Bloque A, en el quinto piso del bloque de Ingeniería Industrial de la Universidad Unicomfauca, como se muestra en la Ilustración 10.

Para la realización de la prueba de la funcionalidad del prototipo diseñado y ensamblado, se utilizó una hoja de celulosa provocando una reacción de

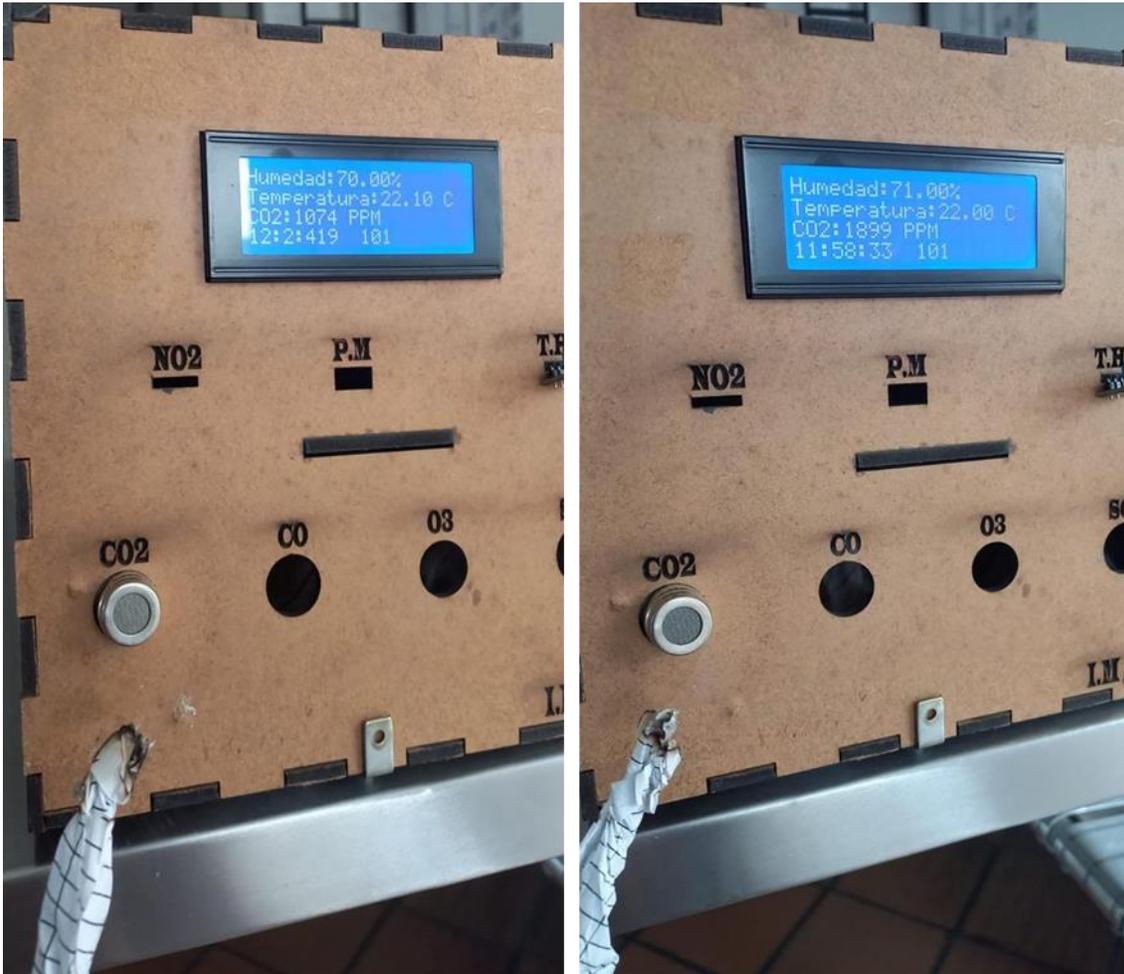
combustión del sensor, donde se evidenció automáticamente un aumento en los datos captados por el mismo como se muestra en la Ilustración 11.

Ilustración 10. Instalación de prototipo para toma de datos



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 11. Prueba de funcionalidad – Prototipo diseñado



Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 9 se presentan las características de los sensores utilizados en la construcción del prototipo de monitoreo diseñado, donde se puede encontrar la función, la escala la resolución y precisión de los sensores utilizados en la investigación.

Tabla 9. Características – Sensores utilizados en prototipo de monitoreo de CO2 diseñado

FUNCIÓN	ESCALA	RESOLUCIÓN	PRECISIÓN
CO2	10 a 1000 ppm	1 ppm	± (5%rdg + 50 ppm)
	1000 ppm a 10000 ppm	1 ppm	No especificada

FUNCIÓN	ESCALA	RESOLUCIÓN	PRECISIÓN
Temperatura	-10 a 60°C	0,1°	± 0,6 °C / 0,9 °C
	14 a 140°C		
Humedad	0 a 65%	0,1°	± 5% (10 a 65%)
	>10 o >65%		± 5% (>10 o >65%)

Fuente: Elaboración propia

2.4.2. TOMA DE DATOS

Luego de verificar que el prototipo diseñado realiza correctamente la toma de datos en las pruebas de campo, se procedió a la toma de datos finales. Con la toma total de 116.066 datos cada tres (3) segundos, durante un período de siete (7) días continuos, de lunes a sábado, de 8:00 AM a 6:00 PM, en el mes de agosto del año 2022. Es importante resaltar que la toma de los datos fue realizada de forma automática y autónoma por parte del prototipo diseñado, y se almacenaron en la bitácora de trabajo de campo.

CAPÍTULO 3. VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD DE DATOS

3.1. VALIDACIÓN DEL SISTEMA PROPUESTO

Para la validación del sistema se realizó la actividad de confiabilidad de los datos obtenidos, utilizando métodos estadísticos como el método de mínimos cuadrados y el cálculo de índice de correlación de Pearson. A través del coeficiente de correlación de Pearson se realizó una prueba para medir la relación estadísticamente entre dos variables que son continuas.

Con el fin de validar los datos obtenidos con el prototipo de monitoreo diseñado, se hizo revisión de los datos tomados con el prototipo y con el equipo calibrado de monitoreo de Ingeominas sede Popayán (Ver ilustraciones Ilustración 12 y Ilustración 13). En la Tabla 10 se presentan las características de función, escala, resolución y precisión de los sensores integrados en el equipo calibrado en Ingeominas Popayán.

Tabla 10. Características – Sensores equipo de monitoreo de Ingeominas Popayán

FUNCIÓN	ESCALA	RESOLUCIÓN	PRECISIÓN
CO2	10 a 1000 ppm	1 ppm	$\pm (5\%rdg + 50 \text{ ppm})$
	1000 ppm a 10000 ppm	1 ppm	No especificada
Temperatura	-10 a 60°C	0,1°	$\pm 0,6 \text{ °C} / 0,9 \text{ °C}$
	14 a 140°C		
Humedad	0 a 65%	0,1°	$\pm 5\% (10 \text{ a } 65\%)$
	>10 o >65%		$\pm 5\% (>10 \text{ o } >65\%)$

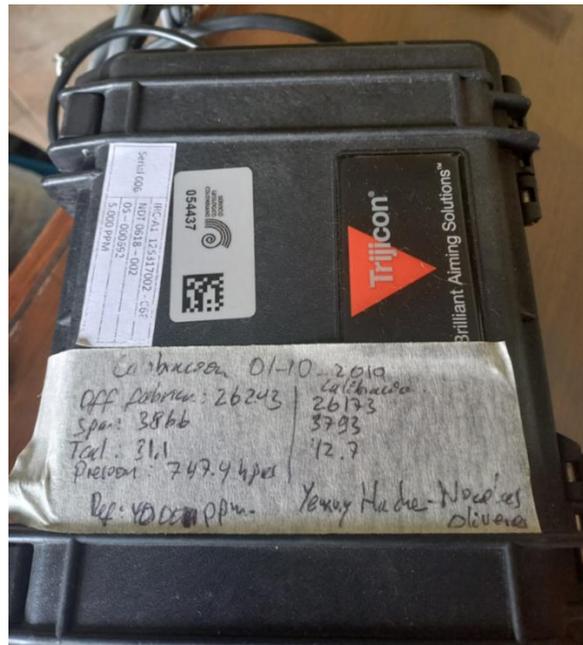
Fuente: [33]

Ilustración 12. Validación del prototipo diseñado



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 13. Sistema de monitoreo de ingeominas



Fuente: Elaboración propia

Para identificar si se presentan variaciones en las mediciones realizadas con el prototipo diseñado por los estudiantes, se realizó una prueba de Repetibilidad en Excel, utilizando la prueba Gage R&R de RealStatistics [45]. Es necesario resaltar que el Vocabulario Internacional de Metrología (VIM) define el concepto de

repetibilidad como “condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye el mismo procedimiento de medida, los mismos operadores, el mismo sistema de medida, las mismas condiciones de operación y el mismo lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto o de un objeto similar en un periodo corto de tiempo”.

Por su parte, la reproducibilidad hace referencia a “condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye diferentes lugares, operadores, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares”. Teniendo en cuenta que no se realizaron las mediciones con estos cambios, no se realiza una prueba de reproducibilidad en esta investigación.

Para la realización del análisis de Gage R&R en la modalidad de repetibilidad, se estableció una directriz para la identificación del porcentaje del proceso de variación en el sistema de medición de la calidad del aire (Ver Tabla 11), así como la variación provocada por el prototipo diseñado.

Tabla 11. Porcentaje de proceso de variación – Prueba repetibilidad

% variación	Decisión
<10%	El sistema es aceptable
Entre 10% y 30%	El sistema es potencialmente aceptable
>30%	El sistema es inaceptable

Fuente: [12]

En la Tabla 12 se presentan los resultados de la prueba de repetibilidad realizada a los datos obtenidos con el prototipo diseñado en el proyecto.

Tabla 12. Prueba repetibilidad

1	SS	df	MS	F	p-value	sig
Part	2642329,82	6	440388,303	1	0,5	-
Operator	114718721	1	114718721	260,494479	3,597E-06	-
Operator*Part	2642329,82	6	440388,303	776,663976	0	yes
Repeatability	3032452,54	5348	567,025531			
Total	123035834	5361	22950,1648			
VARIATION						

¹ SS: Suma de cuadrados. Df: Grados de libertad. MS: Promedio de los cuadrados. F: Prueba F. p-value: P valor. Sig: Significancia

	Var	%	Std Dev	%		
Tot Gage R&R	44340,6481	100,0%	210,572192	100,0%		
- Repeatability	567,025531	1,3%	23,8122979	11,3%		
-- Operator	42625,2641	96,1%	206,458868	98,0%		
-- Op*Part	1148,35843	2,6%	33,8874376	16,1%		
Part-to-Part	0	0,0%	0	0,0%		
Tot Variation	44340,6481	100,0%	210,572192	100,0%		

Fuente: Elaboración propia

Para la variable del rango de CO₂ y teniendo en cuenta la tabla anterior, los resultados indican que el valor determinado por análisis de repetibilidad se ubicó en el 11,3%. En consecuencia, el prototipo de medición de CO₂ desarrollado por los estudiantes de la Corporación Universitaria Comfacauca - Unicomfacauca, es un prototipo potencialmente aceptado para el uso de toma de datos en el estudio de campo, bajo las mismas condiciones de operación, temperatura, procedimiento de medición, lugar y sistema de medida.

3.2. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS MEDICIONES

Para validar los datos obtenidos con el prototipo de monitoreo propuesto, se realizó la revisión de los datos tomados con el medidor propuesto y con el prototipo de monitoreo de Ingeominas sede Popayán, con el fin de utilizar coeficientes de relación sobre las variables cuantitativas medidas. Para establecer la correlación de los datos, se utilizó el Método de Mínimos Cuadrados, donde se minimiza el error de la relación calculada frente a hecho real, lo que implica minimizar la desviación típica de los residuos de la regresión (Error cuadrático medio).

Ecuación 2. Error cuadrático medio

$$ECM = \frac{\sum_{i=1}^n (e_i)^2}{n}$$

Fuente: [46]

Donde:

n = Número de observaciones

$e_i = (\gamma_i - \hat{\gamma}_i)$ = Diferencia entre las observaciones reales y el estimado

De acuerdo con lo anterior, se aplicó la fórmula de error cuadrático medio (ECM) para comparar las mediciones del prototipo diseñado contra las mediciones

realizadas con el equipo calibrado de Ingeominas, utilizando 523 mediciones, tanto para la temperatura como para la medición de CO₂. El resultado para el ECM de temperatura fue de 0,999, lo que es un valor que da cuenta de la cercanía de la medición del prototipo diseñado a la realidad. Considerando que, cuanto más pequeño sea el ECM, mejor es el estimador, es posible indicar que el prototipo diseñado realiza una buena medición, asegurando la confiabilidad de los datos obtenidos.

El resultado para el ECM de CO₂ fue de 180,187. Considerando que, cuanto más pequeño sea el ECM, mejor es el estimador, es posible indicar que el prototipo diseñado realiza la medición de CO₂, pero podría presentar mejoras en términos de ajuste para realizar una mejor medición de este gas.

Por otra parte, se realizó el cálculo del coeficiente de correlación de Pearson para medir la relación estadísticamente entre dos variables que son continuas.

Ecuación 3. Coeficiente de correlación de Pearson

$$r_{xy} = \frac{\sum Z_x Z_y}{N}$$

Fuente: [46]

Donde:

N = Número de observaciones

Z_x = (x - \bar{x}) = Diferencia entre las observaciones reales y el estimado

Z_y = (y - \bar{y}) = Diferencia entre las observaciones reales y el estimado

El coeficiente de correlación puede tomar diferentes rangos entre valores de +1 a -1. Un valor 0 indica que no hay asociación entre las variables, un valor mayor que 0 indica una asociación positiva. Es decir, a medida que aumenta el valor de una variable, también lo hace el valor de la otra. Un valor menor que 0 indica una asociación negativa; es decir a medida que aumenta el valor de una variable, el valor de la otra disminuye.

Para el análisis de resultados con el coeficiente de correlación de Pearson se utilizó Excel. Este análisis indica que, “cuando la relación es positivamente moderada, indica la cercanía a la línea de los datos tomados por los medidores; cuando éstos se encuentran lejos de la línea existe una relación lineal moderada entre las variables”.

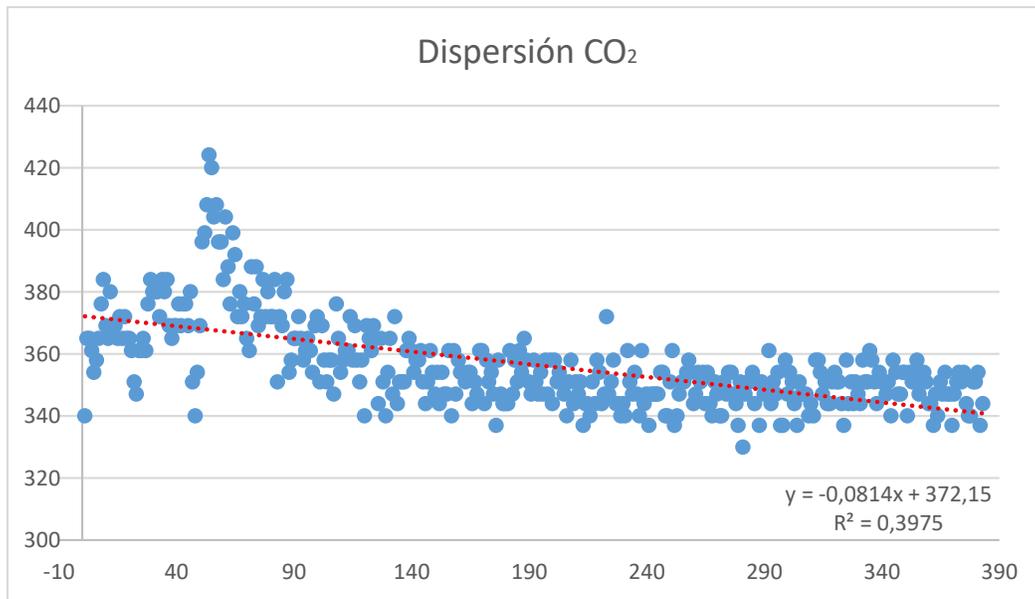
Para el caso de la variable de CO₂, los datos arrojaron que es positivamente moderada, obteniéndose un valor de 0,50. Al dar un valor mayor a cero, se evidencia una correlación positiva lo cual determina que las dos variables se correlacionan en sentido directo.

Tabla 13. Coeficiente de correlación – Variable CO₂

	CO ₂ Unicomfauca	CO ₂ Ingeominas
CO ₂ Unicomfauca	1	
CO ₂ Ingeominas	0,508590023	1

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 14. Gráfico de dispersión de la variable CO₂



Fuente: Elaboración propia

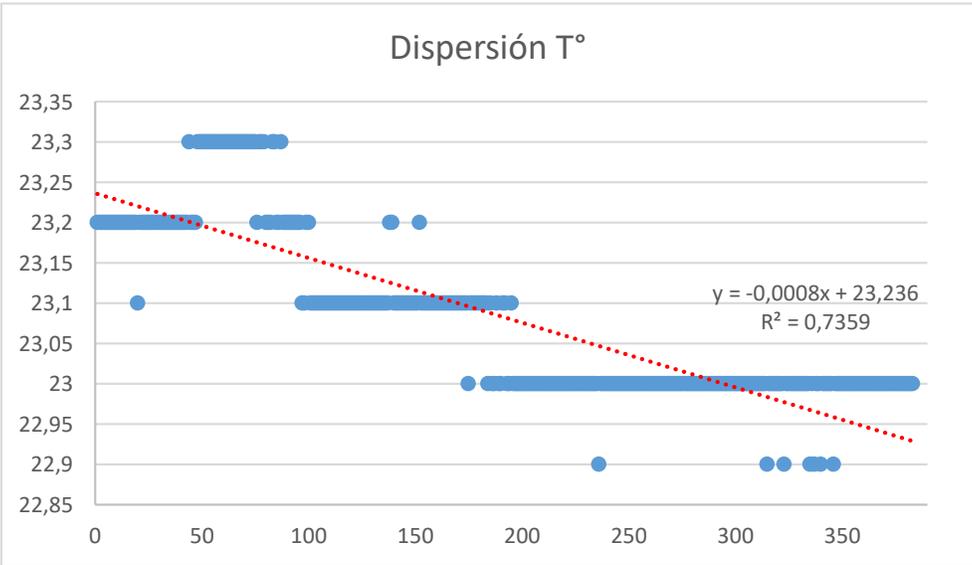
En cuanto a la variable de Temperatura (°C) el coeficiente de correlación de Pearson se evidenció que es igual a 0, lo que indica que no existe una correlación entre las mediciones.

Tabla 14. Correlación de Pearson de la variable Temperatura

	<i>T° Unicomfacauca</i>	<i>T° Ingeominas</i>
<i>T° Unicomfacauca</i>	1	
<i>T° Ingeominas</i>	-1,93172E-13	1

Fuente: Elaboración propia

Ilustración 15. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura



Fuente: Elaboración propia

En cuanto a la variable de Humedad (%), se reporta que el dispositivo de Ingeominas no cuenta con esta medición, por lo cual no se estableció ninguna medida de correlación.

CAPÍTULO 4. CONTRASTE DE MEDICIONES CON LÍMITES PERMISIBLES DE CO₂

4.1. CONTRASTE DE MEDICIONES

En la Tabla 15 se presenta el resumen de los resultados obtenidos con relación a la medición de CO₂, temperatura y humedad, a partir de la medición realizada con el prototipo elaborado por los estudiantes de la universidad.

Tabla 15. Resultados obtenidos con prototipo de monitoreo propuesto

MEDICIÓN	HUMEDAD (%)	TEMPERATURA (°C)	CONCENTRACIÓN CO ₂ (ug/m ³)
Promedio	74,759	20,583	346,218
Desviación Estándar	9,657	1,574	38,728
Varianza	101,237	2,664	2789,927

Fuente: Elaboración propia

A partir de los resultados, es posible resaltar que se presenta una alta variación entre los datos registrados por el prototipo diseñado por los estudiantes, para las tres (3) variables medidas (humedad, temperatura y concentración de CO₂). Al realizar un análisis de regresión (Ver Tabla 16), se identifica que, aunque el coeficiente de correlación múltiple es de 0,741, lo que muestra que hay un alto grado de asociación entre las variables, el coeficiente de determinación R², que hace relación al ajuste del modelo e indica en qué grado porcentual cambiará la variable dependiente dados los cambios en la variable independiente, se encuentra en 0,55, lo que indica que el modelo aún presenta oportunidad de mejora en cuanto al ajuste requerido para representar la realidad.

En cuanto al análisis de varianza, el p valor se encuentra en 0, lo cual es menor a 0,05, indicando que el modelo tiene significancia estadística y, en consecuencia, existe una variabilidad significativa de la variable dependiente (CO₂) debido a la perturbación de la variable independiente (temperatura).

Tabla 16. Análisis de regresión – Resultados obtenidos con prototipo de monitoreo propuesto

<i>Estadísticas de la regresión</i>	
Coeficiente de correlación múltiple	0,741
Coeficiente de determinación R ²	0,550
R ² ajustado	0,549
Error típico	9,601
Observaciones	383

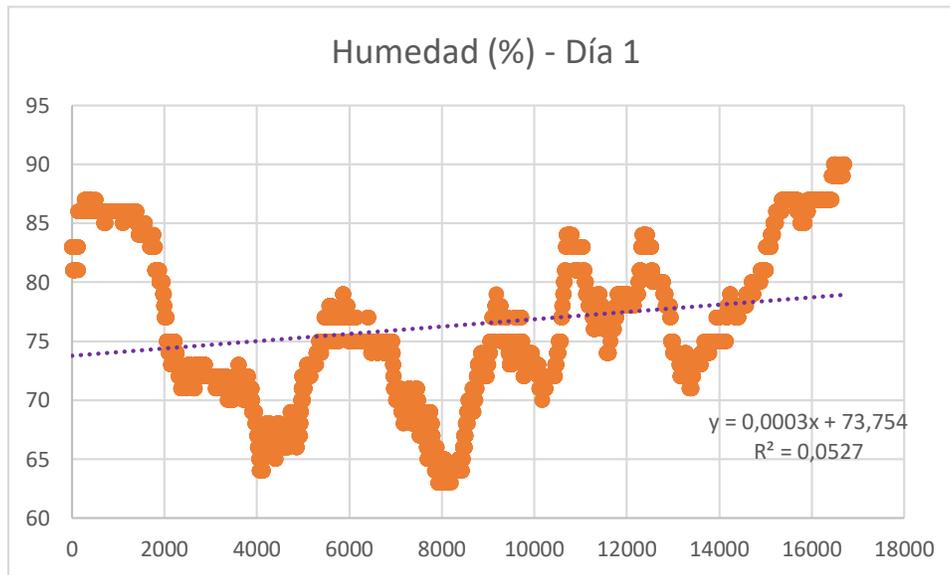
	<i>Grados de libertad</i>
Regresión	1
Residuos	381
Total	382

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con lo anterior, y teniendo en cuenta lo establecido en la Resolución 2254 del 2017 del Ministerio de Ambiente, en la que se establece que “el nivel máximo permisible de concentración en el aire para el CO₂, para un tiempo de exposición de 8 horas es de 5.000 µg/m³”, es posible indicar que las mediciones realizadas en el bloque A de la facultad de ingeniería industrial, de la universidad Unicomfauca, se encuentran dentro de los límites permisibles.

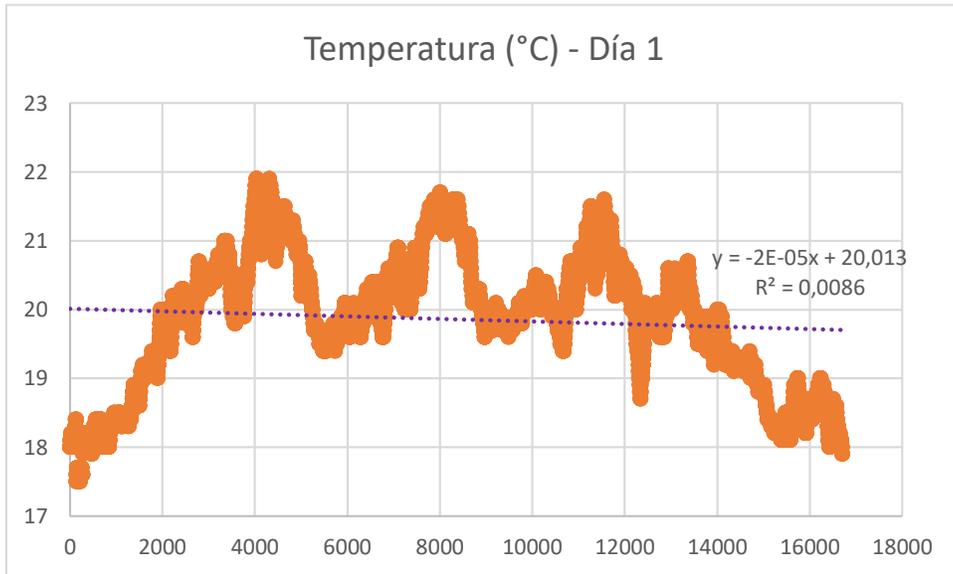
A continuación, se presentan las representaciones gráficas de las mediciones realizadas para las variables de humedad (%), temperatura (°C) y CO₂ (ug/m³) para los 7 días analizados.

Ilustración 16. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 1



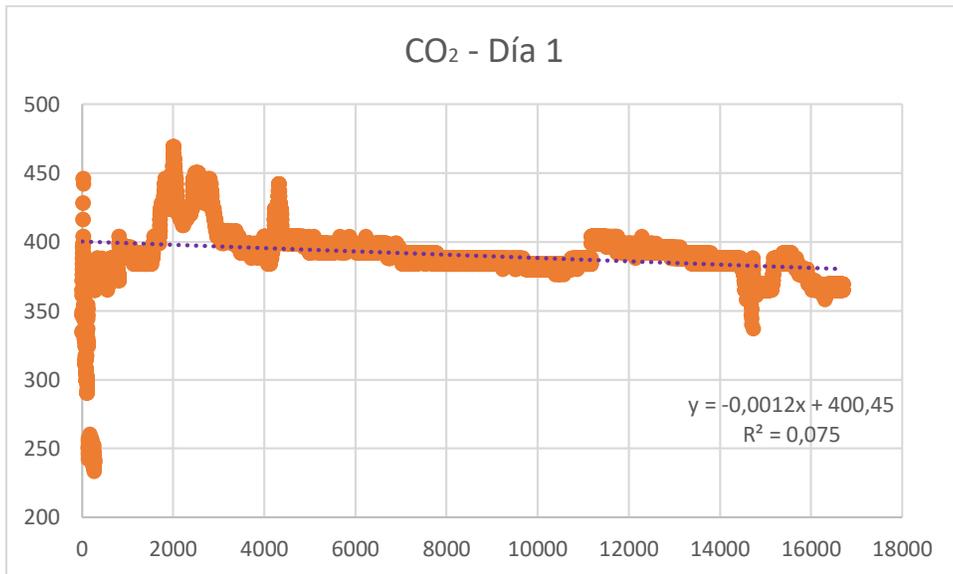
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 17. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 1



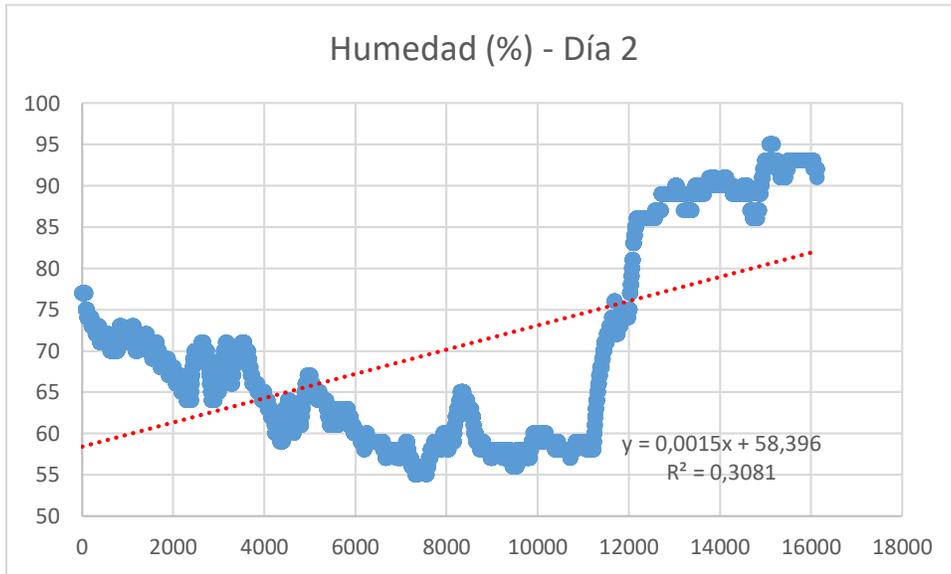
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 18. Gráfico de dispersión de la variable CO₂ – Día 1



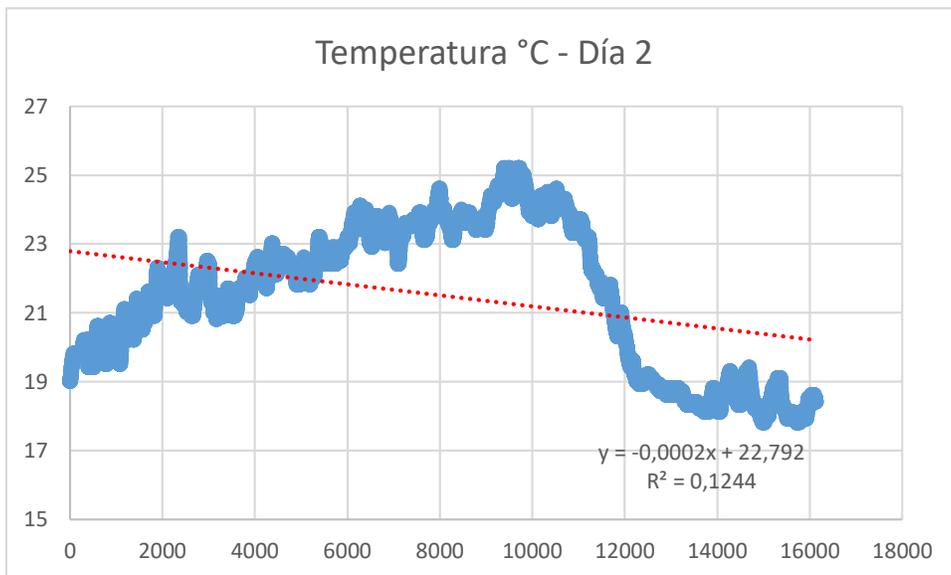
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 19. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 2



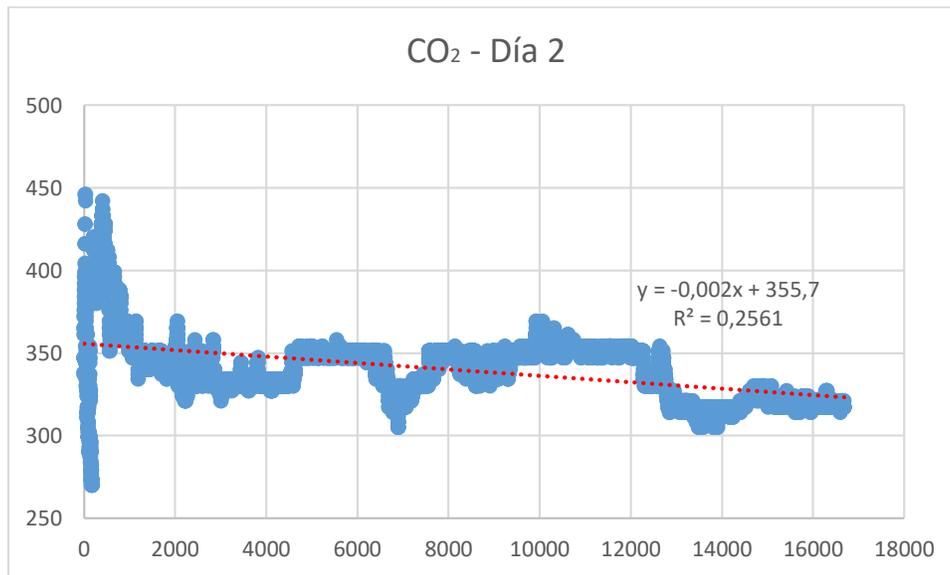
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 20. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 2



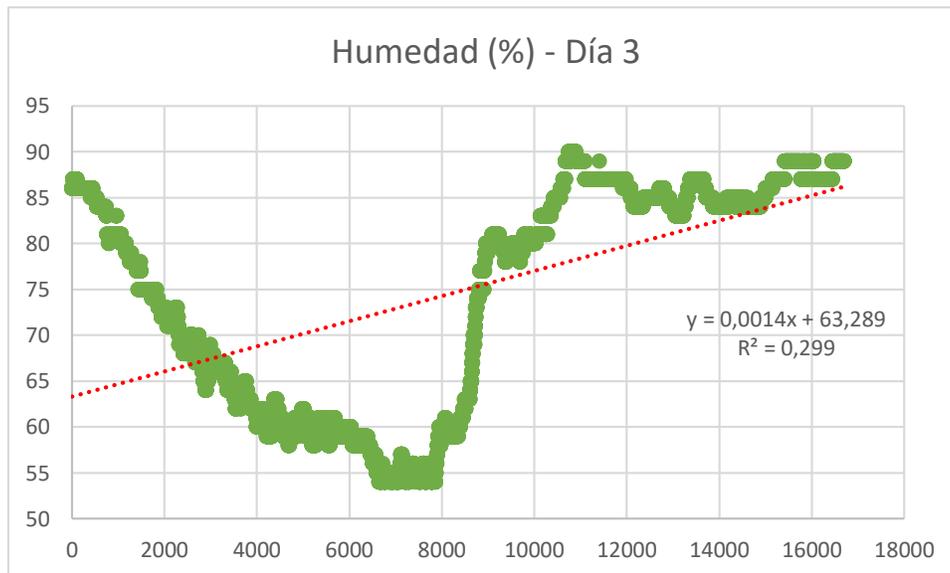
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 21. Gráfico de dispersión de la variable CO₂ – Día 2



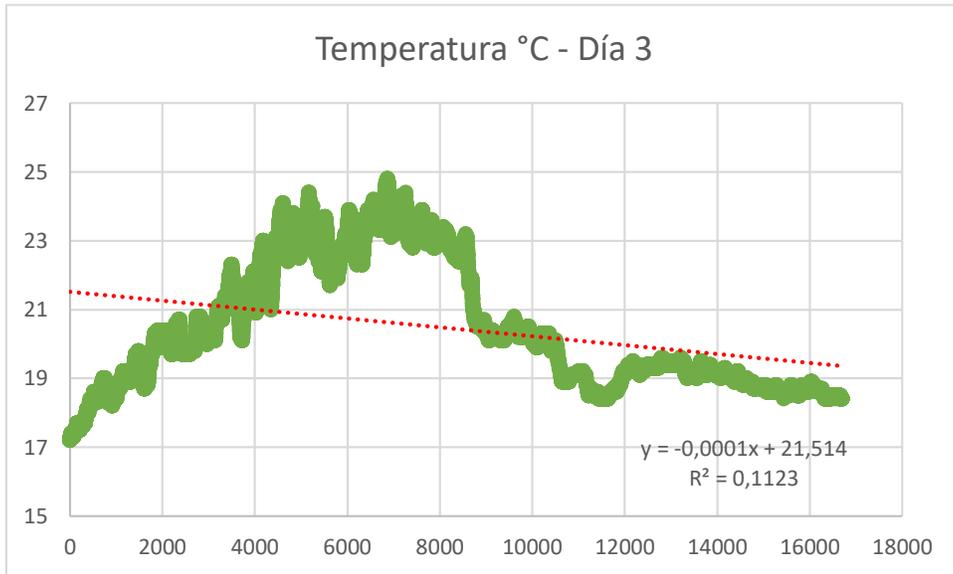
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 22. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 3



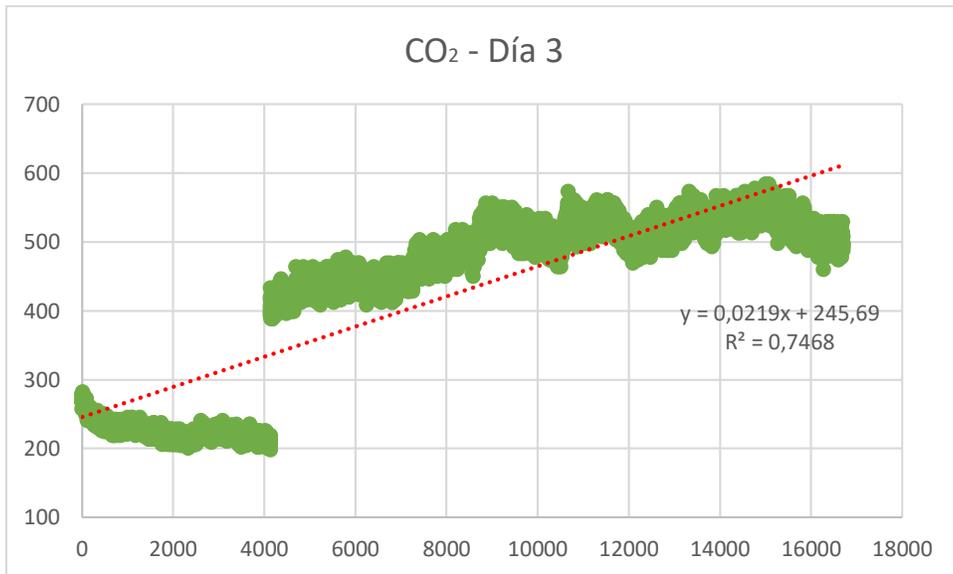
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 23. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 3



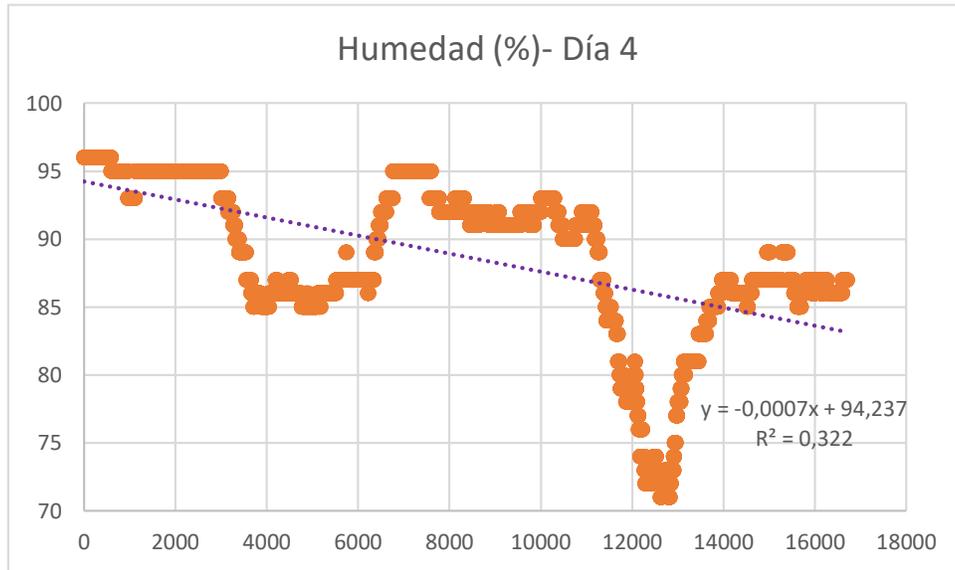
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 24. Gráfico de dispersión de la variable CO₂ – Día 3



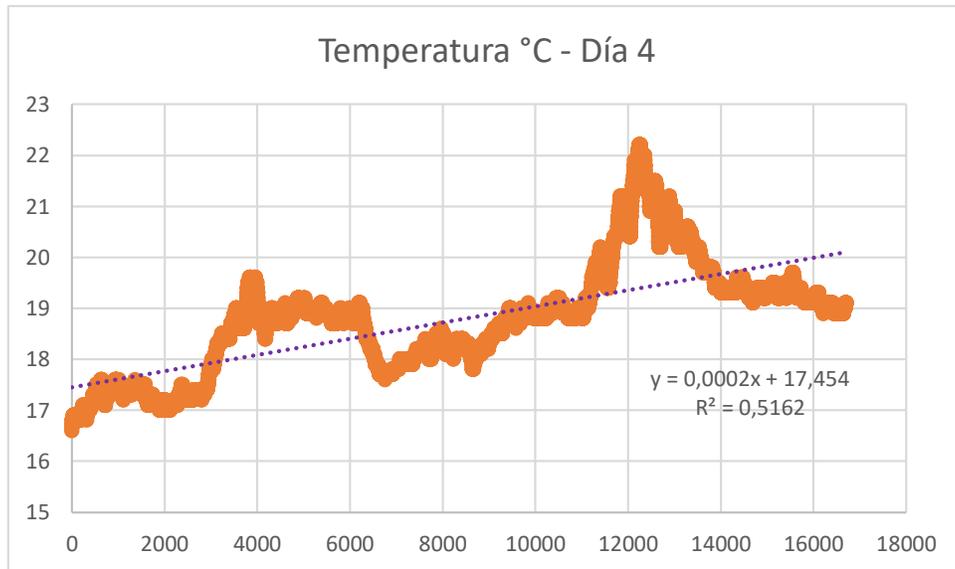
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 25. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 4



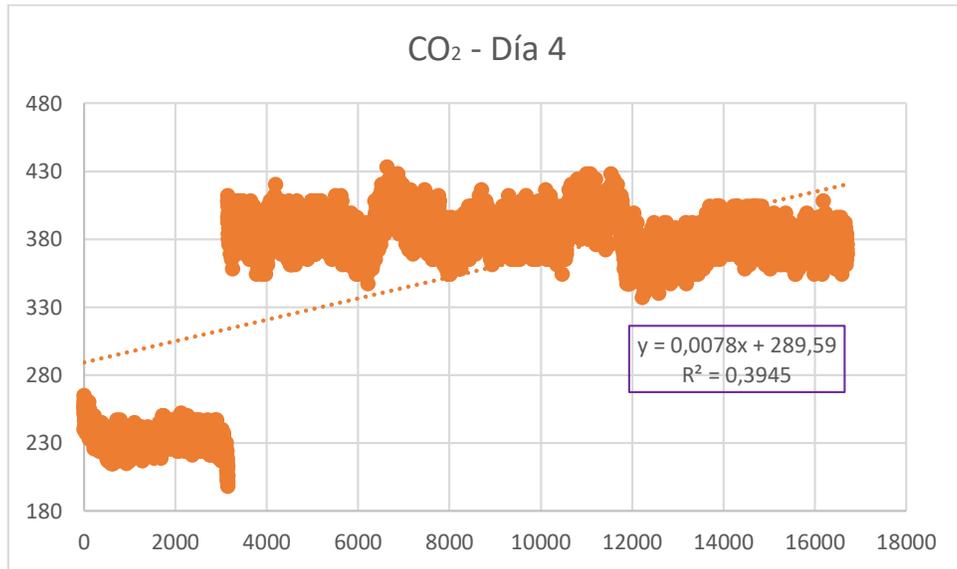
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 26. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 4



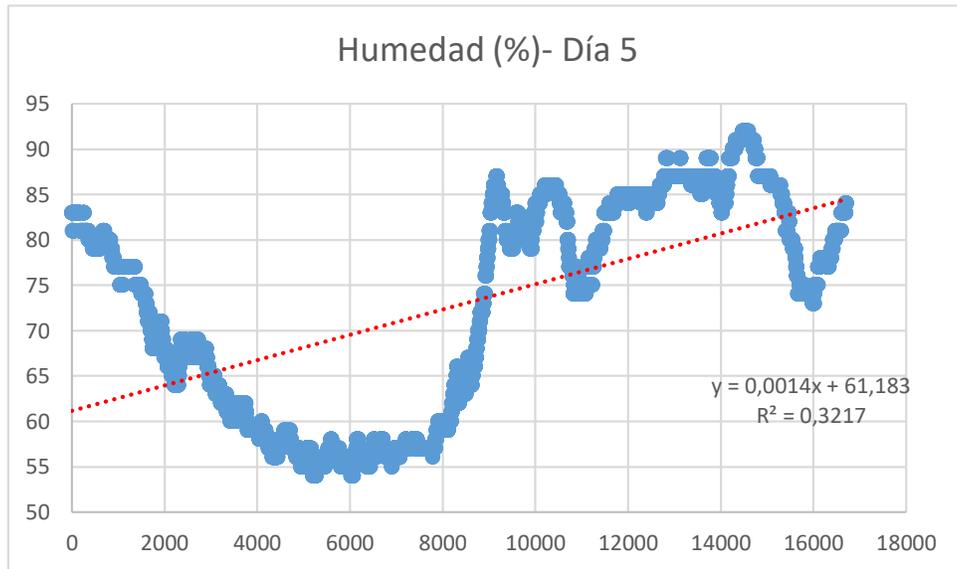
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 27. Gráfico de dispersión de la variable CO₂ – Día 4



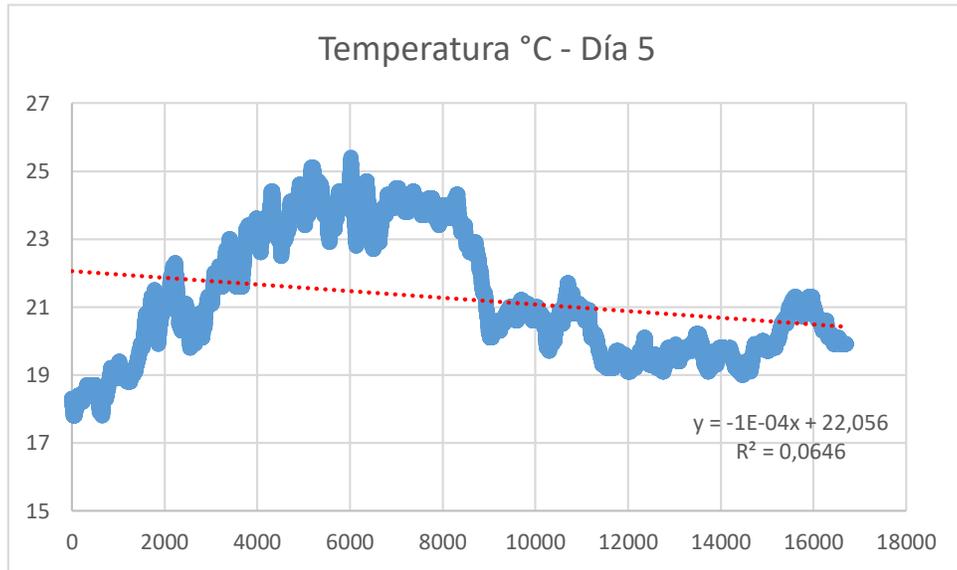
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 28. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 5



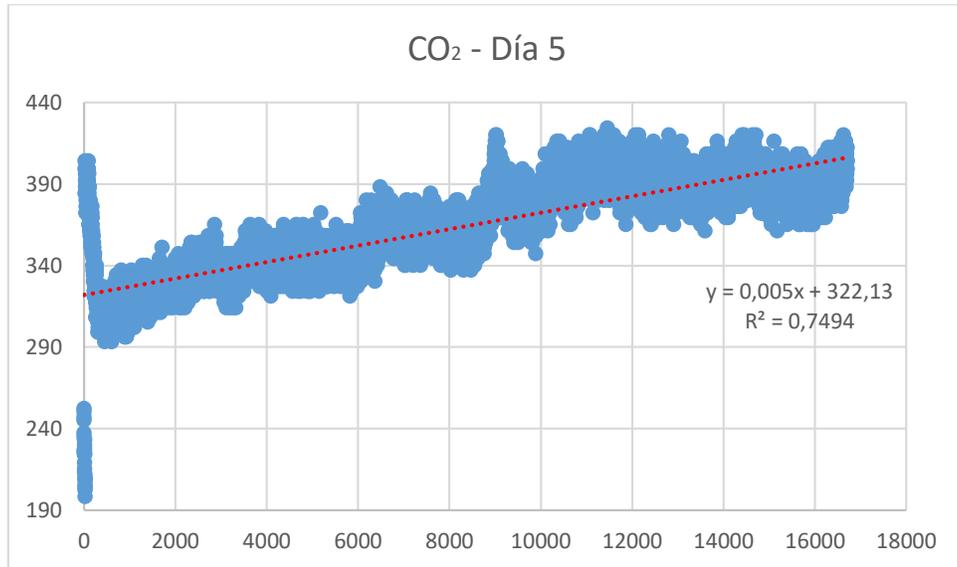
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 29. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 5



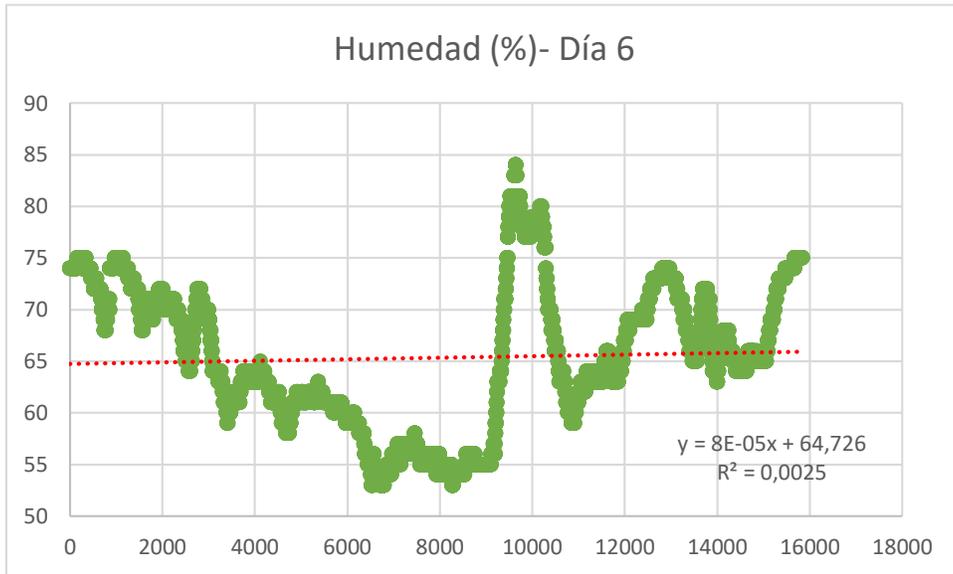
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 30. Gráfico de dispersión de la variable CO₂ – Día 5



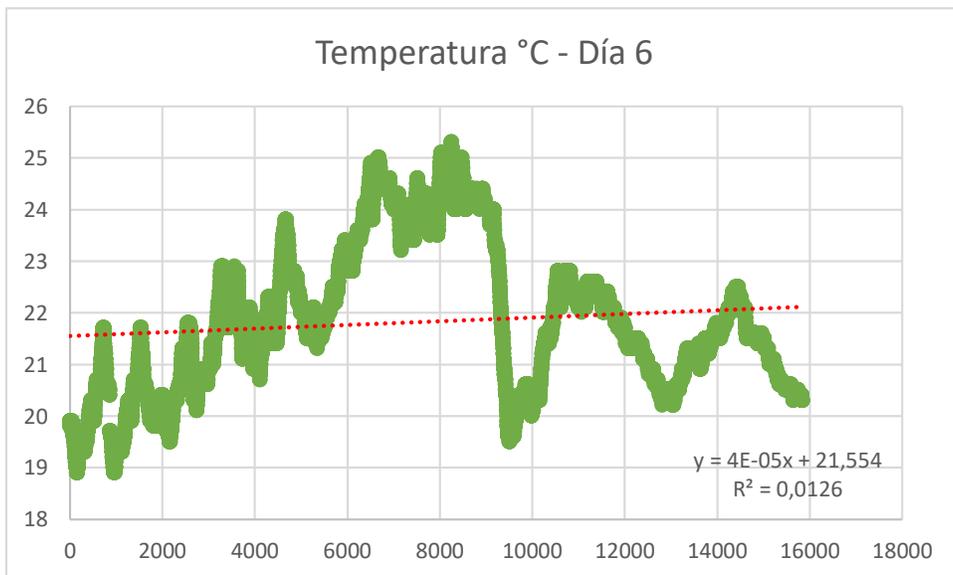
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 31. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 6



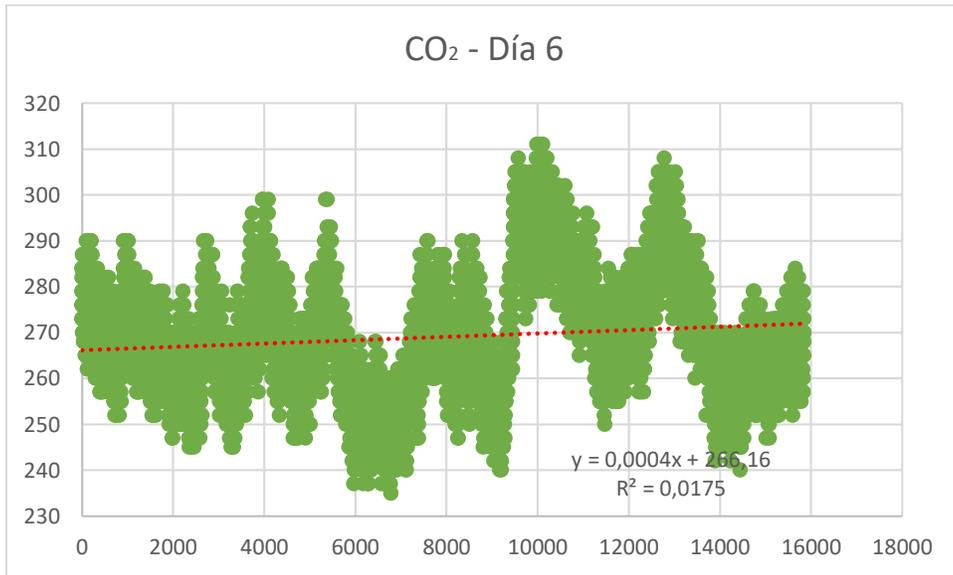
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 32. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 6



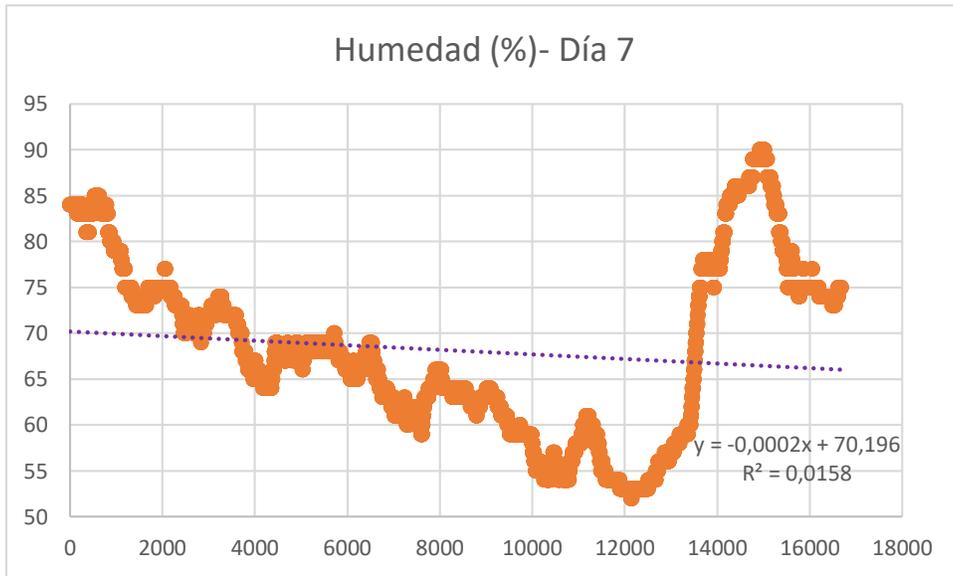
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 33. Gráfico de dispersión de la variable CO₂ – Día 6



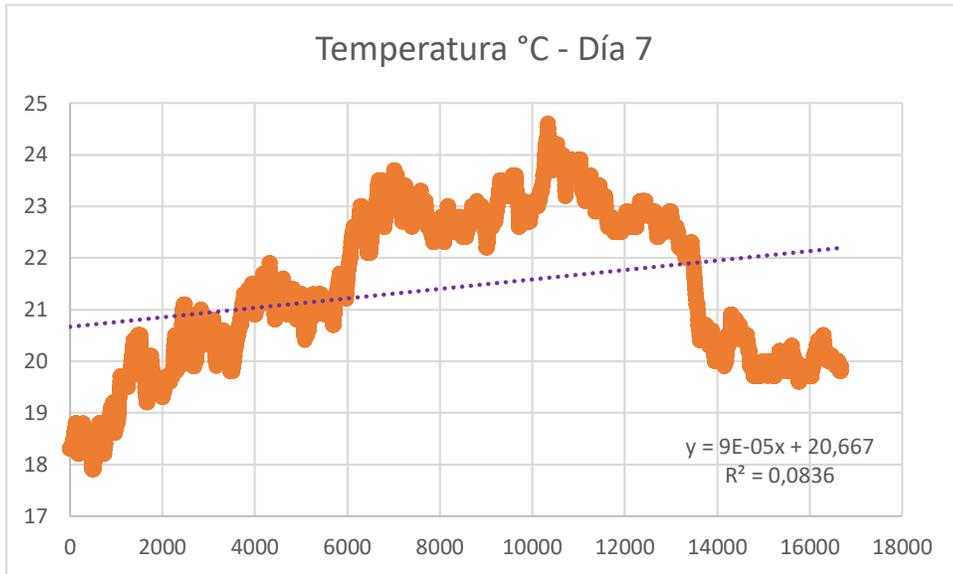
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 34. Gráfico de dispersión de la variable Humedad – Día 7



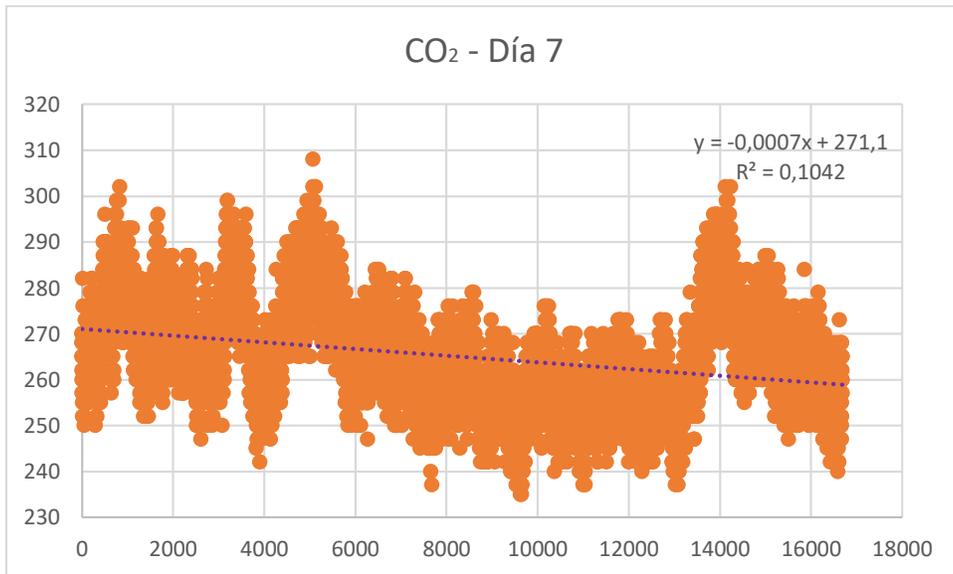
Fuente: Elaboración propia

Ilustración 35. Gráfico de dispersión de la variable Temperatura – Día 7



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 36. Gráfico de dispersión de la variable CO₂ – Día 7



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 5. SOCIALIZACIÓN DE RESULTADOS

5.1. EVIDENCIA DE SOCIALIZACIÓN

A continuación, se presenta la evidencia de socialización llevada a cabo a los estudiantes de Unicomfacauca.

Ilustración 37. Poster de socialización



Fuente: Elaboración propia

Ilustración 38. Participación en evento internacional

IV Concurso de Carteles de Investigación
universidad e Guadalajara

La Universidad de Guadalajara
a través del Centro Universitario del Norte
otorga la presente

CONSTANCIA

a: Jhonnatan Bolívar Burbano

Por la presentación del tema "Diseño de un sistema de monitoreo con sensores electroquímicos para evaluar la calidad del aire" en el IV Concurso de Carteles de Investigación, mesa Ingeniería. Efectuado en el Centro Universitario del Norte del 22 al 24 de junio de 2021, en modalidad no presencial.

ATENTAMENTE
"Piensa y Trabaja"
"Año del legado de Fray Antonio Alcalde en Guadalajara"
Colotlán, Jalisco, México, a 22 de junio de 2021

MTR. LIRNEL NUÑO GUTIERREZ
RECTOR

DR. JOSÉ DE JESÚS QUINTANA CONTRERAS
SECRETARIO ACADÉMICO

IV CONCURSO DE CARTELES DE INVESTIGACIÓN

Diseño de un sistema de monitoreo con sensores electroquímicos para evaluar la calidad del aire en la Corporación Universitaria Comfacauca, sede Popayán - Cauca.

Burbano Botivero, Jhonnatan Bolívar, Bolaños Yady Ximena, Espinosa Yuliana, Delgado Espinosa Zuly Yuliana.
"Estudiante perteneciente a unidades: SERVICIOS/27704M, Corporación Universitaria Comfacauca - (Instituciones Popayán, Colombia) "Investigador grupo de investigación: Cadenas de Valor, Corporación Universitaria Comfacauca - Unicomfacaucu Popayán, Colombia"

Introducción

La población del área metropolitana de Popayán enfrenta un problema de contaminación del medio ambiente, afectado principalmente por la contaminación del aire. La contaminación del aire es uno de los principales factores de riesgo para la salud humana y el medio ambiente. En los últimos años, se ha observado un aumento en la contaminación del aire en Popayán, debido a la presencia de industrias, vehículos y actividades agrícolas. Este problema requiere una solución urgente para proteger la salud y el medio ambiente.

Resultados

A continuación se presentan los principales resultados obtenidos en el desarrollo del sistema de monitoreo de calidad del aire. En la figura 1 se muestran los sensores electroquímicos de bajo costo. El objetivo principal de los sensores, es detectar contaminantes químicos presentes en el aire, transformando estos valores químicos en señales eléctricas proporcionales a la concentración del gas que se mide. En segundo lugar se presenta la Plataforma de Adquisición de Datos (PLAD) que encargará de recibir y almacenar los sensores electroquímicos. Su función principal es generar una interfaz web para visualizar el software y el hardware. También se muestra la información de una fuente para poder ser utilizada por un estudiante.

Figura 1
Sistema de monitoreo de calidad del aire con sensores electroquímicos de bajo costo. El flujo de adquisición de datos.

Fuente: Elaboración propia

La presentación en eventos de investigación permite visibilizar al programa y a la Unicomfacaucu en los procesos académicos e investigativos.

También se logró la participación en el evento virtual "I CONGRESO INTERNACIONAL DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES".

Ilustración 39. Participación en evento virtual

I CONGRESO INTERNACIONAL DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

MONITOREO DE CALIDAD DE AIRE EN LA SEDE UNICOMFACAUCA POPAYÁN SEGÚN RESOLUCIÓN 2254 DEL 1 DE NOVIEMBRE DEL 2017 DEL MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE Y SU RELACIÓN CON LA ESTRUCTURA URBANA.

Martha Cerón Bolaños, Jhonnatan Burbano Gutiérrez, Zuly Delgado Espinosa

Ingeniería Industrial – Unicomfacaucu.
Semillero Semioficial.
Grupo de Investigación: Cadenas de Valor.

CERTIFICA QUE:

ZULY YULIANA DELGADO ESPINOSA
D.L. 34319459 POPAYAN 2021-II-D-379

Participó como panelista en el:
I CONGRESO INTERNACIONAL DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

Realizado el 27 y 28 del mes mayo del 2021
Con una intensidad de 12 horas
Estado en Santander de Quilichao (Tolima) - los viernes (27) días del mes de mayo del 2021

ISABEL RAMÍREZ MESA
Rectora (integración) Universidad
Comfacauca Unicomfacaucu

CLAUDIA ORTEZ OCAMPO
Decana Facultad de Ciencias
Agropecuarias Universidad
Caliúca del Trabajo Secc

YAMARIS KORA PIZARRA
Directora general Instituto
Tecnológico Superior Ciudad
Serón

ELICE MATINEZ ROMERO
Coordinadora I Congreso
Internacional de Ciencias
Agropecuarias y Ambientales

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

Esta investigación tuvo como objetivo principal determinar el estado actual de la calidad del aire en la Corporación Universitaria ComfacaUCA, sede Popayán - Cauca, de acuerdo con la resolución 2254 del 1 de noviembre del 2017, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, a partir del diseño de un prototipo de monitoreo con sensores electroquímicos de bajo costo, donde se evaluaron mediciones de humedad, temperatura, y CO₂, para una estación (con flujo de estudiantes). En conclusión, al contrastar si las mediciones obtenidas estaban dentro de los límites permisibles según la resolución 2254 del 1 de noviembre, emitida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se identificó que en promedio las mediciones de CO₂ fueron de 346,218 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ya que en la resolución anteriormente mencionada se establece que “el nivel máximo permisible de concentración en el aire para el CO₂, para un tiempo de exposición de 8 horas es de 5.000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ”, es posible indicar que las mediciones realizadas en el bloque A de la facultad de ingeniería industrial, en la UnicomfacaUCA, se encuentran dentro de los límites permisibles.

En este sentido, se realizó el diseño y montaje del prototipo para la medición de la concentración de CO₂ en el ambiente, con la aplicación de tres (3) sensores para la medición de temperatura, humedad y CO₂, los cuales fueron conectados a una protoboard de Arduino. Para verificar la funcionalidad del equipo, se realizó una prueba consistente en encender un papel con fuego frente al prototipo, y evidenciar un cambio en la medición de CO₂ y temperatura. Adicionalmente, se validó la consistencia y pertinencia de los datos obtenidos realizando una prueba de repetibilidad, esto teniendo en cuenta que se tomaron las mediciones con las mismas condiciones de operación, lugar, tiempo, sistemas de medición y operadores.

Para determinar la confiabilidad de los datos obtenidos con el prototipo diseñado, frente con los datos obtenidos con el sistema de monitoreo de CO₂ certificado, se contrastaron los resultados recopilados con los datos medidos por un equipo calibrado de Ingeominas. Estos resultados fueron comparados a través de un análisis de correlación de Pearson y una prueba de error cuadrado medio, indicando que la correlación para la medición de CO₂ es del 50,9%, lo cual indica que los datos son consistentes y se encuentran dentro de un modelo aprobado para la toma de datos de este gas. Sin embargo, no se encontró una correlación para la medición de temperatura, y desafortunadamente, el equipo certificado no contaba con la medición de humedad, por lo cual no fue posible establecer dicha correlación.

Una vez validada la capacidad del prototipo para realizar la medición de CO₂, variable que era de interés particular en esta investigación, se realizó la toma de las mediciones para siete (7) días continuos, en el horario de 8 am a 6 pm. Sobre estos datos se realizó un análisis de promedio, varianza y desviación estándar, para establecer los valores de medición obtenidos en el Bloque 5 de la Facultad de Ingeniería de la Universidad objeto de investigación. Como se evidenció en los resultados, la varianza y desviación estándar presentan valores altos de dispersión, lo cual fue contrastado con un análisis de regresión lineal que mostró que, si bien el coeficiente de correlación se acerca a 1 (0,74), indicando que hay un alto grado de asociación entre las variables, el coeficiente de determinación R² es de 0,55, lejano de 0, lo que indica que el prototipo presenta oportunidades de mejora en cuanto al potencial de ajuste requerido para presentar mejores estimaciones en cuanto a temperatura y CO₂.

Finalmente se realizó la socialización de los resultados obtenidos en esta investigación a la comunidad estudiantil, contribuyendo a la concientización frente a la problemática ambiental a nivel mundial relacionada con la concentración de CO₂ en el aire.

Para un trabajo futuro, es importante resaltar la importancia de integrar nuevas variables de medición al prototipo diseñado en el marco de esta investigación, con el fin de realizar otras mediciones que son complementarias a la medición de CO₂ en la calidad del aire.

6.2. RECOMENDACIONES

Teniendo en cuenta que el CO₂ es considerado como uno de los principales gases que contribuyen a la producción de Gases de Efecto Invernadero (GEI), se recomienda dar continuidad a la medición de estas concentraciones, no solo en espacios como el Bloque 5 de la Facultad de Ingeniería de Unicomfauca, sino también en otras aulas de clase, y espacios abiertos cercanos a fuentes fijas y móviles de este gas, como es el caso de los laboratorios de manufactura de Ingeniería Industrial, que se encuentran muy cerca de un parqueadero de automóviles. Esto con el fin de identificar fuentes de emisión y acumulación de CO₂ no consideradas normalmente, y que pueden generar focos de intoxicación por este gas.

Asimismo, teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el marco de la investigación, se presenta la oportunidad de mejora relacionada con la verificación de la consistencia en los resultados obtenidos por el prototipo, con la generación de pruebas de reproducibilidad, en las cuales se pueden verificar las mediciones

variando condiciones como el lugar, tiempo, operarios, sistemas y procedimientos de medición, y condiciones de operación. Esto permitirá robustecer el prototipo de medición de calidad del aire, a partir de la identificación de debilidades potenciales y ajustes requeridos para mejorar la certeza de medición de estas y otras variables.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Sharma *et al.*, “REAL-TIME AIR QUALITY MEASUREMENTS USING MOBILE PLATFORMS,” *ACS Nano*, vol. 4, no. 4, pp. 1921–1926, 2010.
- [2] X. Li, L. Jin, and H. Kan, “Air pollution: a global problem needs local fixes,” *Nature*, vol. 570, no. 7762. Nature Publishing Group, pp. 437–439, Jun. 25, 2019, doi: 10.1038/d41586-019-01960-7.
- [3] EPA, “Criteria Air Pollutants | US EPA,” *Criteria Air Pollutants*, 2021. <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants> (accessed Aug. 16, 2022).
- [4] Department of Health - Tennessee State Government, “Air,” 2022. <https://www.tn.gov/health/cedep/environmental/healthy-places/healthy-places/environmental-quality/eq/air.html> (accessed Aug. 16, 2022).
- [5] M. Lacasaña-Navarro, C. Aguilar-Garduño, and I. Romieu, “Evolución de la contaminación del aire e impacto de los programas de control en tres megaciudades de América Latina,” *Salud Publica Mex.*, vol. 41, no. 3, pp. 203–215, 1999, doi: 10.1590/s0036-36341999000300008.
- [6] M. J. Ganchozo Moreno, “Prototipo de sistema de monitoreo de CO2 en exteriores por medio de hardware abierto.,” Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Industrial. Carrera de Ingeniería en Teleinformática., 2018.
- [7] A. Y. MORALES MARTINEZ, “Evaluación de la calidad del aire interior en salas de clases en la utfsm, sede concepción,” 2018.
- [8] C. M. Gonzalez Duque, “Calidad del aire en la zona centro y oriente de la ciudad de Manizales: Influencia del material particulado (PM10) y lluvia Ácida,” 2012.
- [9] T. F. Gonzalez Velandia, “DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN LA UNIVERSIDAD LIBRE SECCIONAL BOGOTÁ SEDE BOSQUE POPULAR,” 2015.
- [10] K. G. Morales and T. T. García, “Análisis comparativo de las concentraciones de PM2.5 en las estaciones de monitoreo de calidad de aire de las ciudades Bogotá, Medellín y Cali, durante el periodo pre-pandemia y pandemia agosto 2019 agosto 2020,” *Ing. Ambient. y Sanit.*, Jan. 2020, Accessed: Aug. 16, 2022. [Online]. Available: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1886.
- [11] OMS, “Calidad del aire ambiente (exterior),” *Organización Mundial de la Salud*, 2021. [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) (accessed Aug. 16, 2022).
- [12] J. G. Puma Pinargote and H. R. Alfonso Ramírez, “Diseño e implementación

de un prototipo de medición de emisión de gases contaminantes en el laboratorio de automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil,” 2021, Accessed: Oct. 25, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20673>.

- [13] E. A. Corona–Zambrano and R. I. Rojas–Caldelas, “Calidad del aire y su incorporación en la planeación urbana: Mexicali, Baja California, México,” *Estud. Front.*, vol. 10, no. 20, pp. 79–102, 2009, doi: 10.21670/ref.2009.20.a03.
- [14] OMS, “OPS/OMS Colombia - Nueve de cada 10 personas en todo el mundo respiran aire contaminado, pero más países están tomando acciones,” 2005. https://www3.paho.org/col/index.php?option=com_content&view=article&id=2958:nueve-de-cada-10-personas-en-todo-el-mundo-respiran-aire-contaminado-pero-mas-paises-estan-tomando-acciones&Itemid=562 (accessed Aug. 16, 2022).
- [15] IDAM, “INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, CLIMATOLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES INFORME DEL ESTADO DE LA CALIDAD DEL AIRE EN COLOMBIA,” 2019.
- [16] E. Puliafito, F. Castro, and D. Allende, “TRANSPORTE Y CALIDAD DEL AIRE EN MENDOZA INFORME N° 3: Emisiones del transporte urbano de pasajeros,” 2011, Accessed: Aug. 16, 2022. [Online]. Available: www.frm.utn.edu.ar/ceds.
- [17] J. C. Lin *et al.*, “CO₂ and carbon emissions from cities linkages to air quality, socioeconomic activity, and stakeholders in the Salt Lake city urban area,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 99, no. 11, pp. 2325–2339, 2018, doi: 10.1175/BAMS-D-17-0037.1.
- [18] C. Montero, *Pronóstico de la calidad del aire en el área metropolitana de la Ciudad de México a través del análisis de las series de tiempo de los componentes IMECA*. Universidad Iberoamericana Ciudad de México. Departamento de Ingenierías, 2011.
- [19] Ministerio de salud y protección social, “ENVEJECIMIENTO DEMOGRÁFICO. COLOMBIA 1951-2020 DINÁMICA DEMOGRÁFICA Y ESTRUCTURAS POBLACIONALES MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL OFICINA DE PROMOCIÓN SOCIAL,” 2013.
- [20] y E. A. Instituto de Meteorología, “Calidad Del Aire - Ideam,” p. 1, 2014, Accessed: Aug. 16, 2022. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/calidad-del-aire>.
- [21] F. Zacarías, “Reseña: Salud en las Américas Edición de 2012 Panorama regional y perfiles de país,” *Rev. Gerenc. y Políticas Salud*, vol. 12, no. 24,

pp. 267–275, 2013, Accessed: Aug. 16, 2022. [Online]. Available: www.paho.org.

- [22] IPCC, “Synthesis report,” 2022, pp. 3–60.
- [23] K. R. Gurney, I. Razlivanov, Y. Song, Y. Zhou, B. Benes, and M. Abdul-Massih, “Quantification of fossil fuel CO₂ emissions on the building/street scale for a large U.S. City,” *Environ. Sci. Technol.*, vol. 46, no. 21, pp. 12194–12202, Nov. 2012, doi: 10.1021/ES3011282/SUPPL_FILE/ES3011282_SI_001.PDF.
- [24] Wisconsin, “Carbon Dioxide | Wisconsin Department of Health Services,” *Wisconsin Department of Health Services*, 2019. <https://www.dhs.wisconsin.gov/chemical/carbondioxide.htm> (accessed Oct. 25, 2022).
- [25] BAPI, “The Effects of Temperature and Barometric Pressure on CO₂ Sensors Calculating Temperature and Barometric Pressure Effects on CO₂ Measurement,” 2012. https://www.bapihvac.com/wp-content/uploads/2011/04/Altitude_Temperature_and_CO2.pdf (accessed Oct. 26, 2022).
- [26] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Resolución 2254 de 2017.” 2017, Accessed: Aug. 16, 2022. [Online]. Available: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resolución+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>.
- [27] Micro JPM, “MG811 CO₂ Sensor Dioxido Carbono :: Micro JPM,” 2020. <https://www.microjpm.com/products/mg811-co2-sensor-dioxido-carbono/> (accessed Aug. 16, 2022).
- [28] Tecnopura, “Sensor de gas MQ-7 / Módulo para medir monóxido de carbono.” <https://www.tecnopura.com/producto/sensor-de-gas-mq-7-modulo-para-medir-monoxido-de-carbono/> (accessed Aug. 16, 2022).
- [29] i + D electrónica, “Gases: Sensor Multi Gas MICS-6814.” <https://didacticaselectronicas.com/~didactic/index.php/sensores/gases/sensor-multi-gas-mics-6814-cjmcu-mics-6814-sensor-sensores-de-gas-gases-monoxido-de-carbono-co-dioxido-de-nitrogeno-no2-etanol-c2h5oh-hidrogeno-h2-amoniac-nh3-metano-ch4-propano-c3h8-i> (accessed Aug. 16, 2022).
- [30] DigiKey, “968-038 SPEC Sensors, LLC | Sensores y transductores |.” <https://www.digikey.com/es/products/detail/spec-sensors-llc/968-038/6676884> (accessed Aug. 16, 2022).
- [31] Vistrónica, “Módulo Sensor De Ozono Mq-131 Para Bajas Concentraciones.” <https://www.vistronica.com/sensores/gas/modulo-sensor-de-ozono-mq-131->

detail.html (accessed Aug. 16, 2022).

- [32] A. D'Ausilio, "Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment," *Behav. Res. Methods*, vol. 44, no. 2, pp. 305–313, 2012, doi: 10.3758/s13428-011-0163-z.
- [33] analog read, "MG-811 Carbon Dioxide Sensor Module," 2017. <https://kku.world/be9xi> (accessed Oct. 25, 2022).
- [34] OECD, "OECD Glossary of Statistical Terms - Carbon dioxide (CO2) Definition," 2013. <https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=284> (accessed Sep. 30, 2022).
- [35] ORACLE, "What Is a Database | Oracle," *Oracle*, 2015. <https://www.oracle.com/database/what-is-database/> (accessed Oct. 25, 2022).
- [36] L. K. Sahu and P. R. Sinha, "Vertical profiles of trace gases in the troposphere over South Asia," *Asian Atmos. Pollut. Sources, Charact. Impacts*, pp. 303–322, Jan. 2022, doi: 10.1016/B978-0-12-816693-2.00009-3.
- [37] Statistics how to Staff, "Correlation Coefficient: Simple Definition, Formula, Easy Calculation Steps," *Statistics How To*, 2020. <https://www.statisticshowto.com/probability-and-statistics/correlation-coefficient-formula/> (accessed Oct. 26, 2022).
- [38] Encyclopedia of Public Health, "Pearson's Correlation Coefficient," *Encycl. Public Heal.*, pp. 1090–1091, 2008, doi: 10.1007/978-1-4020-5614-7_2569.
- [39] Simplilearn, "What is a Chi-Square Test? Formula, Examples & Uses." <https://www.simplilearn.com/tutorials/statistics-tutorial/chi-square-test> (accessed Oct. 26, 2022).
- [40] Google Maps, "unicomfacauca," 2022. <https://www.google.com/maps/search/unicomfacauca/@3.0173979,-76.4953085,14z> (accessed Sep. 30, 2022).
- [41] V. y D. T. Ministerio de Ambiente, "Resolución 650 de 2010," 2010.
- [42] V. y D. T. Ministerio de Ambiente, "Resolución 2154 de 2010," 2010.
- [43] J. W. Creswell, *Research Design: Qualitative, Quantitative and Mixed Approaches*. 2009.
- [44] S. Aguilar-Barojas, "Fórmulas para el cálculo de la muestra en investigaciones de salud," *Salud en Tabasco*, vol. 11, no. 1–2, pp. 333–38, 2005, Accessed: Sep. 30, 2022. [Online]. Available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48711206>.

- [45] Real Statistics Using Excel, "Analysis, Gage R&R," 2022. <https://www.real-statistics.com/two-way-anova/gage-rr/> (accessed Dec. 05, 2022).
- [46] J. Martinez, "Error Cuadrático Medio para Regresión," *Guía rápida de IArtificial*, 2020. <https://www.iartificial.net/error-cuadratico-medio-para-regresion/> (accessed Nov. 16, 2022).

ANEXO 1. MEDICIONES DE CO₂ REALIZADAS CON EL SISTEMA PROPUESTO

Ver documento en Excel anexo.