



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO AUTOMOTRIZ**

**“IMPLEMENTACIÓN DE ESTACIONES DE CALIDAD DE AIRE DE BAJO COSTO
PARA IBARRA”**



AUTOR: Cristian Stalyn Oto Narváez

DIRECTOR: PhD. Zamir Andrés Mera Rosero

Ibarra-Ecuador

2024

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0401940283		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Oto Narváez Cristian Stalyn		
DIRECCIÓN:	Santa Martha De Cuba-Carchi-Tulcán		
EMAIL:	csoton@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	-	TELF. MOVIL	0969770053

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Implementación de estaciones de calidad de aire de bajo costo para Ibarra
AUTOR:	Oto Narváez Cristian Stalyn
FECHA: AAAAMMDD	29/11/2024
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
CARRERA/PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Automotriz
DIRECTOR:	PhD. Zamir Andrés Mera Rosero

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, Cristian Stalyn Oto Narváz, con cédula de identidad Nro. 0401940283, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 29 días del mes de noviembre de 2024

EL AUTOR:

Firma..........

Nombre: Cristian Stalyn Oto Narváz

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 29 días, del mes de noviembre de 2024

EL AUTOR:

Firma..........

Nombre: Cristian Stalyn Oto Narváez

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 29 de noviembre de 2024

PhD. Zamir Andrés Mera Rosero

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f) 
PhD. Zamir Andrés Mera Rosero
C.C.: 1003124478

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

Ibarra, 29 de noviembre de 2024

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Implementación de estaciones de calidad de aire de bajo costo para Ibarra” elaborado por Oto Narváez Cristian Stalyn, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f) 
.....
PhD. Zamir Andrés Mera Rosero
C.C.: 1003184478.....

(f) 
.....
PhD. Luis Andrés Garzón Pérez
C.C.: 1002640454.....

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por ser mi luz en los momentos de incertidumbre y por mostrarme el camino cuando las circunstancias parecían adversas.

A mis padres, Ramiro y Maira, por enseñarme el verdadero valor del esfuerzo y por su apoyo incondicional en todo momento. Sin ustedes, este logro no sería posible.

A mis hermanos, Darío, Diana y Kerly por ser mi ejemplo a seguir y por su apoyo incondicional en cada etapa de mi vida.

Cristian Oto

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios, por ser mi refugio y fortaleza, por inspirarme a continuar y por mostrarme que la dedicación y la fe abren el camino hacia el éxito.

A mis padres, Ramiro y Maira, quienes han sido mi mayor fuente de inspiración. Su esfuerzo y sacrificio me impulsaron a esforzarme cada día más.

A mi tutor de tesis, PhD. Zamir Mera por su invaluable guía, sugerencias y paciencia a lo largo de este proyecto.

Finalmente, agradezco a la Universidad Técnica del Norte, por haberme brindado la oportunidad de formarme como profesional y crecer como persona.

Cristian Oto

RESUMEN EJECUTIVO

El monitoreo de la calidad del aire es esencial para que las ciudades diseñen planes de gestión que protejan la salud de la población. No obstante, las mediciones son limitadas debido al elevado costo de los equipos de monitoreo de referencia aprobados. En este contexto, el presente trabajo de investigación, titulado "Implementación de estaciones de calidad de aire de bajo costo para Ibarra", tiene como objetivo principal reportar la calidad del aire y correlacionarlo con el tráfico vehicular en la ciudad de Ibarra, Ecuador. Se utilizaron sensores de bajo costo AirGradient O-1PST, para registrar en tiempo real las emisiones de CO_2 y las concentraciones de $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} . Se selecciono el mercado central de la ciudad, conocido como Amazonas, como punto de monitoreo debido a su ubicación estratégica, caracterizada por su alta actividad comercial. Además se evaluó la calidad del aire en función de las concentraciones establecidas por la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire y las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud.

Los principales resultados muestran que el mercado Amazonas no presenta niveles significativos de contaminación de material particulado de $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} , a pesar del tráfico vehicular en la zona de medición. Adicionalmente, los sensores de bajo costo mostraron una alta correlación con la estación de referencia, alcanzando un coeficiente de determinación (R^2) de 0,95 para los promedios diarios de $\text{PM}_{2,5}$. Esto demuestra que los sensores son adecuados para el monitoreo de $\text{PM}_{2,5}$ en promedios diarios, aunque presentan limitaciones al medir concentraciones instantáneas.

Palabras clave: Sensores de bajo costo, material particulado ($\text{PM}_{2,5}$), material particulado (PM_{10}), dióxido de carbono (CO_2), calidad del aire.

ABSTRACT

Air quality monitoring is essential for cities to design management plans that protect the health of the population. However, measurements are limited due to the high cost of approved reference monitoring equipment. In this context, the present research work, titled "Implementation of low-cost air quality stations for Ibarra," has as its main objective to report air quality and correlate it with vehicular traffic in the city of Ibarra, Ecuador. Low-cost AirGradient O-1PST sensors were used to record real-time CO₂ emissions and PM_{2,5} and PM₁₀ concentrations. The central market of the city, known as Amazonas, was selected as a monitoring point due to its strategic location, characterized by its high commercial activity. Additionally, air quality was evaluated based on the concentrations established by the Ecuadorian Air Quality Standard and the air quality guidelines of the World Health Organization.

The main results show that the Amazon market does not present significant levels of particulate matter pollution of PM_{2,5} and PM₁₀, despite the vehicular traffic in the measurement area. Additionally, the low-cost sensors showed a high correlation with the reference station, reaching a coefficient of determination (R^2) of 0.95 for the daily averages of PM_{2,5}. This demonstrates that the sensors are suitable for monitoring PM_{2,5} in daily averages, although they present limitations when measuring instantaneous concentrations.

Keywords: Low-cost sensors, particulate matter (PM_{2,5}), particulate matter (PM₁₀), carbon dioxide (CO₂), air quality.

LISTA DE SIGLAS

CO. Monóxido de Carbono

CO₂. Dióxido de Carbono

DIGESA. Dirección General de Salud Ambiental

GEI. Gases de Efecto Invernadero

INEC. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos

NECA. Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire Ambiente

NO₂. Dióxido de Nitrógeno

O₃. Ozono

OMS. Organización Mundial de la Salud

PM. Material Particulado

PM₁₀. Material Particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 10 micras

PM_{2.5}. Material Particulado con diámetro aerodinámico menor o igual a 2.5 micras

SBC. Sensores de Bajo Costo

SO₂. Dióxido de Azufre

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	vii
AGRADECIMIENTO	viii
RESUMEN EJECUTIVO	ix
ABSTRACT	x
LISTA DE SIGLAS	xi
INTRODUCCIÓN	1
Planteamiento del Problema	1
Objetivos	1
Objetivo General	1
Objetivos Específicos	1
Alcance	2
Justificación	2
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	4
1.1 Descripción de la ciudad de Ibarra	4
1.1.1 Población	4
1.1.2 Sectorización	5
1.1.3 Vehículos matriculados	7
1.1.4 Tráfico vehicular y emisiones	7
1.2 Calidad del aire	8
1.2.1 Contaminación del aire	8
1.2.2 Efectos de los contaminantes sobre la salud y el medio ambiente	9
1.2.3 Norma de calidad del aire ambiente en Ecuador	10
1.2.4 Niveles de alerta, alarma y emergencia	10
1.3 Emisiones vehiculares	11
1.3.1 Tipos de emisiones	11
1.3.2 Emisiones de gases de efecto invernadero	13
1.3.3 Principales emisiones contaminantes provenientes de los vehículos	13
1.4 Tráfico vehicular	14
1.4.1 Tipos de flujo de tráfico	14
1.4.2 Aforos de tráfico	14
1.4.3 Variables fundamentales del tráfico	15
1.5 Monitoreo de la calidad del aire	16
1.5.1 Muestreo	17

1.5.2	Proceso de muestreo	17
1.5.3	Análisis de muestras	17
1.6	Sensores de calidad del aire	18
1.6.1	Sensores de bajo costo	18
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS.....		20
2.1	Selección del equipo de medición de la calidad del aire	21
2.1.1	Monitor de calidad del aire exterior AirGradient	22
2.2	Monitor de referencia Thermo Andersen / FH62C14.....	23
2.3	Definición de la zona de estudio.....	24
2.4	Definición de variables y parámetros de estudio	26
2.4.1	Intensidad de tráfico.....	27
2.4.2	Intensidad horaria equivalente	27
2.4.3	Composición vehicular	27
2.4.4	Factor de hora punta.....	28
2.5	Realización de pruebas piloto	29
2.5.1	Configuración de los sensores AirGradient	29
2.5.2	Pruebas piloto.....	31
2.6	Planificación de la campaña experimental.....	32
2.6.1	Instalación de sensores de contaminación del aire de bajo costo	32
2.6.2	Procedimiento de campo.....	34
2.6.3	Monitoreo de la calidad del aire.....	34
2.6.4	Correlación de emisiones respecto al aforo vehicular	34
2.6.5	Validación del equipo AirGradient.....	35
CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		37
3.1	Validación del equipo con estación de referencia.....	37
3.2	Intensidad de tráfico.....	39
3.2.1	Intensidad vehicular horaria.....	40
3.2.2	Intensidad horaria de máxima demanda	41
3.2.3	Factor hora punta	42
3.2.4	Composición vehicular	44
3.3	Monitoreo de calidad del aire	45
3.3.1	Comparación de las emisiones con la norma ecuatoriana de calidad de aire	46
3.4	Correlación de emisiones respecto al tráfico vehicular	49
3.4.1	Correlación de CO2 e Intensidad vehicular	49

3.4.2	Correlación de PM2,5 e Intensidad vehicular.....	52
3.4.3	Correlación de PM10 e Intensidad vehicular.....	54
CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		57
4.1	Conclusiones.....	57
4.2	Recomendaciones	58
BIBLIOGRAFÍA		59
ANEXOS		61

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1 Zonas hipercentro	6
Tabla 2 Vehículos matriculados.....	7
Tabla 3 Principales agentes contaminantes de los vehículos.....	9
Tabla 4 Límites permitidos por la norma de calidad del aire (NECA).....	10
Tabla 5 Niveles de alerta, alarma y emergencia	11
Tabla 6 Detalles del procedimiento de muestreo	17
Tabla 7 Métodos de análisis de muestras.....	18
Tabla 8 Selección del equipo por método de ponderación.	21
Tabla 9 Características del monitor AirGradient O-1PST.....	23
Tabla 10 Características del monitor de referencia Thermo Andersen / FH62C14.....	24
Tabla 11 Caracterización de la flota vehicular.	28
Tabla 12 Recomendaciones para instalar un sensor de calidad del aire	32
Tabla 13 Alturas para instalar un sensor de calidad del aire.....	33
Tabla 14 Intensidad vehicular de la zona de estudio.	39
Tabla 15 Valores factor hora pico semanal.....	43
Tabla 16 Clasificación del parque automotor.	45

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 Mapa geográfico del cantón de Ibarra	4
Figura 2 Sectorización de la ciudad de Ibarra.....	5
Figura 3 Emisión de contaminantes ciudad de Ibarra.....	7
Figura 4 La Contaminación del aire: desde la emisión a la exposición	9
Figura 5 Emisiones determinantes de los vehículos	11
Figura 6 Tipos de emisiones	12
Figura 7 Composición de los gases de escape	12
Figura 8 Proceso de mejora continua de la calidad del aire.....	16
Figura 9 Flujograma empleado para monitorear la calidad del aire.	20
Figura 10 Monitor AirGradient.....	22
Figura 11 Delimitación del área de investigación.....	25
Figura 12 Área de investigación.	26
Figura 13 Panel de Control del sensor AirGradient.....	30
Figura 14 Menú principal del sensor AirGradient.	31
Figura 15 Realización de pruebas piloto.....	32
Figura 16 Instalación del monitor de calidad del aire.....	33
Figura 17 Monitor AirGradient ubicado conjuntamente en una estación de referencia.	36

Figura 18	Correlación entre estación de referencia y sensor low cost en promedios horarios.	38
Figura 19	Correlación entre estación de referencia y sensor low cost en promedios diarios.	38
Figura 20	Intensidad vehicular horaria semanal.	40
Figura 21	Volumen vehicular horario semanal.	41
Figura 22	Intensidad horaria semanal de máxima tráfico.	42
Figura 23	Composición vehicular por segmento.	44
Figura 24	Composición vehicular por categoría.	45
Figura 25	Valores promedios de PM _{2,5}	46
Figura 26	Valores promedios de PM ₁₀	47
Figura 27	Correlación de CO ₂ e intensidad vehicular en promedios horarios.	50
Figura 28	Correlación de CO ₂ e intensidad vehicular en promedios de medios días.	51
Figura 29	Correlación de CO ₂ e intensidad vehicular en promedios diarios.	52
Figura 30	Correlación de PM _{2,5} e Intensidad vehicular en promedios horarios.	53
Figura 31	Correlación de PM _{2,5} e Intensidad vehicular en promedios de medios días.	53
Figura 32	Correlación de PM _{2,5} e Intensidad vehicular en promedios diarios.	54
Figura 33	Correlación de PM ₁₀ e Intensidad vehicular en promedios horarios.	55
Figura 34	Correlación de PM ₁₀ e Intensidad vehicular en promedios de medios días.	55
Figura 35	Correlación de PM ₁₀ e Intensidad vehicular en promedios diarios.	56

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Página
Ecuación [1] Intensidad de tráfico	27
Ecuación [2] Factor hora punta.....	28

INTRODUCCIÓN

Planteamiento del Problema

Ibarra ha sido reconocida como una de las ciudades con el aire menos contaminado de América Latina, sin embargo, se espera un incremento de las fuentes emisoras de contaminantes, tanto fijas, como móviles, en especial por el aumento poblacional y automotor [1]. El aumento de la presencia de sustancias nocivas en el aire puede provocar problemas de salud en las personas, especialmente afectando al sistema respiratorio, y con el tiempo, estas afecciones podrían evolucionar hacia enfermedades graves, como el cáncer, que pueden resultar mortales. Por tanto, ha surgido la necesidad de implementar sensores de bajo costo con el fin de evaluar la calidad del aire en una zona de la ciudad de Ibarra que presente contaminación generada por el tráfico vehicular, debido a que en la ciudad de Ibarra no se ha llevado a cabo el monitoreo de la calidad del aire desde el año 2015.

Objetivos

Objetivo General

Implementar una estación de monitoreo de bajo costo para medir la calidad del aire en una zona de la ciudad de Ibarra.

Objetivos Específicos

- Seleccionar la estación de monitoreo de acuerdo a los requisitos necesarios para medir la calidad del aire proveniente del tráfico.
- Definir los criterios que determinan los sitios más adecuados para la ubicación de la estación de calidad del aire.
- Identificar los segmentos de vehículos y las condiciones de mayores emisiones en el punto de medición.

- Comparar la información recogida por la estación de monitoreo con la Normativa Ecuatoriana de Calidad del aire.

Alcance

En el presente trabajo de investigación se implementa una unidad de medición de la calidad del aire de bajo costo marca AirGradient O-1PST. Esta unidad está equipada con varios sensores de calidad del aire de bajo costo, diseñados para medir material particulado (PM) y dióxido de carbono provenientes de fuentes externas, como el tráfico vehicular. El monitor estará ubicado en la Sánchez y Cifuentes y av. Pérez Guerrero cerca del mercado principal de la ciudad. Los datos recopilados por el monitor serán analizados y comparados con la norma ecuatoriana de calidad del aire (NECA), los mismos que deberán ser correlacionados con el tráfico vehicular para un mejor entendimiento de la contaminación en la zona de estudio. Además, se identificarán los segmentos de vehículos que emiten mayores niveles de contaminantes en el punto de medición.

Justificación

El aire, un elemento esencial del sistema ambiental global de la Tierra, desempeña un papel crucial en el intercambio de partículas y gases entre el ecosistema y los organismos vivos; también es encargado de la difusión de estas sustancias; sin embargo, se ve afectado por la presencia de contaminantes que generan efectos perjudiciales para los seres humanos, los recursos naturales, los ecosistemas, la biodiversidad y el clima, entre otros; por tal razón es necesario instaurar sensores de calidad del aire que posibiliten una medición y observación constante del entorno, específicamente en cuanto al aire, utilizando métodos confiables, eficientes y económicos; esto ayudara a prevenir alteraciones en la calidad y, lo que es más importante, a mantener el equilibrio biológico del sistema terrestre al proteger los procesos naturales de los ciclos biogeoquímicos y los mecanismos de autorregulación [2].

De acuerdo con el Plan de creación de oportunidades 2021-2025 en su Objetivo 11 se busca fomentar la “conservación, restauración, protección y uso sostenible de los recursos naturales”; por tanto, se propone avanzar en las condiciones legales, económicas y de protección ambiental necesarias para que las actividades humanas se desarrollen dentro de un marco de transición ecológica; esto se logrará a través de la implementación de acciones programadas que promuevan la conservación de los hábitats, la gestión eficiente de los recursos naturales y la restauración de los ecosistemas [3].

Basándonos en Plan nacional de oportunidades, en su Objetivo 12 se busca “promover modelos de desarrollo sostenibles mediante la implementación de medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático” [3]. Además, en su política número 12.2 menciona “establecer planes para abordar de manera integral los pasivos ambientales, residuos sólidos, vertidos líquidos y emisiones atmosféricas contaminantes, así como los desechos tóxicos y peligrosos, teniendo en cuenta tanto las áreas urbanas como rurales” [4]. Por lo expuesto anteriormente, es necesario implementar sensores de calidad del aire con el propósito de supervisar el entorno ambiental y asegurar una alta calidad de vida para la población. Además, esta medida contribuirá a la preservación y uso sostenible de los recursos naturales, lo que fortalecerá al país en su compromiso de proteger los derechos de la naturaleza y los derechos humanos, fundamentados en los principios de plurinacionalidad e interculturalidad [2].

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1 Descripción de la ciudad de Ibarra

La localidad de San Miguel de Ibarra es la ciudad más extensa y habitada de la provincia de Imbabura, situada en la región norte del territorio ecuatoriano, a 115 Km al noroccidente de la mitad del mundo (Quito) y a 125 km al sur de la centinela del norte (Tulcán), con una altura de 2.225 m.s.n.m [5]. Debido a su ubicación, la ciudad Ibarra es un área de movimiento intenso para diversas operaciones comerciales, como el traslado de productos del campo hacia las grandes urbes y el flujo de mercancías con destino al norte del país, lo que hace que las vías que cruzan la localidad de San Miguel de Ibarra contribuyan al flujo de tráfico en las vías del país [6].

La **Figura 1** muestra el mapa geográfico de la ciudad de Ibarra con sus delimitaciones geográficas.

Figura 1

Mapa geográfico del cantón de Ibarra



Fuente: Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDYOT) [5].

1.1.1 Población

Según información proveniente del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) en el año 2022, la provincia de Imbabura cuenta con una población de 469 879 residentes, lo que la sitúa como la décima tercera ciudad con mayor cantidad de habitantes en el país. El cantón Ibarra es el

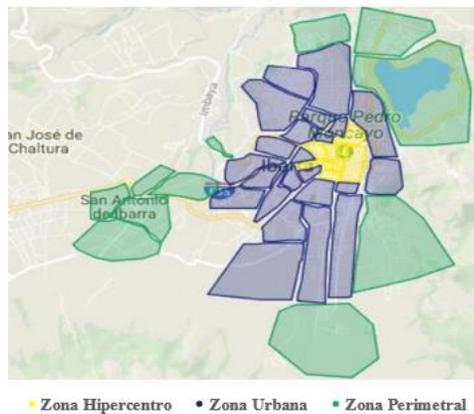
más habitado, con una población de 217 469 personas, de los cuáles 157 941 pertenecen a la zona urbana y 59 528 a la zona rural [7].

1.1.2 Sectorización

Los sectores se distinguen por ser zonas que comparten similitudes en términos de aspectos geográficos, sociales, culturales y funcionales, y están delineados por una combinación de factores naturales y artificiales. De este modo, un territorio puede dividirse en sectores utilizando tres criterios: perimetral, urbano e hipercentro [8].

En la **Figura 2** se muestra la división del cantón Ibarra en diferentes sectores: la parte amarilla corresponde al hipercentro de la urbe; la parte azul engloba el área urbana y la parte verde representa la parte periférica del cantón Ibarra [9].

Figura 2
Sectorización de la ciudad de Ibarra



Fuente: E. V. Cuasapaz Celín y B. E. Cazares García [9].

De acuerdo con la sectorización de la ciudad de Ibarra, el hipercentro es de especial interés y será el objeto de estudio, ya que es una zona concurrida en términos de presencia de personas y actividad comercial, lo que resulta en un alto tráfico vehicular.

A continuación, se describen las tres zonas mencionadas:

La zona perimetral hace referencia a las áreas que rodean la ciudad o se encuentran en las afueras de la misma. En estas zonas, el territorio suele ser más extenso en comparación con las áreas

urbanas y no hay una concentración significativa de personas ni de centros comerciales. Son áreas menos densamente pobladas y con menos desarrollo urbano en términos de infraestructura y servicios [9].

Por otro lado, la zona urbana de una ciudad se destaca por el desarrollo de actividades en los sectores secundarios (industria) y terciarios (servicio). Este espacio se convierte en un punto de convergencia para actividades comerciales, políticas y, en ocasiones, religiosas. Además, se establece como un área comercial, de prestación de servicios y residencial para aquellos que trabajan en la zona. Por lo general, estas áreas urbanas tienden a crecer gradualmente, sobrepasando los límites territoriales, lo que resulta en la expansión de grandes zonas urbanizadas [9].

Por último, la zona hipercentro corresponde al centro de una ciudad, donde se encuentran la mayoría de los puntos de atracción y se observa una alta afluencia de personas [9]. Las actividades económicas predominantes en esta área se centran en el comercio mayorista y minorista, seguidas por el sector de hospedaje y servicios de restauración, las cuales constituyen más del 50 % de las actividades llevadas a cabo en la zona [8]. En la **Tabla 1** se presentan las zonas que delimitan el hipercentro de la ciudad de Ibarra.

Tabla 1
Zonas hipercentro

Zonas Ibarra
Basílica – Colegio Oviedo – Colegio San Francisco hasta Av. Teodoro Ilesa – Santo Domingo
Sánchez y Obispo Mosquera
Mercado Amazonas – CC. Bahía – Tía – Estación del Ferrocarril
Bolívar – Pedro. Moncayo
CC. Laguna. Mall y Colegio Nacional Ibarra
Av. Jaime y Rivadeneira y Coliseo Luis Leoro F.
Obelisco – Olmedo – Chica Narváez – Parque La Merced

Fuente: E. V. Cuasapaz Celín y B. E. Cazares García [9].

1.1.3 Vehículos matriculados

La **Tabla 2** proporciona un resumen del informe anual de transporte del año 2022, donde se presentan las cifras preliminares de vehículos matriculados por segmento en la provincia de Imbabura. En total, se matricularon 70 909 vehículos durante ese año, con un notable predominio de automóviles y SUV en comparación con los otros segmentos de vehículos.

Tabla 2
Vehículos matriculados

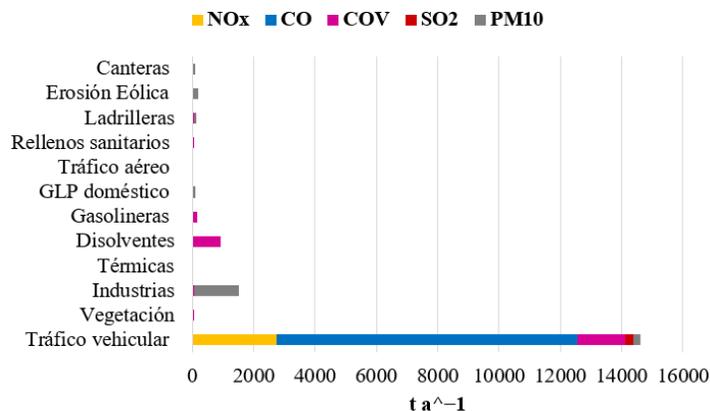
Vehículos por segmentos	Número de vehículos	Vehículos por segmentos	Número de vehículos
Automóvil	23 084	Furgoneta	1 335
Autobús	1 108	SUV	15 715
Camión	3 292	Motocicleta	12 704
Camioneta	12 794	Otros	877

Fuente: Instituto Nacional de Estadística y Censos [10].

1.1.4 Tráfico vehicular y emisiones

En la **Figura 3** se observa que la fuente primaria de contaminación del aire en la ciudad de Ibarra proviene del tráfico vehicular, ya sea de vehículos a gasolina o diésel. Los gases que contribuyen principalmente a la contaminación derivada del tráfico son el CO y NO_x, seguidos de COV, SO₂ y PM₁₀ en menor medida [11].

Figura 3
Emisión de contaminantes ciudad de Ibarra



Fuente: Ministerio del Ambiente [11].

En cuanto a la contaminación del aire, la localidad de San Miguel de Ibarra se distingue por tener concentraciones bajas de partículas, dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno con relación a los límites establecidos por organizaciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS); no obstante, debido al crecimiento proyectado de la población y del parque automotor en el futuro, existe la posibilidad de que los niveles de contaminación aumenten de manera significativa; esto podría llevar a una situación crítica en términos de contaminación [12].

1.2 Calidad del aire

La calidad del aire es un asunto que requiere consideración meticulosa, dado que involucra diversos factores, como la emisión de contaminantes a la atmósfera, así como su transformación química y física. Además, es fundamental considerar las situaciones meteorológicas, ya que pueden incidir en la propagación y retención de estos contaminantes, lo que afecta la velocidad de las reacciones químicas [13].

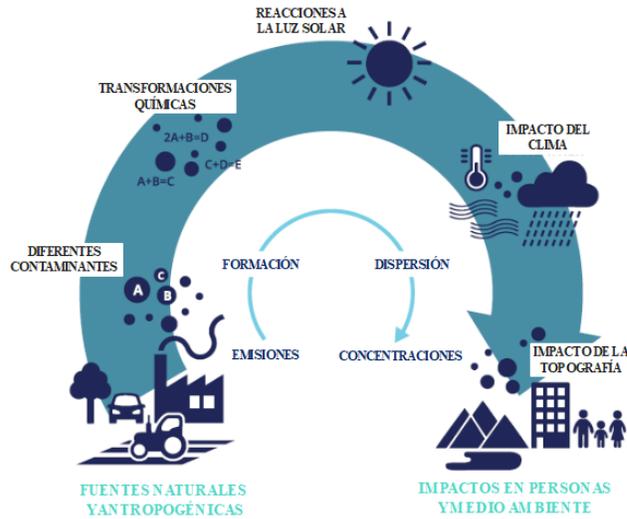
1.2.1 Contaminación del aire

La contaminación del aire implica una combinación diversa de sustancias químicas, que se presentan en forma de partículas sólidas de diversas dimensiones, gotas líquidas y gases. Este fenómeno se origina tanto por fuentes naturales (biogénico), como las erupciones volcánicas y los incendios forestales, como por fuentes causadas por el hombre (antropogénico), tales como el uso de vehículos y la operación de centrales eléctricas [13].

Después de ser emitidos por una fuente natural o antropogénica, los contaminantes del aire son transportados en la atmósfera y pueden en última instancia, impactar el medio ambiente y población humana, como se muestra en la **Figura 4**.

Figura 4

La Contaminación del aire: desde la emisión a la exposición



Fuente: European Environment Agency [14].

1.2.2 Efectos de los contaminantes sobre la salud y el medio ambiente

Los impactos en la salud y el entorno pueden diferir en función del tipo de contaminante o combinación de contaminantes presentes, tal como se muestra en la **Tabla 3**. Estos impactos también dependen del nivel de concentración y el tiempo de exposición, que pueden ser tanto de manera temporal (horas a semanas) como prolongada (meses a años) [13].

Tabla 3
Principales agentes contaminantes de los vehículos

CONTAMINANTE	EFFECTOS EN LA SALUD	EFFECTOS AMBIENTALES
Material Particulado (PM)	<ul style="list-style-type: none"> - Reducción en la capacidad pulmonar - Muerte prematura - Ataques cardíacos no fatales - Latidos cardíacos irregulares - Aumento de los síntomas respiratorios 	<ul style="list-style-type: none"> - Contribuye a los efectos de la lluvia ácida, tales como la acidificación de lagos y arroyos.
Ozono (O₃)	<ul style="list-style-type: none"> - Provoca diversos problemas de salud incluso en niveles muy bajos; puede causar daño pulmonar permanente después de una exposición prolongada; contribuye a la muerte prematura 	<ul style="list-style-type: none"> - Las concentraciones elevadas pueden afectar a la vegetación y los ecosistemas sensibles
Dióxido de Nitrógeno (NO₂)	<ul style="list-style-type: none"> - Irrita las vías respiratorias - Dificulta la respiración - Agrava las enfermedades respiratorias existentes - Aumenta la probabilidad de sufrir un ataque de asma - Aumenta el riesgo de desarrollar infecciones respiratorias 	<ul style="list-style-type: none"> - Contribuye a la formación de O₃ y PM a nivel del suelo - Contribuye a la formación de la lluvia ácida

Tabla 3Principales agentes contaminantes de los vehículos (**Continuación...**)

Dióxido de azufre (SO₂)	- Inflama las vías respiratorias y el tejido pulmonar - Dificulta la respiración - Aumenta la probabilidad de sufrir un ataque de asma	- Contribuye a la formación de la lluvia ácida y PM
Monóxido de carbono (CO)	- En altas concentraciones es venenoso incluso para las personas en excelente estado de salud. A concentraciones más bajas, puede impactar a personas con afecciones cardíacas, atacar el sistema nervioso central, causar fallecimiento prematuro y disminuir el peso de los bebés.	- A nivel global, el CO no tiene un impacto ambiental

Fuente: United Nations Environment Programme [13], [15].

1.2.3 Norma de calidad del aire ambiente en Ecuador

Es la directriz que define los umbrales máximos permitidos para las emisiones nocivas presentes en el ambiente, como se ilustra en la **Tabla 4**. Su propósito es velar por la salud de la colectividad y el entorno [17].

Tabla 4

Límites permitidos por la norma de calidad del aire (NECA)

Contaminante	PM ₁₀		PM _{2,5}		O ₃		NO ₂		SO ₂		CO	
	Unidad		Unidad		Unidad		Unidad		Unidad		Unidad	
	µg/m ³		µg/m ³		µg/m ³		µg/m ³		µg/m ³		µg/m ³	
Periodo de Tiempo	Anual	24h	Anual	24h	8h	1h	Anual	24h	Anual	24h	24h	8h
NECA	50	100	15	50	100	160	40	200	60	125	100	10.000
OMS	20	50	10	25	100	40	20	10

Fuente: Ministerio del Ambiente [18], [16].

1.2.4 Niveles de alerta, alarma y emergencia

La Autoridad Ambiental Competente desarrollará un plan de acción para abordar episodios graves de contaminación atmosférica, definiendo tres niveles de concentración de sustancias nocivas, como se muestra en la **Tabla 5**. Estos niveles se declararán por parte de la autoridad encargada cuando los contaminantes superen los límites estipulados o se prevean situaciones atmosféricas poco favorables en las próximas 24 horas [17].

Tabla 5

Niveles de alerta, alarma y emergencia

Contaminante	PM ₁₀	PM _{2,5}	O ₃	NO ₂	SO ₂	CO
Unidad	µg/m ³					
Periodo de Tiempo	24 horas	24 horas	8 horas	1 hora	24 horas	8 horas
Alerta	250	150	200	1000	200	15000
Alarma	400	250	400	2000	1000	30000
Emergencia	500	350	600	3000	18000	40000

Fuente: Ministerio del Ambiente [18].

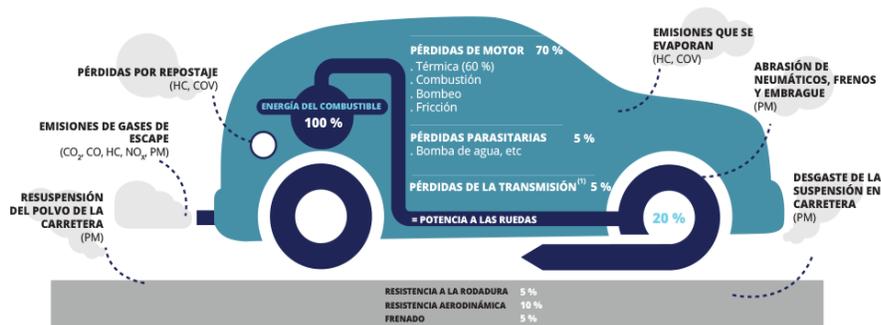
Nota: Pautas de medición: P_{atm}=760 mm Hg y T=25°C

1.3 Emisiones vehiculares

El mayor sitio donde ocurre la disipación de energía en grandes cantidades es el motor, esto se debe a la combustión de combustibles como gasolina o diésel, que generalmente son de origen fósil; además del motor, hay otros sectores del automóvil que también emiten diversos agentes nocivos, como se ilustra en la **Figura 5**.

Figura 5

Emisiones determinantes de los vehículos

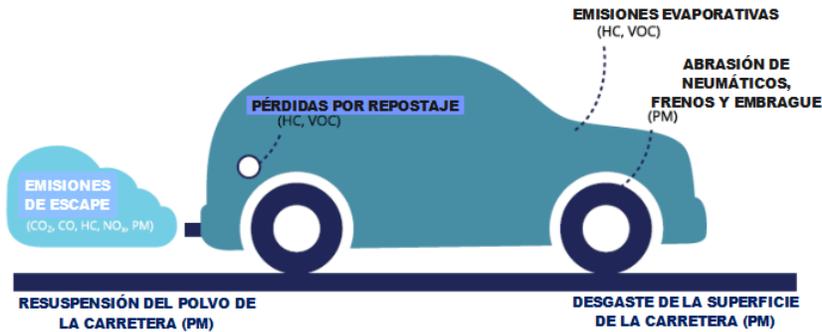


Fuente: European Environment Agency [14].

1.3.1 Tipos de emisiones

Las emisiones vehiculares pueden dividirse en tres diferentes tipos: emisiones de escape (gases de combustión), emisiones de abrasión (partículas sólidas por desgaste) y emisiones evaporativas (vapores de combustible y otros líquidos) como se muestra en la **Figura 6**.

Figura 6
Tipos de emisiones

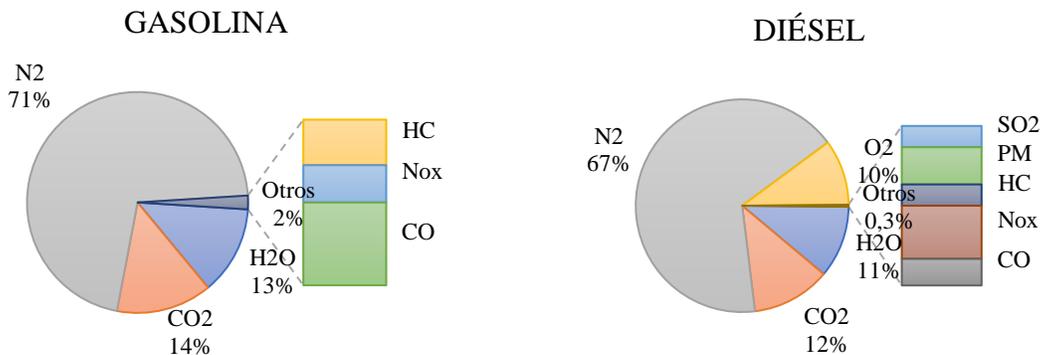


Fuente: European Environment Agency [14].

Con respecto a las emisiones de escape, estas son producidas principalmente por la combustión proveniente del petróleo. El proceso de combustión no es perfecto por que los vehículos emiten muchos contaminantes [14].

La **Figura 7** ilustra el contenido de los gases de escape emitidos tanto de los vehículos a gasolina como de los vehículos diésel. Los motores a gasolina muestran una alta concentración de CO y HC, a diferencia de los motores diésel, que emiten niveles significativos de PM, NO_x y SO_2 .

Figura 7
Composición de los gases de escape



Fuente: Volkswagen Service [19].

Por otro lado, las emisiones de abrasión son importante solo para las emisiones de PM y de algunos metales pesados. Es causado por el roce de neumáticos, frenos, embrague del vehículo, corrosión del chasis [14].

En cuanto a las emisiones evaporativas, estas son importantes solo para los compuestos orgánicos volátiles (COV). El vapor de combustible de gasolina contiene una variedad de hidrocarburos (HC) diferentes, que pueden ser emitidos en cualquier momento que haya combustible en el tanque, incluso cuando el vehículo está estacionado con el motor apagado [14].

1.3.2 Emisiones de gases de efecto invernadero

Cuando se discute sobre los gases de efecto invernadero (GEI), se hace mención del término CO₂ equivalente (CO_{2equ}), debido a que este engloba todas las emisiones de GEI, como el CO₂, CH₄, NO₂, entre otros. Además, es fundamental señalar que el dióxido de carbono es el GEI más conocido y comúnmente medido [8].

1.3.3 Principales emisiones contaminantes provenientes de los vehículos

El monóxido de carbono es un gas que se produce como resultado de una combustión incompleta, que se presenta cuando el carbono contenido en el combustible experimenta una oxidación incompleta, formando CO en lugar de CO₂. Es incoloro e inodoro, pero altamente tóxico [14].

Otros contaminantes, son los hidrocarburos y estos se generan como resultado de una combustión incompleta o parcial. Estos compuestos, y en particular los COV, contribuyen en la generación de ozono secundario en la superficie terrestre y en la formación de smog fotoquímico en la atmósfera [14].

En cuanto a el material particulado, este se produce debido a una combustión incompleta y una mezcla compleja de PM primario y secundario. El PM 'primario' es la fracción de PM que se emite directamente a la atmósfera, mientras que el PM 'secundario' se forma en la atmósfera después de la liberación de gases precursores (principalmente SO₂, NO_x, amoníaco y algunos COV) [14].

Finalmente tenemos a los óxidos de nitrógeno que son una serie de compuestos químicos que se forman por la reacción del nitrógeno - el gas más abundante en el aire - con el oxígeno. NO_x

incluyen monóxido nítrico (NO) - incoloro y NO₂- color marrón rojizo, muy tóxico y reactivo. Las emisiones de NO_x también conducen a la formación posterior de PM "secundario" y ozono troposférico [14].

1.4 Tráfico vehicular

Caracteriza la circulación vehicular en un sector. Sin embargo, es de particular interés conocer la congestión vehicular, que se refiere a un alto volumen de vehículos en una zona específica de la ciudad, principalmente durante los momentos de mayor tráfico, como en las horas pico, lo que ocasiona retrasos en el tiempo de desplazamiento, un aumento en el uso de combustible y una mayor probabilidad de accidentes [20].

1.4.1 Tipos de flujo de tráfico

La circulación continua se caracteriza por la ausencia de dispositivos de control fijos externos a la circulación vehicular que obliguen a los coches a detenerse, tales como semáforos o señalizaciones. Cualquier detención que ocurra se debe a causas internas del propio flujo de tráfico, como accidentes o averías [21].

En contraste, la circulación discontinua se define por la presencia de dispositivos de control fijos que provocan detenciones intermitentes a la circulación vehicular, tales como semáforos o señales de alto; forzando a los vehículos a frenar o disminuir considerablemente su velocidad [21].

1.4.2 Aforos de tráfico

El aforo de tráfico se refiere a la medición o conteo del flujo de coches que transitan por una determinada intersección o tramo de vía en un lapso de tiempo definido, de manera manual o automática [8].

1.4.3 Variables fundamentales del tráfico

Los fundamentos esenciales para analizar el comportamiento del tráfico vehicular se basan en comprender las variables fundamentales: Intensidad, Factor hora punta, Velocidad y Densidad.

La intensidad o volumen de tráfico se refiere a la cantidad de autos que pasan por un tramo de carretera dentro de un intervalo de tiempo específico, normalmente, se utilizan intervalos de tiempo como horas y días para medir el volumen de tráfico, aunque también es posible expresarlo en períodos más amplios, como meses o años, para obtener volúmenes de tráfico mensuales o anuales [8].

Dependiendo del intervalo de tiempo considerado, se pueden identificar diferentes volúmenes de tráfico. La intensidad horaria equivalente o tasa de flujo se refiere a la cantidad de autos que atraviesan un tramo de la vía en un período inferior a una hora, típicamente de 15 minutos, aunque se muestra en términos de horas. Se utiliza principalmente para evaluar la capacidad de la infraestructura vial en momentos específicos del día. Por otro lado, la intensidad horaria indica la cantidad de autos en un lapso de tiempo igual a una hora, siendo la más utilizada junto con la intensidad diaria, que refleja la cantidad de autos que circulan por un tramo de la vía durante un día completo.

Por otro lado, el factor hora punta refleja la fluctuación en el flujo vehicular durante una hora. Los datos de tráfico indican de manera consistente que los volúmenes de vehículos observados durante el período de mayor demanda de 10 o 15 minutos dentro de una hora no permanecen constantes a lo largo de toda la hora [22].

En cambio, la velocidad puede considerarse la más complicada, debido a su naturaleza cambiante tanto a nivel individual (la velocidad de cada vehículo) como en el contexto de todo el conjunto de vehículos. En una sección de carretera, la velocidad difiere notablemente de unos conductores

a otros, incluso al analizar la velocidad de un vehículo en particular, esta no permanece constante, a pesar de los esfuerzos del conductor por mantenerla estable [21].

Por último, la densidad de tráfico se define como la cantidad de autos que ocupan una cierta extensión de una carretera en un instante específico. La densidad puede ser evaluada de diversas maneras, aunque el método más representativo implica contar los vehículos en una imagen de una sección de carretera de longitud conocida. En la práctica, esta medida rara vez se realiza, ya que se puede calcular a partir de la relación que existe entre la velocidad e intensidad [21].

1.5 Monitoreo de la calidad del aire

Este proceso se basa en un grupo de técnicas desarrolladas para recopilar, investigar y procesar de manera persistente y ordenada los niveles de contaminantes existentes en la atmósfera. Esta distinción del monitoreo respecto al muestreo y análisis de contaminantes es importante, aunque a menudo estas actividades se confunden y generalmente se habla únicamente del monitoreo [23].

La **Figura 8** muestra un esquema que describe la función del monitoreo en el contexto del ciclo de gestión de la calidad del aire.

Figura 8
Proceso de mejora continua de la calidad del aire



Fuente: Instituto Nacional de Ecología (INECC), Ed [23].

1.5.1 Muestreo

En el contexto de la calidad del aire, el muestreo implica la evaluación de la polución del aire mediante la captura de muestras de manera intermitente. Hoy en día, este procedimiento se utiliza especialmente para determinar niveles de partículas totales, $PM_{2,5}$ y PM_{10} [23].

1.5.2 Proceso de muestreo

La evaluación de los agentes contaminantes del aire se lleva a cabo utilizando diversos enfoques, los cuales se categorizan siguiendo el concepto de medición, como se detalla en la **Tabla 6**.

Tabla 6
Detalles del procedimiento de muestreo

Tipo de muestreo	Descripción	Ventajas	Desventajas
Pasivo	Se utilizan bombas u otros dispositivos para aspirar el aire hacia un sistema de recolección de muestras.	- Facilidad de uso - Costos reducidos (sin necesidad de electricidad)	- No son efectivos para ciertos contaminantes - Por lo general, proporcionan promedios mensuales y semanales - Necesitan ser analizados en un laboratorio
Activo	Se utilizan dispositivos que permiten que los contaminantes se difundan naturalmente hacia la muestra sin la necesidad de una aspiración activa.	- Facilidad de uso - Altamente fiables - Bajo coste (necesitan alimentación eléctrica)	- Proporcionan promedios diarios. - Necesitan ser analizados en un laboratorio
Automático	Implica el uso de sistemas automatizados que pueden realizar mediciones de manera continua o programada sin intervención humana directa	- Proporcionan variedad de periodos de tiempo. - Mayor precisión - Información en tiempo real	- Necesitan personal con formación para operarlos - Alto costo de compra y funcionamiento - Necesitan ser calibrados - Complejos

Fuente: Instituto Nacional de Ecología [23].

1.5.3 Análisis de muestras

Este método implica la identificación y cuantificación de los componentes presentes en una muestra, incluyendo sus concentraciones y características.

Los métodos de medición que emplean dispositivos de muestreo generalmente demandan que, una vez tomada la muestra del contaminante, esta sea analizada mediante alguno de los siguientes métodos como se muestra a continuación en la **Tabla 7**.

Tabla 7
Métodos de análisis de muestras

Método	Descripción
Volumétrico	Determina la concentración de contaminantes mediante la medición del volumen de aire que ha pasado a través de un filtro o un sistema de recolección durante un período de tiempo específico
Gravimétrico	Mide la concentración mediante el cambio de peso del filtro o del medio de recolección antes y después de la exposición al aire contaminado
Fotométrico	Emplea métodos ópticos para medir la concentración, usualmente basados en la absorción de luz por parte de los contaminantes
Espectrofotometría	Permite identificar y cuantificar la presencia de contaminantes en función de sus propiedades espectrales únicas.

Fuente: Instituto Nacional de Ecología (INECC) [23].

1.6 Sensores de calidad del aire

Son dispositivos que tienen la capacidad de transformar la presencia de contaminantes atmosféricos en señales eléctricas u otros tipos de señales. Algunos de estos dispositivos ofrecen mediciones en tiempo real [24].

1.6.1 Sensores de bajo costo

Los sensores de bajo costo (SBC) han adquirido importancia en tiempos recientes gracias a su capacidad para proporcionar información aceptable sobre la calidad del aire a un precio significativamente inferior al de los métodos tradicionales. Aunque estos sensores tienen una precisión menor que los equipos convencionales, podrían ser una opción para el monitoreo en áreas donde actualmente no se realiza. Estos dispositivos han sido objeto de investigaciones en diferentes regiones del mundo, arrojando resultados favorables [25].

En la actualidad, se han diseñado una variedad de principios de medición para sensores de bajo costo, los cuales se detallan a continuación:

Los sensores electroquímicos detectan gases mediante reacciones de oxidación-reducción, utilizando electrodos separados por una sustancia electrolítica, como ácido mineral. El electrodo de trabajo está en contacto tanto con el electrolito como con el aire ambiente, que se monitorea a través de una membrana porosa. La reacción produce una corriente eléctrica entre los electrodos, que se puede medir desde los pines exteriores del sensor [26].

Por otro lado, los sensores de óxido metálico constan de un elemento calefactor y un sensor semiconductor de óxido metálico. El calefactor eleva la temperatura de la superficie del sensor a alrededor de 300-500 °C, lo que permite que el sensor detecte gases mediante una reacción química que tiene lugar en su superficie [26].

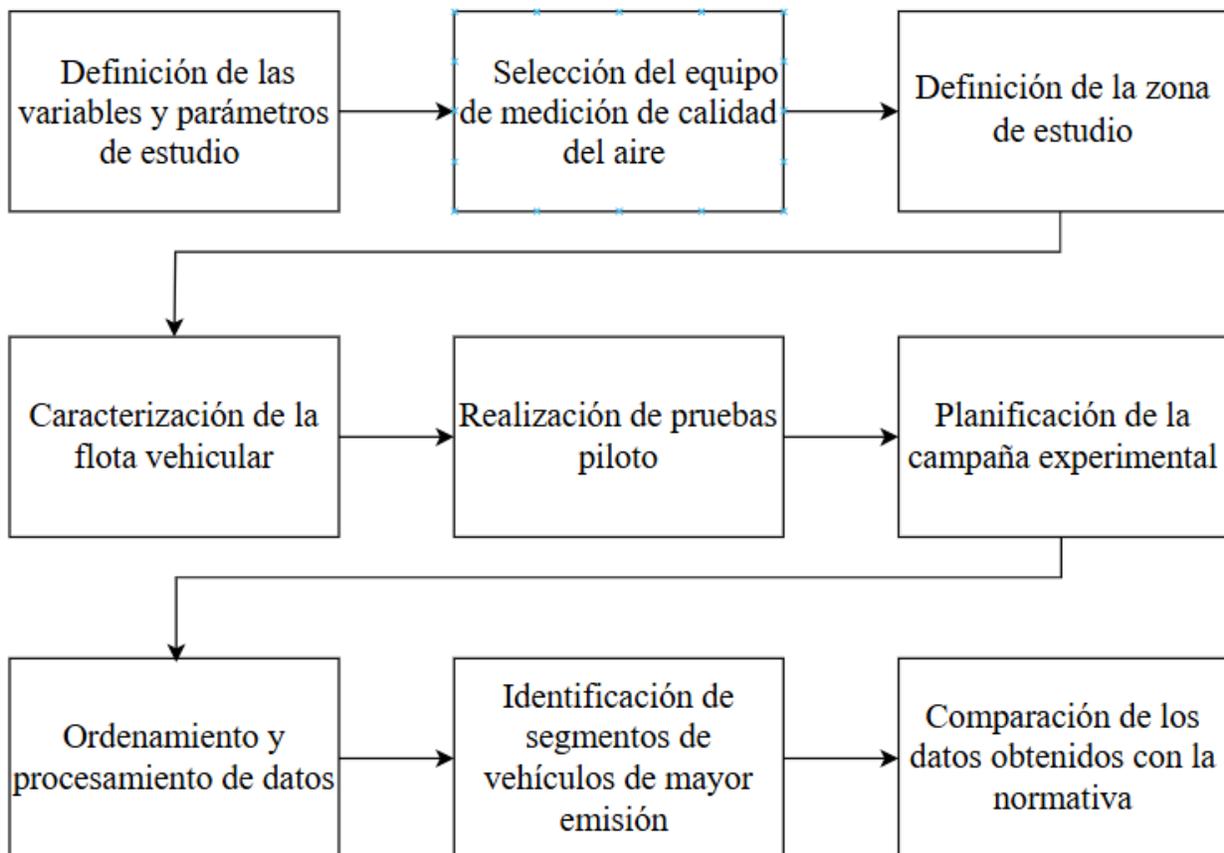
En cambio, los sensores de infrarrojo no dispersivo incluyen una fuente de luz infrarroja, una cámara para tomar muestras del aire, un filtro óptico y un detector. Cuando un gas fluye a través de la cámara, la luz emitida por la fuente infrarroja la atraviesa, y ciertas frecuencias son absorbidas según el tipo de gas. La luz restante pasa al filtro óptico y al detector, el cual convierte las frecuencias en una corriente eléctrica [26].

Por último, los sensores de fotoionización emplean fotones de alta energía para estimular y eventualmente ionizar moléculas orgánicas. La energía transmitida por los fotones en estos sensores generalmente ronda los ~ 10 eV, esto significa que solo pueden excitar moléculas orgánicas con una energía de ionización igual o inferior a ese umbral. La ionización resultante produce una corriente eléctrica que es proporcional a los compuestos orgánicos excitados [26].

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

La **Figura 9** describe los pasos que se han definido para llevar a cabo el tema de investigación, los cuales se realizaron en función de los objetivos planteados anteriormente. En primera instancia se definen ciertas variables del tráfico como la intensidad y factor hora punta que permiten entender mejor el tráfico. Seguido, se muestra las características más importantes del monitor de calidad del aire que se ha seleccionado para la recolección de datos de partículas $PM_{2,5}$ y PM_{10} y emisiones de CO_2 . Luego se detalla el área de estudio de acuerdo a ciertas características importantes que llevaron a la elección del mercado amazonas como punto de monitoreo. Finalmente se realizaron pruebas del monitor como campaña experimental en la zona de estudio, con el fin de poner a punto el sensor AirGradient para el posterior monitoreo de calidad del aire.

Figura 9
Flujograma empleado para monitorear la calidad del aire.



2.1 Selección del equipo de medición de la calidad del aire

Para la selección del equipo, se empleó métodos ponderados de los parámetros de selección. Se compararon tres equipos: un monitor AirGradient de origen tailandés, un PurpleAir de origen estadounidense y un AirVisual de origen suizo. Las variables se definieron en función de los requisitos del trabajo de investigación, como un presupuesto predefinido y los contaminantes a monitorear según la NECA [18].

Se consideraron críticas las variables, la precisión y el costo. La precisión garantiza la fiabilidad de los datos recopilados, mientras que el costo influye en la accesibilidad y viabilidad económica del monitor. Ambos factores son fundamentales para asegurar la efectividad del monitor y cumplir con las expectativas de los usuarios.

Precisión > Costo > Amplitud de Medición > Facilidad de uso > Adquisición

Los pesos de las variables se expresaron en porcentaje, reflejando su importancia en el estudio, y se asignó una puntuación del 1 al 10 a cada equipo según sus características. Tras analizar todas las variables y monitores, se seleccionó el monitor AirGradient por cumplir con todos los criterios necesarios para llevar a cabo las mediciones de manera efectiva, como se muestra en la **Tabla 8**.

Tabla 8
Selección del equipo por método de ponderación.

FACTORES		ALTERNATIVAS		
Descripción	Peso (%)	AirGradient	PurpleAir	IQAir - AirVisual
Precisión	40	9	10	9
Costo	30	10	8	7
Amplitud de Medición	15	9	8	8
Facilidad de uso	10	9	9	9
Adquisición	5	9	10	9
Puntuación Total	100	9,3	9	8,25

2.1.1 Monitor de calidad del aire exterior AirGradient

En la **Figura 10** se muestra el monitor de calidad del aire exterior AirGradient. Evalúa niveles de material particulado, dióxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles totales, óxidos de nitrógeno, temperatura y humedad. Es totalmente de código abierto y personalizable, lo que permite a los usuarios realizar modificaciones de acuerdo con sus necesidades y preferencias individuales.

Figura 10
Monitor AirGradient



Fuente: AirGradient [27].

El monitor AirGradient ofrece a los usuarios la libertad de monitorear y utilizar los datos según sus preferencias. Al ser de código abierto, no se encuentra restringido a ninguna plataforma de datos en particular. La naturaleza de hardware abierto/código abierto del monitor permite cambios y adiciones fáciles en el firmware y el hardware.

Entre sus sensores, el SenseAir S8 (sensor de CO₂) es el único que requiere calibración, la cual puede realizarse automáticamente a través de la entidad de calibración automática en home assistant. AirGradient tiene conectividad a través de un panel en la nube, lo que permite acceder a los datos desde cualquier lugar, siempre que tenga una conexión a internet. Los datos de calidad del aire se guardan en intervalos de 5 minutos y todos los datos se pueden exportar fácilmente para su posterior análisis.

A continuación, se indica en la **Tabla 9** las características más importantes del monitor de calidad del aire de bajo costo.

Tabla 9
Características del monitor AirGradient O-1PST

Especificación	Descripción
Modelo	O-1PST (uso exterior)
Parámetros	PM Sensor (PMS5003T) <ul style="list-style-type: none"> • $\pm 10\%$ @ 100~500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ • $\pm 10\mu\text{g}/\text{m}^3$ @ 0~100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ CO2 Sensor (SenseAir S8) <ul style="list-style-type: none"> • ± 40 ppm $\pm 3\%$ TVOC/NOx Sensor (SGP41) <ul style="list-style-type: none"> • TVOC $<\pm 15$ @ 0 a 500 • NOx $<\pm 50$ @ 0 - 500 Temperatura y humedad (ENS210) <ul style="list-style-type: none"> • Temperatura $\pm 0,2$ °C a 0 - 70 °C • Humedad $\pm 3,5\%$ de humedad relativa a 20 - 80 % de humedad relativa.
Wifi	2,4 GHz Wi-Fi and Bluetooth
Peso	Aprox. 350 gramos
Opciones de montaje	Opciones de montaje en pared o poste
Cable	Cable USB C de 4 m que incluye líneas de datos para flasheo
Enchufe de alimentación	Se requiere un Enchufe de alimentación USB de 2 A y 5 V
Certificaciones	CE, RoHS, ALCANCE, FCC ID: 2AC7Z-ESPC3MINI

Fuente: AirGradient [27].

2.2 Monitor de referencia Thermo Andersen / FH62C14

El monitor empleado por la Secretaría de Ambiente para monitorear la calidad del aire de Belisario en la ciudad de Quito es el monitor Thermo Andersen / FH62C14, fabricado por Thermo Scientific, es capaz de medir en tiempo real partículas gruesas, partículas finas y aerosoles con alta precisión y confiabilidad. Este dispositivo utiliza el método de atenuación de rayos beta, donde los contaminantes son aspirados por una bomba y depositados en una cinta de filtro de fibra de vidrio que se mueve continuamente hacia una cámara que contiene Carbono 14 [28]. El equipo determina la concentración de contaminantes mediante una fórmula basada en la intensidad del haz beta

generado por el emisor. La **Tabla 10** presenta las características más relevantes del equipo de referencia empleado en la validación de datos.

Tabla 10

Características del monitor de referencia Thermo Andersen / FH62C14

Característica	Descripción
Rangos de concentración	0 a 1000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 0 a 10 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (rango automático)
Límite mínimo de concentración detectable	$< 4 \mu\text{g}/\text{m}^3 @ 2\sigma$ (resolución de tiempo de una hora) $< 1 \mu\text{g}/\text{m}^3 @ 2\sigma$ (resolución de tiempo de 24 horas)
Precisión las 24 horas	$\pm 2 \mu\text{g}/\text{m}^3 < 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $\pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3 > 80 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Resolución del tiempo de medición	30 minutos (actualizado cada 4 segundos)
Precisión entre dos monitores	$\pm 2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2- σ , resolución de tiempo de 24 horas)
Exactitud	$\pm 5\%$ (en comparación con FRM de 24 horas)
Fuentes	Beta: Carbono-14, $< 3,7 \text{ MBq}$ ($< 100 \mu\text{Ci}$), vida media de 5700 años
Detectores	Radiométrico: contador proporcional (α y β)

Fuente: Thermo Fisher Scientific [28].

2.3 Definición de la zona de estudio

Para la selección del punto de monitoreo, se consideraron varios aspectos importantes, que se detallan a continuación:

- Áreas de tráfico generadas en el hipercentro de la ciudad de Ibarra
- Flujo vehicular
- Composición del parque vehicular
- Disponibilidad de conexión a wifi
- Acceso a una fuente de alimentación

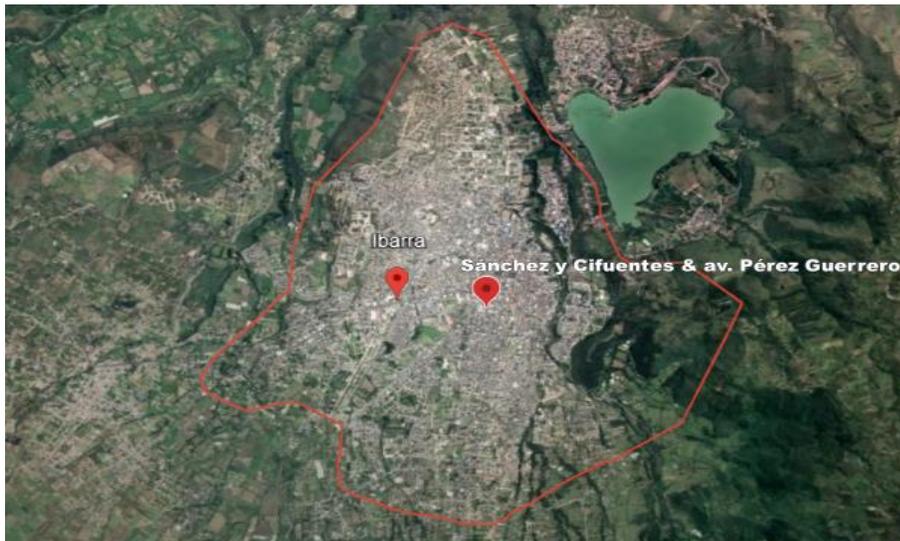
Estas variables se eligieron por su importancia en asegurar la recolección de datos confiables y continuos. El análisis de las áreas de tráfico en el hipercentro permite evaluar los niveles de contaminación en las zonas más concurridas de la ciudad. El flujo vehicular y la composición del parque vehicular son esenciales para identificar las principales fuentes de contaminación. La

disponibilidad de conexión a wifi y una fuente de alimentación garantizan la transmisión y el funcionamiento ininterrumpido de los sensores.

Después de analizar los puntos definidos previamente, se decidió llevar a cabo el estudio en el mercado central de la ciudad, denominado mercado Amazonas, ubicado en la Sánchez y Cifuentes y Av. Pérez Guerrero. Esta elección se basó en el hecho de que dicha área es un punto de atracción importante de la ciudad de Ibarra, con un flujo vehicular considerable y que cumple con las características ya establecidas para el estudio.

Figura 11

Delimitación del área de investigación.



La Av. Alfredo Pérez Guerrero es una arteria vial de cuatro carriles, con dos carriles en cada dirección, mientras que la calle Sánchez y Cifuentes es una vía de doble carril en un único sentido, como se ilustra en la **Figura 12**. En la intersección, el tráfico es regulado por un semáforo que tarda 47 segundos en cambiar de luz verde a luz roja.

Figura 12
Área de investigación.



La característica principal de esta zona es que facilita el acceso a áreas residenciales, institucionales, recreativas y comerciales. Esta área es uno de sectores de la ciudad que concentra la mayor actividad de autobuses de transporte público de la ciudad, operado por dos cooperativas de autobuses urbanos que cubren un total de 24 rutas, resultando en una sobreoferta de servicios de buses con destinos distintos en la misma calle. La Cooperativa "San Miguel de Ibarra" gestiona el 37.5% de estas rutas, equivalente a 9 trayectos, mientras que la Cooperativa "28 de septiembre" se encarga del 62.5% restante, comprendiendo 16 rutas. Esta situación ha provocado que se genere congestión vehicular, lo que disminuye la eficiencia operativa del servicio público debido a los mayores tiempos de desplazamiento y las dificultades para mantener las frecuencias programadas. Además, afecta la circulación de automóviles ligeros, motocicletas y bicicletas en la zona.

2.4 Definición de variables y parámetros de estudio

En este apartado se presentan las fórmulas necesarias para comprender el principio de monitoreo de la calidad del aire en el tráfico vehicular. Luego, se procede a aplicar y calcular cada una de las variables, teniendo en cuenta las magnitudes y unidades adecuadas, así como los parámetros de evaluación y los rangos de tolerancia aceptados.

2.4.1 *Intensidad de tráfico*

La intensidad o volumen de tráfico describe las condiciones de una carretera, ya que permite una visualización clara del flujo vehicular y facilita la caracterización del tipo de tráfico en un tramo específico. La intensidad se define como el número total de vehículos que atraviesan una sección de la carretera durante un período determinado, generalmente medido en intervalos de horas o días, como se ilustra en la ecuación 1:

$$Q = \frac{n_{(x)}}{t} \quad [1]$$

Donde:

Q = Vehículos que pasan por unidad de tiempo [vehículos/h]

$n_{(x)}$ = Número de vehículos que atraviesan la sección [x].

t = Intervalo temporal estudiado.

2.4.2 *Intensidad horaria equivalente*

Es la cantidad total de vehículos que atraviesan un tramo de la carretera en un período de tiempo menor a una hora, típicamente de 15 minutos.

Q_{15} = Intensidad de tráfico en un lapso de 15 minutos

2.4.3 *Composición vehicular*

Se determina mediante porcentajes y se categoriza según la tipología vehicular, como el porcentaje de motocicletas, automóviles, SUV, camionetas, taxis, autobuses entre otros. Esto se aplica tanto al período completo del análisis como a subperíodos dentro de una hora.

La composición vehicular se estableció teniendo en cuenta las características particulares de la zona de estudio. Los vehículos se clasificaron en tres tipos: vehículos livianos, vehículos pesados y motocicletas, tal como se detalla en la **Tabla 11**.

Tabla 11

Caracterización de la flota vehicular.

Tipo de vehículos	Características
Livianos	SUV, camionetas, taxis y automóviles
Pesados	Se incluyen autobuses y vehículos de transporte de carga con dos ejes o más, así como los vehículos utilizados en actividades agrícolas y de construcción
Motocicletas	Incluye todo tipo de motocicleta

2.4.4 Factor de hora punta

El factor de hora punta (FHP) representa la variación del tráfico a corto plazo y se define como la relación entre el volumen máximo de tráfico durante una hora (VHMD) y el flujo máximo observado durante un intervalo específico dentro de esa misma hora, tal como se muestra en la ecuación 2.

$$FHP = \frac{VHMD}{N * Q_{15\text{ máx}}} \quad [2]$$

Donde:

FHP = Factor hora punta

$VHMD$ = Intensidad máxima de tráfico durante una hora

N = Número de periodos en una hora

$Q_{15\text{ máx}}$ = Intensidad máxima registrado durante 15 minutos consecutivos de esa hora

El factor de hora punta es un parámetro que refleja las condiciones del tráfico durante los momentos de mayor demanda. Cuando este valor es igual a 1, indica que el tráfico es homogéneo, lo que significa que los vehículos se mueven de manera constante y uniforme. Por otro lado, cuando los valores son cercanos a cero, el tráfico es considerado no homogéneo, reflejando una mayor variabilidad en las velocidades y el espaciado entre vehículos.

2.5 Realización de pruebas piloto

2.5.1 Configuración de los sensores AirGradient

- **Conexión de sensores AirGradient a internet**

Al encender el sensor por primera vez, este no tiene configurada ninguna red wifi. Por lo tanto, el sensor abrirá un punto de acceso al que se podrá conectar directamente desde un teléfono o computadora para ingresar las credenciales de la red wifi. Para completar este proceso, se siguieron los siguientes pasos:

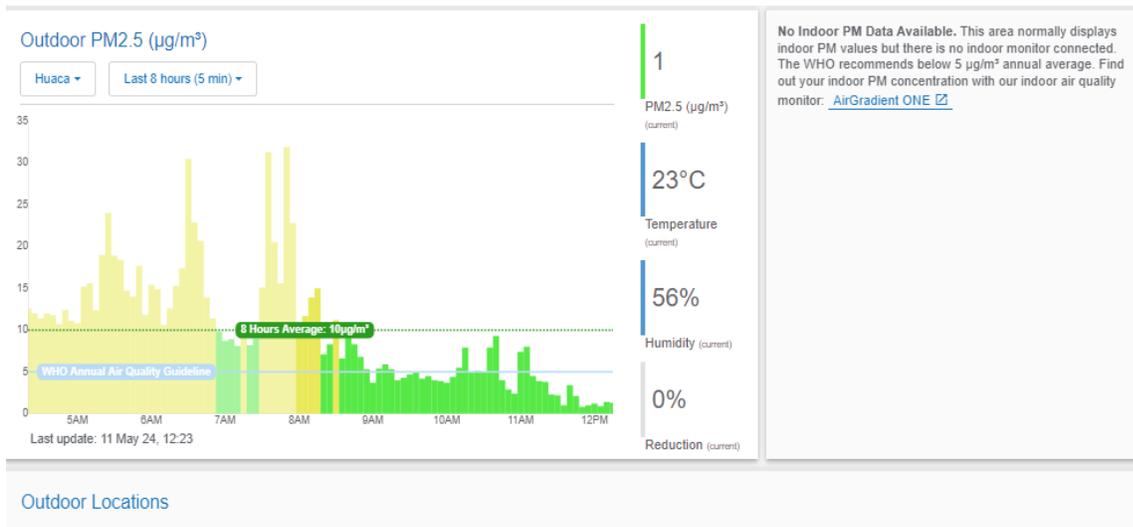
- 1) Conecte el monitor a la fuente de alimentación. La luz de encendido en el sensor se encenderá y empezará a parpadear.
- 2) Busque un punto de acceso Wifi llamado "airgradient-xxxxx" y conéctese a él. Si se le solicita una contraseña, utilice la contraseña "cleanair"
- 3) Asegúrese de anotar el número 'xxxxx', ya que este es el número de serie del monitor que necesita saber para identificarlo en el tablero.
- 4) Espere a que aparezca la pantalla del Administrador de Wifi.
- 5) Presione "Buscar red"
- 6) Seleccione la red Wifi o ingrésala manualmente en caso de que esté oculta.
- 7) Ingrese la contraseña y haga clic en "conectar"
- 8) Una vez que el monitor haya encontrado una conexión a internet activa, el LED de encendido dejará de parpadear.

Nota: Es importante tener en cuenta que se dispone de aproximadamente 180 segundos para completar el último paso antes de que se agote el tiempo de espera. Si este tiempo se excede, se deberán repetir los pasos de configuración.

- **Configuración del panel de control**

Para agregar el monitor al panel de control, se debe acceder a la página de “Conectar sensores” desde el menú principal. Posteriormente, se hace clic en el ícono "Siguiete" en la página de "¡Bienvenido de nuevo!". A continuación, se selecciona la opción "Configurar Kit AirGradient Open Air con o sin código QR, dependiendo del monitor". En la parte inferior del paso 1, se hace clic en el ícono para el siguiente paso. Luego, se introduce el número de serie, el lugar (nombre del panel) y se crea un nombre para el monitor, finalizando con un clic en el ícono "Agregar". Es importante tener en cuenta que puede tardar unos minutos en que el monitor aparezca como activo en el panel de control, tal como se muestra en la **Figura 13**.

Figura 13
Panel de Control del sensor AirGradient.

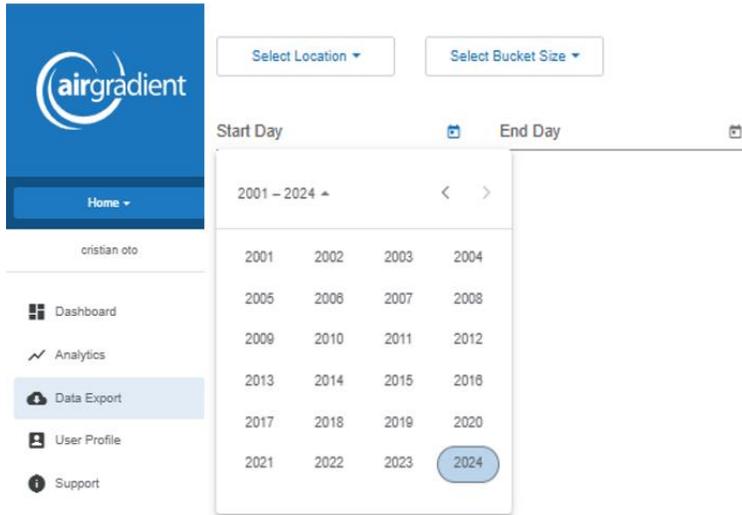


- **Exportación de datos**

Para exportar los datos recopilados, se debe acceder a la página de “Exportación de datos” desde el menú principal. Seleccione el monitor del cual desea obtener los datos (Seleccionar ubicación),

el intervalo de tiempo de los datos que desea (Seleccionar tamaño de intervalo) y el rango de fechas correspondiente, tal como se muestra en la **Figura 14**.

Figura 14
Menú principal del sensor AirGradient.



2.5.2 Pruebas piloto

Las pruebas piloto se llevaron a cabo durante la primera semana de junio, específicamente los días miércoles 5 y jueves 6 de 2024. Se recolectaron datos tanto para el aforo vehicular como para el monitoreo en ambos días completos. Esta estrategia se implementó para asegurar una evaluación exhaustiva de los datos, dado que el estudio se realizó durante siete días consecutivos. Durante este periodo, se verificó el correcto funcionamiento de los sensores, la conexión estable de los equipos a la red wifi y la obtención de datos de monitoreo de cada contaminante a través del panel de control. Asimismo, se comprobó el funcionamiento de la cámara utilizada para registrar el aforo vehicular.

La **Figura 15** muestra el mercado Amazonas, con sus respectivas calles alrededor, lugar que se ha seleccionado para llevar a cabo el monitoreo de calidad del aire después de haberse realizado las pruebas experimentales.

Figura 15
Realización de pruebas piloto.



2.6 Planificación de la campaña experimental

Una vez finalizadas las pruebas piloto y adquirida la familiarización con el funcionamiento de los equipos, se realizó la campaña experimental en el mercado Amazonas. Esta campaña se desarrolló durante 7 días, desde el 17 hasta el 23 de junio de 2024.

2.6.1 Instalación de sensores de contaminación del aire de bajo costo

La **Tabla 12** presenta una serie de recomendaciones que deben seguirse para la correcta instalación de un sensor de calidad del aire, conforme a las directrices establecidas por la Dirección General de Salud Ambiental (DIGESA).

Tabla 12
Recomendaciones para instalar un sensor de calidad del aire

Obstáculo	Distancia
Árboles y Edificios	Se recomienda radio libre de 10 m, alrededor del sitio de muestreo, y no tomar muestras en las superficies laterales de los edificios
Fuentes de emisión: Industriales, comerciales o móviles	Se recomienda 20 m de distancia del sitio de muestreo

Fuente: Dirección General de Salud Ambiental [29].

Para la obtención de datos, es fundamental que el flujo de aire alrededor de la entrada del sistema de toma de muestras esté libre de obstrucciones, garantizando así un flujo sin interferencias cerca

del dispositivo de muestreo. Por lo tanto, se sitúa el sistema de toma de muestras a una distancia adecuada de edificaciones, balcones, árboles y otros obstáculos. Los datos serán más precisos y útiles si el sensor puede medir el contaminante de interés con un impacto mínimo de otras fuentes en el sitio.

La **Tabla 13** muestra las alturas recomendadas según el tipo de estudio, para la correcta instalación de un sensor de calidad del aire, de acuerdo con las directrices emitidas por la DIGESA.

Tabla 13
Alturas para instalar un sensor de calidad del aire

Altura toma de muestra	Tipo de estudio
1.5 a 2.5 m	Par estudios epidemiológicos o de tráfico vehicular
2.5 a 4 m y hasta 8 m	Estudios de calidad del aire de fuentes fijas
10 m	Determinación de parámetros meteorológicos

Fuente: Dirección General de Salud Ambiental [29].

Para la instalación del monitor se omitieron ciertas recomendaciones debido a cuestiones de seguridad y características propias de la zona de estudio. El monitor fue colocado a media cuadra del mercado Amazonas, en la calle Sánchez y Cifuentes, a una distancia aproximada de 4 metros entre el monitor y el nivel del suelo, como se ilustra en la **Figura 16**.

Figura 16
Instalación del monitor de calidad del aire.



2.6.2 Procedimiento de campo

Para la obtención de datos del aforo vehicular se utilizó una cámara de seguridad en la zona de estudio con el fin de recolectar información de forma continua durante todo el periodo de monitoreo. Además, se imprimieron formatos de registro para anotar los datos del aforo vehicular a lo largo de un día completo, en intervalos de 15 minutos, tal como se muestra en el **Anexo 1**. Por otro lado, para la recolección de datos del monitor AirGradient se descargó informes de monitoreo en promedios horarios y diarios. No obstante, para la evaluación de la calidad del aire en el mercado Amazonas, se emplearon únicamente promedios diarios, los cuales fueron comparados tanto con la normativa ecuatoriana como con las guías de la Organización Mundial de la Salud.

2.6.3 Monitoreo de la calidad del aire

Los contaminantes que se monitorearon fueron $PM_{2,5}$ y PM_{10} , debido a que estos presentan mayores riesgos para la sociedad. No obstante, el monitor utilizado para la investigación también mide concentraciones de CO_2 , pero al ser un contaminante de menor riesgo no se encuentra normado de acuerdo con la normativa ecuatoriana, por tanto no será tomado para comparar con la NECA.

2.6.4 Correlación de emisiones respecto al aforo vehicular

Cuando se habla de correlación se hace referencia a la ecuación de regresión lineal y al R^2 denominado coeficiente de determinación. Este valor describe la cantidad de dispersión en los registros y su proximidad a la línea de "mejor ajuste". R^2 varía entre 0 y 1, donde los valores más próximos a 1 reflejan una mayor concordancia entre los datos del sensor y los de referencia. Un valor más cercano a 0 indica una falta de acuerdo.

Los datos obtenidos de las mediciones de emisiones de CO₂ se correlacionaron con el número de vehículos mixtos, mientras que las concentraciones de PM_{2,5} y PM₁₀ se relacionaron con el número de vehículos pesados, considerando promedios horarios, de medios días y diarios. En lo referente a los promedios de medios días, los datos recolectados han sido evaluados en dos intervalos horarios durante el periodo de monitoreo. El primer intervalo, correspondiente al periodo diurno, comprendió desde las 6:00 a.m. hasta las 6:00 p.m., mientras que el segundo intervalo, correspondiente al periodo nocturno, comprendió las horas restantes del día.

2.6.5 Validación del equipo AirGradient

La validación del equipo se llevó a cabo con la colaboración de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito (REMMAQ), la cual dispone de 9 estaciones fijas de monitoreo automáticas. La ubicación de estas estaciones sigue las recomendaciones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos y de la Organización Meteorológica Mundial. Cada estación cubre un área de 5 km de radio y está instalada en cada una de las administraciones zonales municipales. Además, registran parámetros meteorológicos, operan las 24 horas del día durante todo el año y generan promedios cada 10 minutos.

En Quito, los factores que contribuyen a la contaminación del aire incluyen los medios de transporte, los vehículos particulares y la ubicación geográfica de la ciudad. Estas estaciones, debido a su alto costo y mayor precisión, pueden identificar las fuentes de emisión. El particulado oscuro en el ambiente está compuesto por un 48% de diésel, un 21% de gasolina, un 12% de emisiones industriales y un 17% de biomasa. Según el informe de 2022, la zona más afectada por el tránsito vehicular en Quito es Belisario, ubicada en el centro-norte de la capital. Las mayores concentraciones de contaminantes se registran durante los momentos de frío, debido a la necesidad de los vehículos de operar los arranques a bajas temperaturas.

El monitor se ubicó en la estación de referencia de Belisario, situada en la Av. Mariana de Jesús y Av. América 3541, en la terraza del edificio administrativo del colegio San Gabriel, tal como se muestra en la **Figura 17**. El monitor permaneció junto a la estación de referencia durante todo el mes de julio de 2024, sin embargo solo se utilizaron datos de 15 días, esto debido a problemas de desconexión del sensor.

Figura 17

Monitor AirGradient ubicado conjuntamente en una estación de referencia.



CAPÍTULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

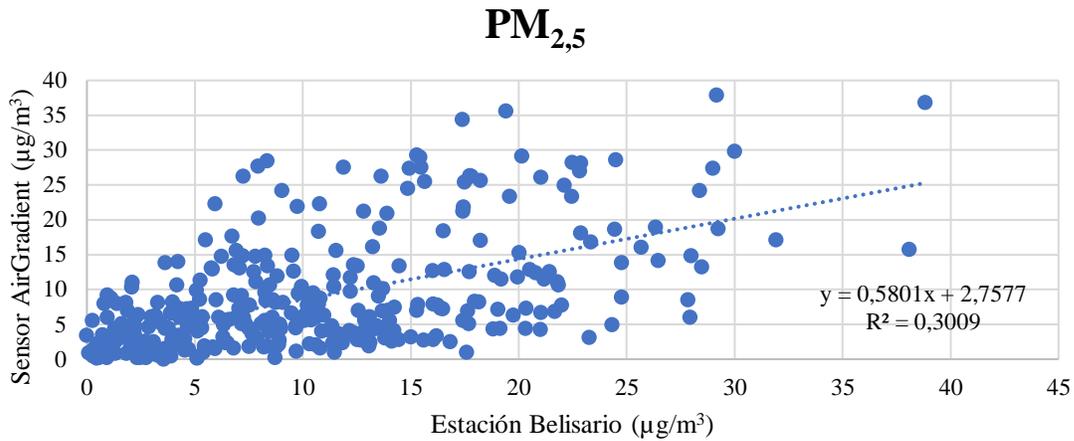
En este capítulo se presenta el análisis de los resultados obtenidos referentes al aforo vehicular y al monitoreo de la calidad del aire, basándose en la metodología aplicada previamente. Los datos recolectados han sido procesados y representados en diferentes tipos de gráficos según las necesidades de cada objetivo, con el fin de lograr un ordenamiento y una mejor comprensión de los valores obtenidos. A pesar de que se utilizaron dos monitores AirGradient en el estudio, solo se consideraron los datos de uno, el cual estaba certificado y respaldado por un informe de prueba.

3.1 Validación del equipo con estación de referencia

Para la validación del monitor AirGradient con la estación de Belisario, solo se consideraron las mediciones de $PM_{2,5}$, esto debido a que dicha estación no proporciona valores de PM_{10} . Los datos extraídos, tanto de la estación de referencia como del monitor AirGradient, se lo hizo en promedios horarios y diarios, durante 15 días del mes de Julio de 2024 y se expresaron en unidades de $\mu g/m^3$. La **Figura 18** muestra la correlación que existe entre la estación de referencia y el sensor de calidad del aire en promedios horarios. Los datos obtenidos revelan que, cuando las concentraciones son bajas, los valores tienden a agruparse cerca de la línea de tendencia, mientras que, a medida que las concentraciones aumentan, estos datos se dispersan, lo que podría ser crítico al intentar monitorear periodos de alta contaminación. En términos de promedios horarios, la correlación es media, con un $R^2 = 0,30$, lo que representa que solo el 30 % de los datos obtenidos tienen relación.

Figura 18

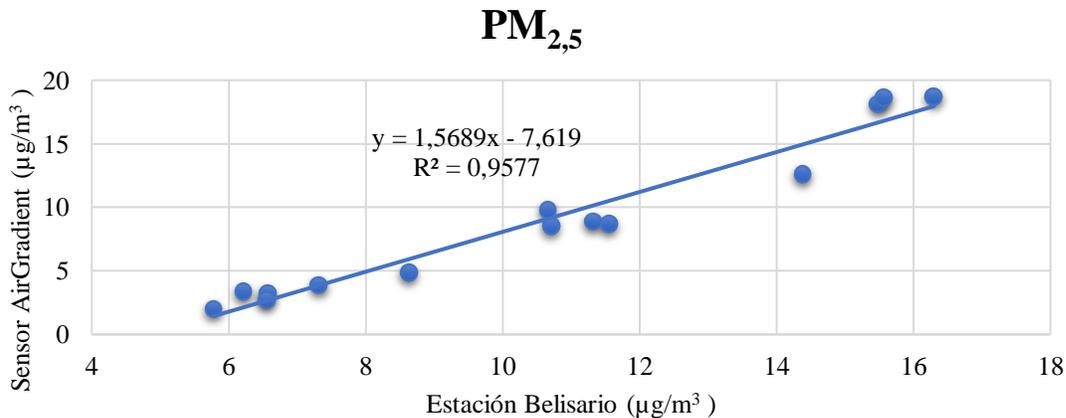
Correlación entre estación de referencia y sensor low cost en promedios horarios.



La **Figura 19** muestra la correlación que existe entre la estación de referencia y el sensor de calidad del aire en promedios diarios. Se puede ver que, las concentraciones se mantienen cerca de la línea de tendencia tanto en valores bajos como altos. En términos de promedios diarios, la correlación es alta, con un $R^2 = 0,95$, lo que representa que el 95 % de los datos obtenidos tienen relación.

Figura 19

Correlación entre estación de referencia y sensor low cost en promedios diarios.



En resumen, los datos obtenidos muestran que existe una mayor correlación entre el instrumento de referencia y el monitor AirGradient cuando se consideran los promedios diarios, en comparación con los promedios horarios. Este comportamiento se debe a que el monitor

AirGradient, al ser un dispositivo de menor costo, presenta una precisión inferior en relación con la estación de monitoreo, lo que ocasiona una baja concordancia en las mediciones horarias. Además, es importante destacar que dentro de la normativa ecuatoriana no se toma en cuenta los promedios horarios, sino que se enfoca en los promedios diarios y anuales.

3.2 Intensidad de tráfico

En este apartado se muestra los resultados preliminares obtenidos mediante el procedimiento de campo con relación a la medida de tráfico llevados a cabo durante 7 días de la semana. La **Tabla 14** muestra un resumen de la cantidad de vehículos por día de los diferentes segmentos de vehículos que se han definido para el estudio conforme al parque vehicular del sector.

Tabla 14
Intensidad vehicular de la zona de estudio.

Mercado Amazonas								Total
Día	Automóviles	SUV	Camionetas	Taxis	Motocicletas	Autobuses	Otros	Vmixtos
Lunes	2378	1383	883	3201	1170	792	196	10003
Martes	2244	1309	832	3393	1156	800	224	9958
Miércoles	2162	1420	874	3187	976	775	199	9593
Jueves	2320	1512	984	3129	1076	806	277	10104
Viernes	2830	1751	1012	3597	1222	791	245	11448
Sábado	2174	1296	773	3249	1082	625	200	9399
Domingo	2031	1177	596	2864	803	477	84	8032

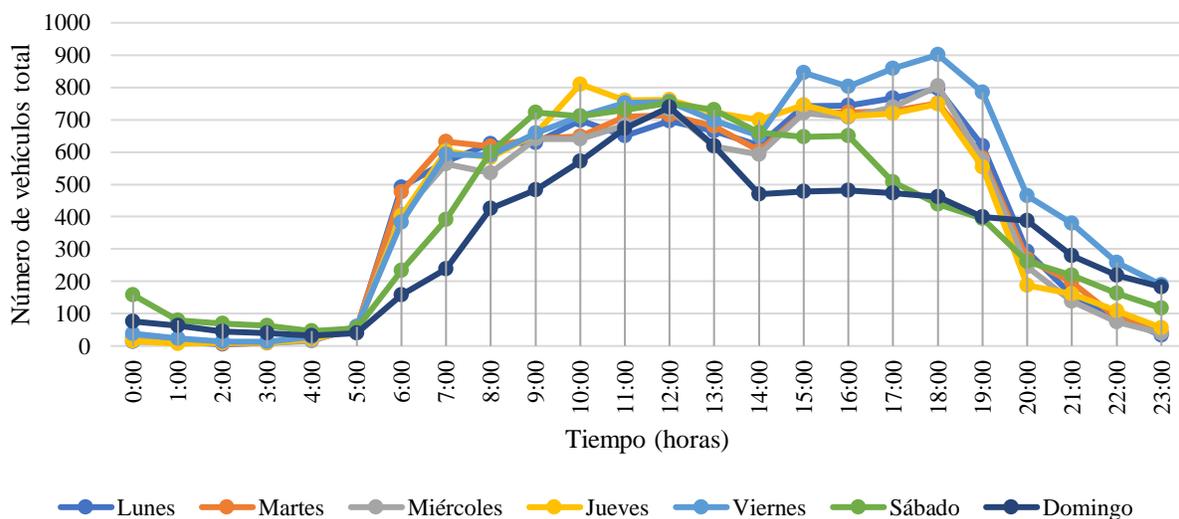
Los datos obtenidos revelan que el día con mayor aforo vehicular es el viernes, con un total de 11 448 vehículos, seguido por el jueves, con 10 104 vehículos. El lunes registra un aforo de 10 003 vehículos, mientras que el martes y miércoles presentan cifras similares, con 9 958 y 9 593 vehículos, respectivamente. En cuanto al fin de semana, el sábado registra un total de 9 399 vehículos, y el domingo, con el menor aforo de la semana, reporta un total de 8 032 vehículos.

3.2.1 Intensidad vehicular horaria

Para los aforos vehiculares realizados durante el período de estudio, se obtuvo el volumen horario sumando el total de vehículos que pasan por el sector durante períodos de 15 minutos. Este procedimiento se lo hizo con el fin de obtener los volúmenes horarios máximos y determinar el factor hora punta. Los resultados se expresaron en términos de vehículos mixtos por hora y vehículos pesados por hora.

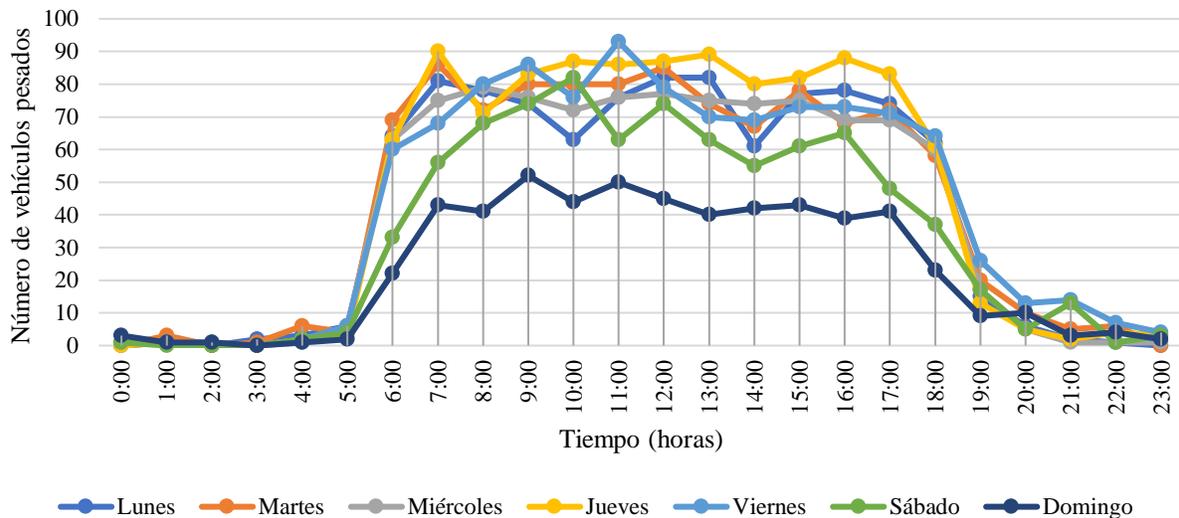
La **Figura 20** muestra el número de vehículos mixtos durante los 7 días de la semana expresado en horas. Se puede observar, un comportamiento distinto a lo largo de la semana, pero con cierta tendencia a lo largo del día, pues existen intensidades vehiculares medianamente bajas en las primeras horas de la mañana entre las 6:00 y 7:00 horas. No obstante, se destacan picos considerables entre las 12:00 y 13:00 horas. Sin embargo, se presentan intensidades vehiculares altas en las horas de la noche entre las 18:00 y 19:00 esto para los días de lunes a viernes. Para los días de fin de semana, existen intensidades vehiculares considerables entre las 11:00 y 13:00 horas y medianamente bajas en el resto del día. Asimismo, las intensidades vehiculares más bajas se dan el domingo en horarios de la mañana, mientras que las intensidades vehiculares más altas se registran el viernes en horarios de la noche.

Figura 20
Intensidad vehicular horaria semanal.



En la **Figura 21** se detalla la variación vehicular horaria de vehículo pesados a lo largo del día, según lo cual se aprecia un comportamiento distinto a lo largo de la semana. En esta figura se observan mayores volúmenes vehiculares durante las horas de la mañana específicamente entre las 7:00 y 8:00 que es donde se presenta intensidades vehiculares altas, y medianamente bajas en el resto del día para los días de lunes a viernes. Para los días de fin de semana, existen intensidades vehiculares considerables entre las 9:00 y 10:00 horas y medianamente bajas en el resto del día. Asimismo, las intensidades vehiculares más bajas se dan el domingo en horarios de la tarde, mientras que las intensidades vehiculares más altas se registran el jueves en horarios de la mañana.

Figura 21
Volumen vehicular horario semanal.

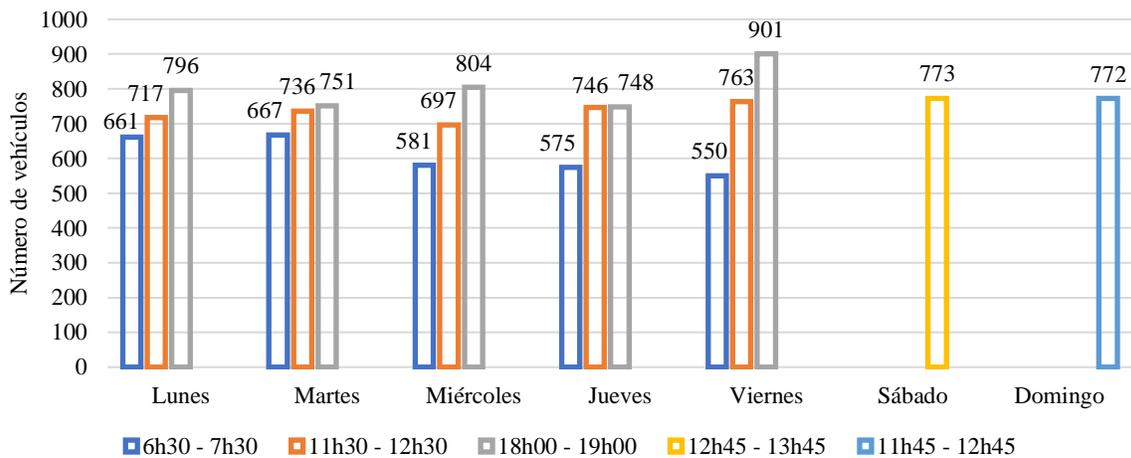


3.2.2 Intensidad horaria de máxima demanda

Para obtener el volumen horario de máxima demanda se seleccionaron las horas de mayor aforo vehicular a lo largo del día. Esto incluyó las primeras horas de la mañana, el mediodía y la tarde, para los días de lunes a viernes. En cuanto a los días de fines de semana, se consideró únicamente una hora de mayor demanda vehicular.

La **Figura 22** presenta el número de vehículos correspondientes a los horarios de máxima demanda para cada día de la semana. Se puede observar que, entre las 6:30 y las 7:30, se presenta el menor aforo vehicular, en contraste con las horas subsiguientes del periodo de aforo. Durante las horas del mediodía, entre las 11:30 y las 12:30, el volumen vehicular tiende a crecer. En el horario de la tarde, entre las 18:00 y las 19:00, se observa un ligero aumento en el aforo vehicular, durante este periodo, los días martes y jueves presentan valores semejantes al horario del medio día, esto para los días lunes a viernes. En lo que respecta a los días de fin de semana, se presentan valores similares de aforo vehicular, aunque en horarios distintos: entre las 12:45 y las 13:45 para el sábado, y entre las 11:45 y las 12:45 para el domingo.

Figura 22
Intensidad horaria semanal de máxima tráfico.



3.2.3 Factor hora punta

La **Tabla 15** presenta los valores del factor de hora pico (FHP) correspondientes a los periodos de mayor demanda vehicular durante los siete días de la semana. Un valor FHP igual o cercano a 1, evidencia un flujo uniforme del tránsito mientras que si presenta valores bajos indica la concentración de flujos máximos. El FHP para áreas urbanas fluctúa entre 0.80 y 0.95.

Tabla 15

Valores factor hora pico semanal.

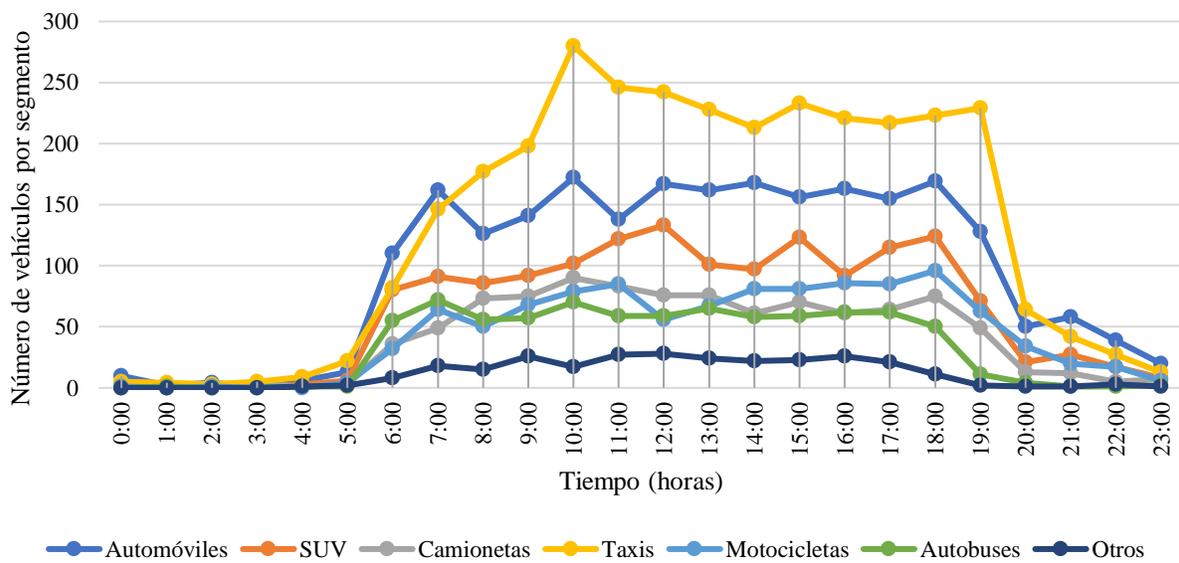
Día	Volumen(Q) (V_{mixtos}/hora)	Q_{15máx} (V_{mixtos}/15min)	FHP	Periodo
Lunes	661	232	0,71	
Martes	667	242	0,69	
Miércoles	581	197	0,74	(6h30 - 7h30)
Jueves	575	185	0,78	
Viernes	550	184	0,75	
Lunes	717	205	0,87	
Martes	736	194	0,95	
Miércoles	697	189	0,92	(11h30 - 12h30)
Jueves	746	194	0,96	
Viernes	763	203	0,94	
Lunes	796	218	0,91	
Martes	751	201	0,93	
Miércoles	804	211	0,95	(18h00 - 19h00)
Jueves	748	197	0,95	
Viernes	901	235	0,96	
Sábado	773	200	0,97	(12h45 - 13h45)
Domingo	772	205	0,94	(11h45 - 12h45)

De acuerdo con los resultados obtenidos, en el periodo de 6:30 a 7:30, el valor promedio de FHP es aproximadamente 0,73. Esto indica que los flujos vehiculares durante las horas pico son moderadamente concentrados, coincidiendo con los desplazamientos de la mayoría de las personas hacia el trabajo y el ingreso a escuelas cercanas al área de estudio. En el periodo de 11:30 a 12:30, el valor de FHP es mayor a 0,9 en casi todos los días analizados. Esto muestra que la frecuencia del paso de los vehículos durante las horas pico mantiene el flujo vehicular dentro de un rango de distribución de los flujos máximos sin concentraciones vehiculares significativas. Finalmente, para los periodos de 18:00 a 19:00, se observan valores similares a los del periodo de mediodía y a los periodos de los días de fin de semana. Sin embargo, para el periodo de 12:45 a 13:45 del sábado, el valor de FHP es de 0,97, lo que indica un tráfico fluido sin complicaciones.

3.2.4 Composición vehicular

La **Figura 23** muestra el número de vehículos por segmento, registrados en un solo día de la semana (jueves), distribuido por horas. Se puede ver que los taxis presentan mayor proporción a lo largo del día, seguido de los automóviles y SUV en menor proporción. Las motocicletas, camionetas y autobuses siguen un patrón similar aunque en menor cantidad.

Figura 23
Composición vehicular por segmento.



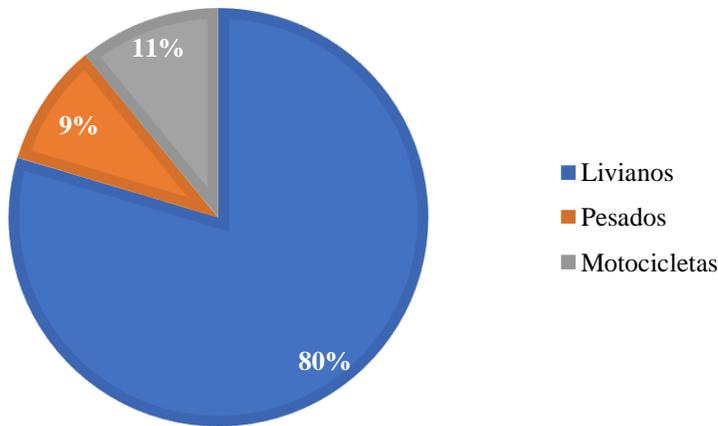
En la **Tabla 16** se presenta la proporción de los distintos segmentos de vehículos. La cantidad de vehículos para cada segmento se calculó a partir de la suma total registrada durante toda la semana de estudio. Dentro de la composición vehicular, se identifican tres tipos de vehículos: livianos (automóviles, SUV, camionetas y taxis), pesados (autobuses y otros) y motocicletas.

Tabla 16
Clasificación del parque automotor.

Clasificación del parque automotor								
Vehículos	Automóviles	SUV	Camionetas	Taxis	Motocicletas	Autobuses	Otros	Total
Cantidad	16139	9848	5954	22620	7485	5066	1425	68537
%	23,5	14,4	8,7	33,0	10,9	7,4	2,1	100

De acuerdo con la **Figura 24** se puede observar que los vehículos livianos representan la mayor parte de aforo, con un 80 % que corresponden a 54 561 vehículos, seguido de motocicletas que representa el 11% del aforo con un total de 7485 unidades, mientras que los vehículos pesados representan el menor aforo con un 9% de la cantidad de vehículos, con un total de 6491 vehículos.

Figura 24
Composición vehicular por categoría.



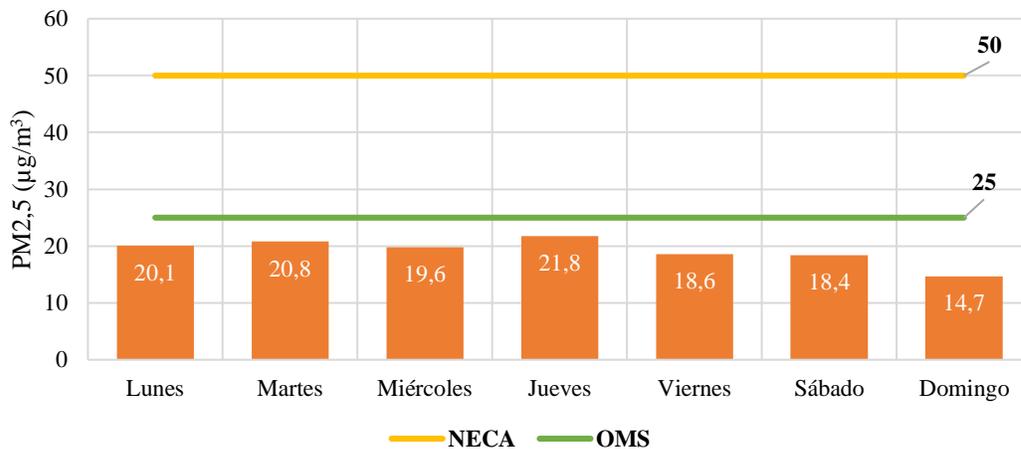
3.3 Monitoreo de calidad del aire

En este apartado se presentan los valores promedios diarios de los contaminantes atmosféricos obtenidos del monitoreo de la calidad del aire, realizado durante la tercera semana de mes de junio.

3.3.1 Comparación de las emisiones con la norma ecuatoriana de calidad de aire

En la **Figura 25** se presenta lo valores promedios diarios de $PM_{2,5}$ en unidad de microgramos sobre metro cúbico correspondientes a cada día de la semana. Se puede observar que el jueves presenta el mayor registro de contaminación con un promedio de $21,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido del lunes y martes que contienen concentraciones semejantes con un total de $20,1$ y $20,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente. Para el miércoles se registra un total de $19,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mientras que para los viernes presentan concentraciones de $18,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Para los días de fin de semana, el sábado presenta un promedio de $18,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, el domingo registra los valores más bajos de contaminación con un total de $14,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En promedio para esa semana se registra un total de $19,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Además, la presencia de $PM_{2,5}$ se reduce en un $27,15 \%$ el domingo con respecto a los días laborales, esto debido a que los fines de semana son días de descanso, por lo que la gente tiende a permanecer en sus hogares.

Figura 25
Valores promedios de $PM_{2,5}$.

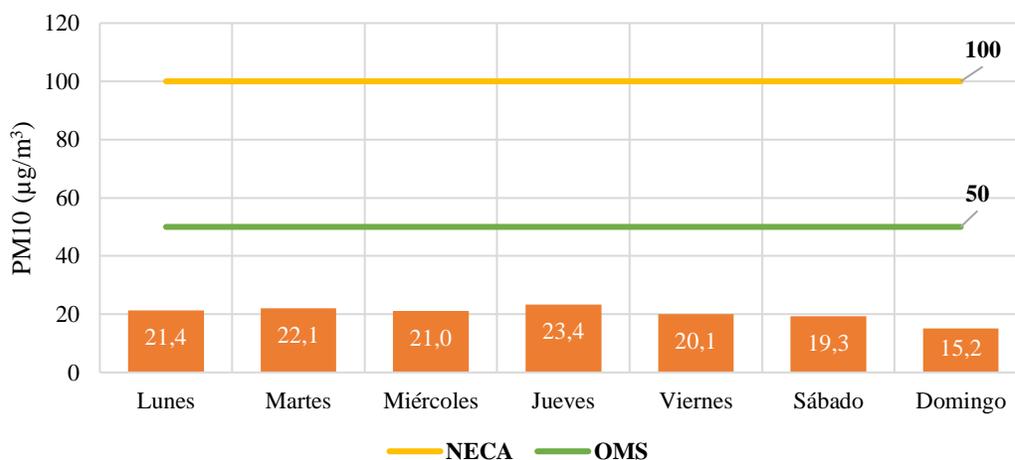


En la **Figura 26** se presenta lo valores promedios diarios de PM_{10} en unidad de microgramos sobre metro cúbico correspondientes a cada día de la semana. Se puede observar que, los registros de PM_{10} durante la semana tiende a seguir la misma tendencia de $PM_{2,5}$. El jueves presenta el mayor

registro de contaminación con un total de 23,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, seguido del martes que contienen concentraciones de 22,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Los lunes y miércoles presentan concentraciones semejantes con un promedio de 21,4, y 21,0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente, mientras que para los viernes presentan concentraciones de 20,1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Para los días de fin de semana, el sábado presenta un promedio de 19,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, el domingo registra los valores más bajos de contaminación con un promedio de 15,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. En promedio para esa semana se registra un total de 20,35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

Figura 26

Valores promedios de PM_{10} .



La variabilidad que existe en los valores obtenidos referentes a la concentración de $\text{PM}_{2,5}$ y PM_{10} diarios, puede atribuirse en gran parte a la diferencia de aforo vehicular que se produce durante el día, especialmente de los vehículos pesados, que son los principales emisores de este tipo de contaminantes.

Los datos obtenidos referente a los aforos de vehículos pesados revelan que, durante los días de semana, el lunes se registraron un total de 988 unidades, el martes 1 024 unidades y el miércoles 974 unidades. El jueves presentó el mayor número, con un total de 1 083 unidades, mientras que para el viernes se registraron 1036 unidades. En cuanto a los días de fin de semana, el sábado se contabilizaron 825 unidades, mientras que el domingo se observó la menor cantidad, con 561

unidades. Esto evidencia que la cantidad de vehículos pesados que circulan diariamente influye directamente en las concentraciones de material particulado en la atmósfera.

Los datos obtenidos para el mercado Amazonas indican que la cantidad de $PM_{2,5}$ y PM_{10} presentes en el aire, cumplen tanto con la normativa ecuatoriana como con las guías de la Organización Mundial de la Salud. Esto se debe, en parte, a su ubicación geográfica, ya que hasta la ciudad ingresan por la hoya del Chota diversas corrientes de aire que provienen de la costa que ayudan a mantener el aire en movimiento y permiten la aeración de la ciudad. Además, la baja industrialización y los esfuerzos en conservación forestal contribuyen a la mejora de la calidad del aire.

De acuerdo con un informe sobre la calidad del aire en 1600 ciudades de 91 países, presentado por la OMS, ubica a Ibarra como la segunda ciudad en Latinoamérica y la primera del Ecuador con el aire más limpio. En dicho informe, se registraron concentraciones anuales promedio de $9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de $PM_{2,5}$ y $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de PM_{10} . Es importante resaltar que la información presentada por la OMS se basa en informes oficiales nacionales y subnacionales, sitios web y organismos nacionales pertinentes.

En cuanto a las concentraciones de PM_{10} , un estudio realizado entre 2012 y 2015 reveló que el promedio anual más alto se registró en 2012, con $19,15 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Durante ese año, el día con mayor concentración de PM_{10} alcanzó los $54,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Los años subsiguientes mostraron promedios anuales de $13,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2013, $12,73 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2014 y $14,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en 2015. Además, los días con mayor concentración para esos años fueron $51,27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $37,88 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $43,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$, respectivamente.

Aunque los valores proporcionados por estudios anteriores son promedios anuales, en comparación con los valores diarios obtenidos en este estudio, se evidencia los bajos niveles de contaminación de $PM_{2,5}$ y PM_{10} para la ciudad de Ibarra.

3.4 Correlación de emisiones respecto al tráfico vehicular

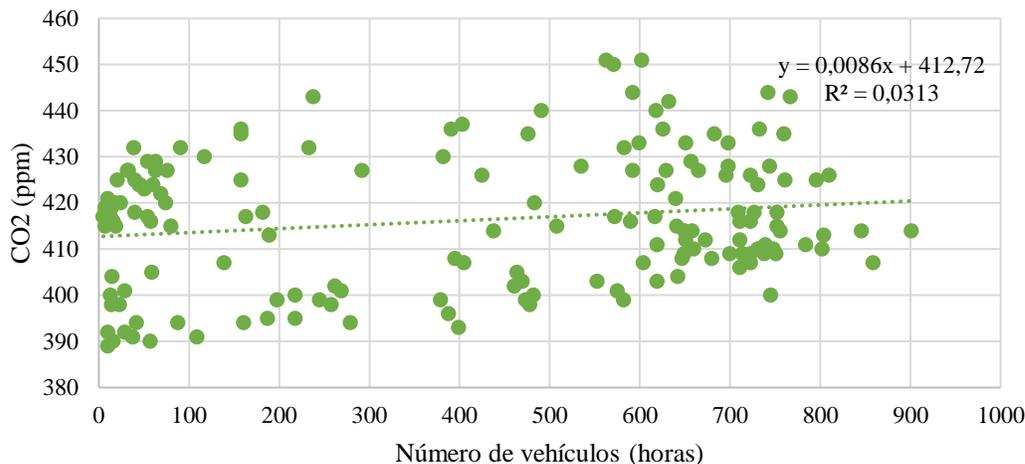
La relación entre los datos obtenidos del aforo vehicular y del sensor de calidad del aire se estableció considerando los promedios horarios, medios días y diarios, abarcando los siete días de la semana. En el análisis, se incluyeron las emisiones de CO_2 y las concentraciones de partículas $PM_{2,5}$ y PM_{10} .

3.4.1 Correlación de CO_2 e Intensidad vehicular

La **Figura 27** presenta la correlación entre las emisiones de CO_2 (medidas en partes por millón, ppm) y el número de vehículos mixtos en promedios horarios. Los datos obtenidos durante toda la semana muestran una correlación solo del 3.13% entre las emisiones de CO_2 y aforo vehicular, con un coeficiente de determinación promedio de $R^2 = 0,0313$. El valor bajo del coeficiente de determinación sugiere que existen otros factores significativos que han influido en las emisiones de CO_2 y que no fueron considerados en este análisis. Entre estos factores podrían encontrarse las condiciones meteorológicas, altura de instalación del monitor, así como las características geográficas de la zona evaluada.

Figura 27

Correlación de CO₂ e intensidad vehicular en promedios horarios.

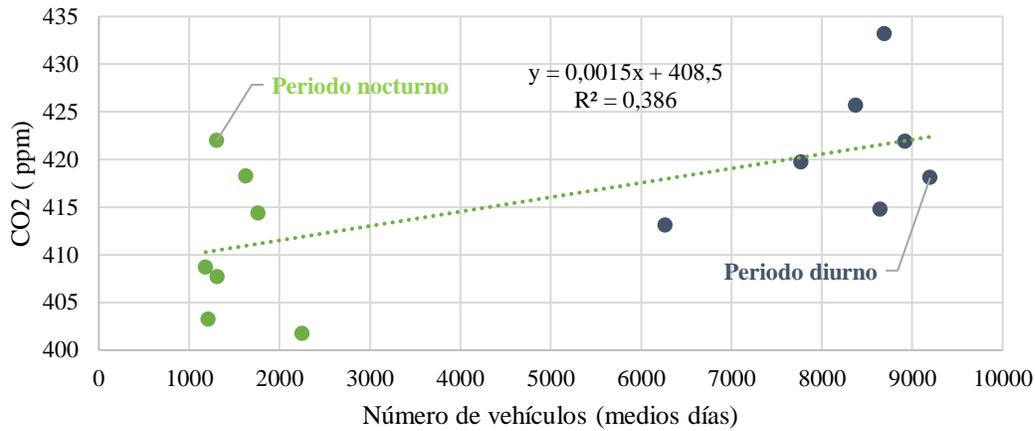


En la **Figura 28** se ilustra la correlación entre las emisiones de CO₂ (medidas en partes por millón, ppm) y el número de vehículos mixtos en promedios de medios días. Los datos obtenidos durante toda la semana muestran una correlación del 38.6% entre las emisiones de CO₂ y aforo vehicular, con un coeficiente de determinación promedio de $R^2 = 0,386$. Los resultados obtenidos en promedios de medios días, muestra una correlación mayor respecto a los promedios horarios. Este comportamiento se explica por el aumento de las emisiones de CO₂ durante el periodo diurno, causado principalmente por el mayor volumen de vehículos en circulación debido a actividades laborales, escolares y comerciales. Además, las condiciones meteorológicas desempeñan un papel fundamental en la dispersión de los contaminantes, lo que favorece su concentración en ciertos momentos del día.

Por otro lado, en el periodo nocturno, las emisiones tienden a disminuir como resultado de una reducción en el flujo vehicular. Además, las condiciones meteorológicas nocturnas contribuyen a que las partículas se agrupen y se depositen en las capas más bajas de la atmósfera, lo que reduce aún más la dispersión de los contaminantes durante la noche.

Figura 28

Correlación de CO₂ e intensidad vehicular en promedios de medios días.

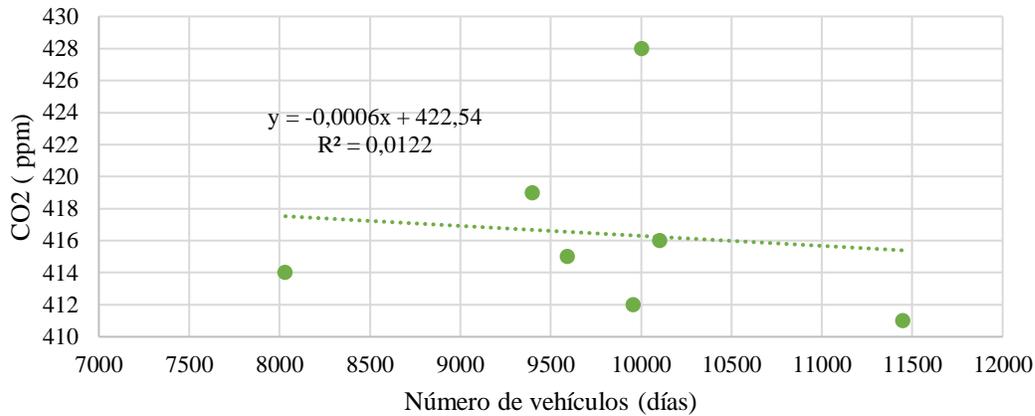


La **Figura 29** muestra la correlación entre las emisiones de CO₂ (medidas en partes por millón, ppm) y el número de vehículos mixtos en promedios diarios. Los datos obtenidos durante toda la semana muestran una correlación solo del 1.2% entre las emisiones de CO₂ y aforo vehicular, con un coeficiente de determinación promedio de $R^2 = 0,0122$. Este valor tan reducido sugiere que el número de vehículos no explica de manera significativa las variaciones en las emisiones de CO₂. Una posible causa de esta baja correlación podría ser el uso de promedios diarios, lo que no refleja adecuadamente las fluctuaciones que ocurren durante el día. Aunque las correlaciones horarias y de mediodía tampoco son altas, ofrecen una perspectiva más detallada que podría proporcionar información valiosa sobre la relación entre el tráfico vehicular y las emisiones de CO₂.

Es importante destacar que el CO₂ es un gas presente en la atmósfera, con concentraciones exteriores habituales de aproximadamente 400 ppm, que pueden llegar hasta los 1000 ppm en ciertas condiciones. En este estudio, las concentraciones medidas no superaron los 500 ppm durante el día, lo que indica una posible discrepancia con el número de vehículos registrados, ya que no se observó un aumento proporcional en las emisiones a pesar del tráfico vehicular.

Figura 29

Correlación de CO₂ e intensidad vehicular en promedios diarios.

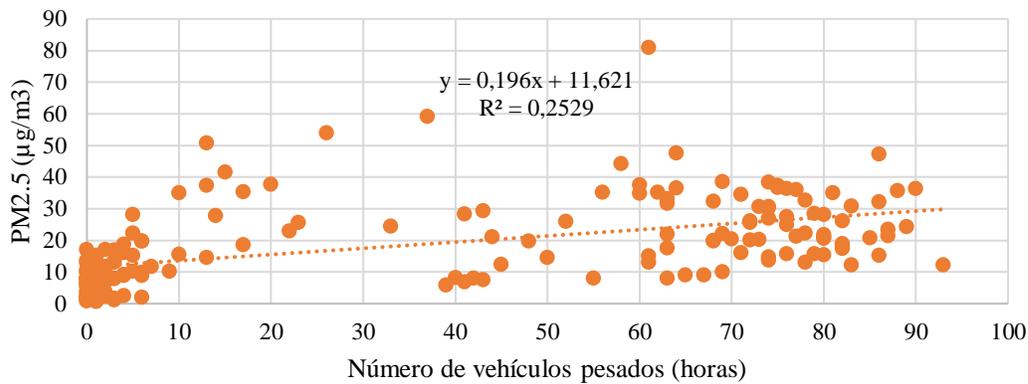


3.4.2 Correlación de PM_{2,5} e Intensidad vehicular

En la **Figura 30** se muestra la correlación entre las emisiones de PM_{2,5} (medidas en microgramos sobre metro cúbico, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el número de vehículos pesados en promedios horarios. Se puede observar que los datos obtenidos durante toda la semana muestran una correlación del 25% entre las emisiones de PM_{2,5} y aforo vehicular, con un coeficiente de determinación promedio de $R^2 = 0,252$. No obstante, las emisiones de PM_{2,5} tienden a tener una correlación más alta a diferencia de las emisiones de CO₂, especialmente cuando se consideran los vehículos pesados en lugar de los vehículos mixtos, lo que sugiere que estos últimos contribuyen de manera considerable a las emisiones de PM_{2,5}. Esta mayor correlación también se atribuye a la alta precisión del sensor de PM_{2,5}, el cual es el más fiable entre los sensores del monitor AirGradient.

Figura 30

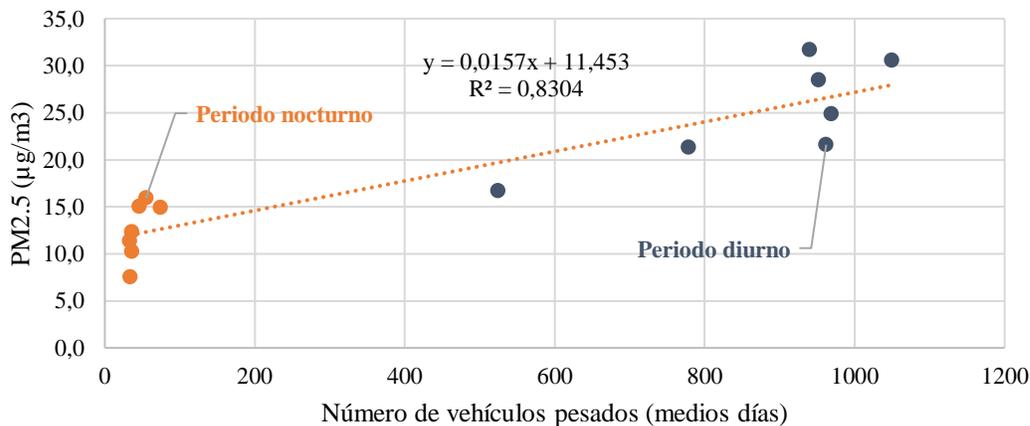
Correlación de $PM_{2,5}$ e Intensidad vehicular en promedios horarios.



La **Figura 31** ilustra la correlación entre las emisiones de $PM_{2,5}$ (medidas en microgramos sobre metro cúbico, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el número de vehículos pesados en promedios de medios días. Se puede observar que los datos obtenidos durante toda la semana muestran una correlación del 83% entre las emisiones de $PM_{2,5}$ y aforo vehicular, con un coeficiente de determinación promedio de $R^2 = 0,83$.

Figura 31

Correlación de $PM_{2,5}$ e Intensidad vehicular en promedios de medios días.

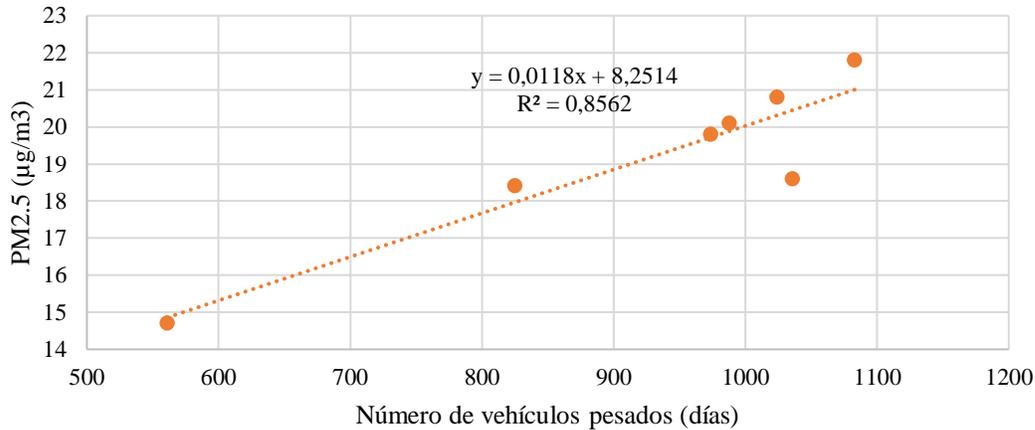


La **Figura 32** presenta la correlación entre las emisiones de $PM_{2,5}$ (medidas en microgramos sobre metro cúbico, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el número de vehículos pesados en promedios diarios. Se puede observar

que los datos obtenidos durante toda la semana muestran una correlación del 85% entre las emisiones de $PM_{2,5}$ y aforo vehicular, con un coeficiente de determinación promedio de $R^2 = 0,856$.

Figura 32

Correlación de $PM_{2,5}$ e Intensidad vehicular en promedios diarios.



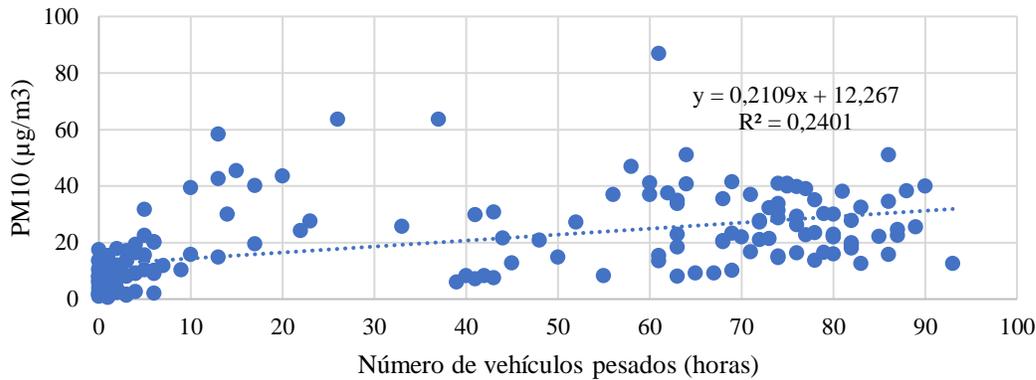
Los resultados indican que, al comparar los tres periodos analizados, la relación entre los vehículos pesados y las emisiones de $PM_{2,5}$ es baja cuando se utilizan promedios horarios. Sin embargo, al considerar promedios de medios días y diarios, esta relación es fuerte.

3.4.3 Correlación de PM_{10} e Intensidad vehicular

En la **Figura 33** se ilustra la correlación entre las emisiones de PM_{10} (medidas en microgramos sobre metro cúbico, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el número de vehículos pesados en promedios horarios. Se puede observar que los datos obtenidos durante toda la semana muestran una correlación del 24% entre las emisiones de PM_{10} y aforo vehicular, con un coeficiente de determinación promedio de $R^2 = 0,24$. Además, los resultados reflejan una tendencia similar a la observada para las emisiones de $PM_{2,5}$, lo cual se debe a que las emisiones de PM_{10} no muestran variaciones significativas en comparación con las de $PM_{2,5}$.

Figura 33

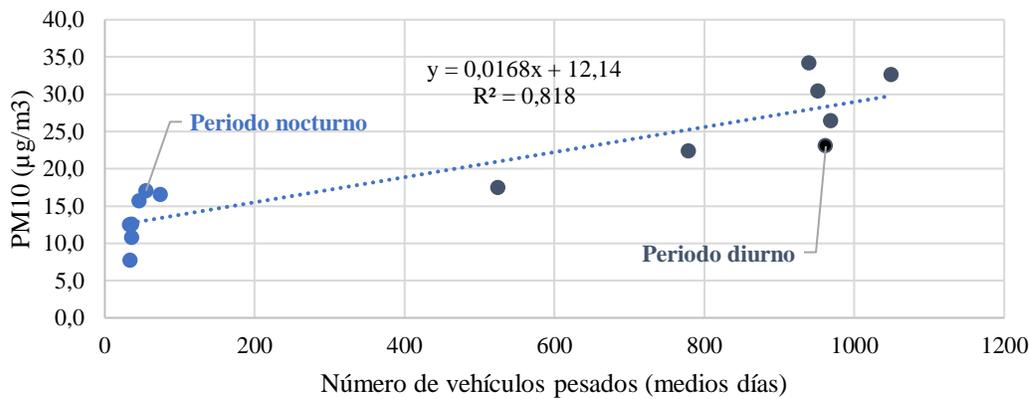
Correlación de PM_{10} e Intensidad vehicular en promedios horarios.



En la **Figura 34** se ilustra la correlación entre las emisiones de PM_{10} (medidas en microgramos sobre metro cúbico, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el número de vehículos pesados en promedios de medios días. Se puede observar que los datos obtenidos durante toda la semana muestran una correlación del 81% entre las emisiones de PM_{10} y aforo vehicular, con un coeficiente de determinación promedio de $R^2 = 0,818$.

Figura 34

Correlación de PM_{10} e Intensidad vehicular en promedios de medios días.

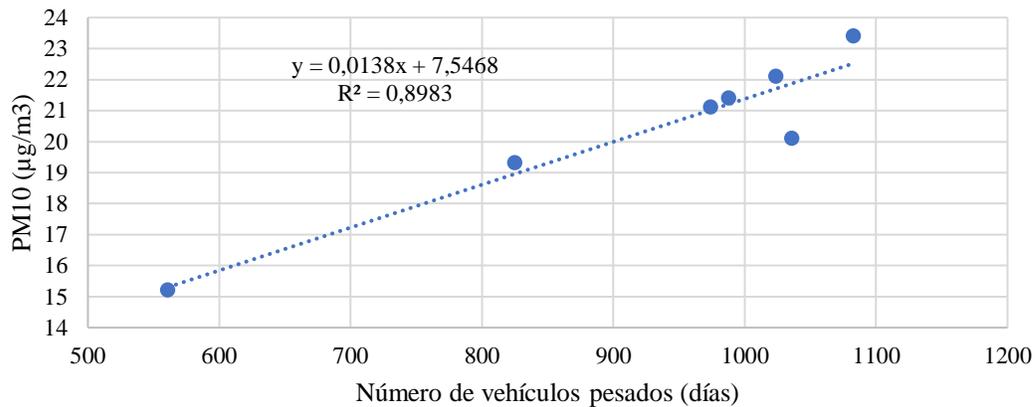


En la **Figura 35** se ilustra la correlación entre las emisiones de PM_{10} (medidas en microgramos sobre metro cúbico, $\mu\text{g}/\text{m}^3$) y el número de vehículos pesados en promedios diarios. Se puede observar que los datos obtenidos durante toda la semana muestran una correlación del 89% entre

las emisiones de PM_{10} y aforo vehicular, con un coeficiente de determinación promedio de $R^2 = 0,898$.

Figura 35

Correlación de PM_{10} e Intensidad vehicular en promedios diarios.



En resumen, los resultados indican que no se encontró una relación significativa entre las emisiones de CO_2 y el número de vehículos mixtos. Sin embargo, se observó que los vehículos pesados tienen un impacto directo en las emisiones de $PM_{2,5}$ y PM_{10} . Esto se refleja en un coeficiente de determinación superior a 0,8, especialmente durante los periodos de medios días y en los promedios diarios, lo que evidencia una fuerte correlación entre vehículos pesados y la concentración de partículas contaminantes.

CAPÍTULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Los promedios diarios de $PM_{2,5}$ y PM_{10} en el mercado Amazonas no superaron los límites establecidos por la Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire ni los valores guía recomendados por la Organización Mundial de la Salud. La mayor concentración de partículas que se registró fue un promedio de $21,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2,5}$ y $23,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} . En términos generales, el promedio semanal fue de $19,14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para $PM_{2,5}$ y $20,35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para PM_{10} , lo que demuestra que la calidad del aire se mantuvo dentro de parámetros definidos por la NECA y la OMS, durante el periodo de estudio.
- El sensor de calidad del aire AirGradient presentó una baja correlación con la estación de referencia de Belisario al analizar promedios horarios de $PM_{2,5}$, obteniéndose un coeficiente de determinación R^2 de 0,30. Sin embargo, al considerar promedios diarios, la correlación mejoró significativamente, alcanzando un R^2 de 0,95. Esto demuestra que el sensor ofrece mayor precisión en mediciones diarias y se ajusta a los promedios diarios estipulados por la NECA y la OMS. Por lo tanto, el sensor es apropiado para medir la polución en función de estos indicadores, aunque no es adecuado para correlaciones instantáneas.
- El aumento en las concentraciones de $PM_{2,5}$ y PM_{10} estuvo fuertemente relacionado con la circulación de vehículos pesados, tanto en promedios de medio día como en promedios diarios, obteniéndose un R^2 superior a 0,8. Por otro lado, las concentraciones de CO_2 no mostraron una correlación directa con el número total de vehículos. Sin embargo, entre los diferentes períodos analizados, los promedios de medios días mostraron la mayor correlación, obteniéndose un R^2 de 0,38, lo que indica una relación media.

- El factor de hora punta (FHP) promedio calculado en el presente estudio fue mayor a 0,9 durante los periodos de mayor demanda vehicular, excepto entre las 6h30 y 7h30, donde el FHP se redujo a aproximadamente 0,73. Esto indica que, si bien el flujo vehicular alcanza valores máximos en las horas pico, no se generan concentraciones excesivas de vehículos.

4.2 Recomendaciones

- Implementar un contador de vehículos automático para la recolección de datos durante periodos prolongados. Esto no solo optimizaría el tiempo de monitoreo, sino que también proporcionaría datos más detallados y claros sobre las emisiones vehiculares, mejorando así el análisis de su impacto en la calidad del aire.
- Instalar una estación meteorológica para medir la dirección del viento. Esta medida mejorará la capacidad de los sensores para captar los contaminantes, y permitirá evaluar, con mayor precisión, cómo el viento influye en su dispersión.
- Tener en cuenta la altura de instalación del equipo, ya que puede influir en la medición de las emisiones. Además, es importante asegurar que el flujo de aire alrededor de la entrada del sistema de toma de muestras esté libre de obstrucciones por objetos cercanos.
- Verificar regularmente los valores promedio de CO₂, dado que el sensor requiere calibración. Este proceso se realiza automáticamente a través de Home Assistant, considerando el valor más bajo registrado en las últimas 48 horas. Es crucial garantizar que el sensor esté adecuadamente calibrado para obtener lecturas fiables.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] La Hora, «Medición de niveles de calidad de aire es constante». Accedido: 17 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.lahora.com.ec/noticias/medici-n-de-niveles-de-calidad-de-aire-es-constante/>
- [2] P. Rivera, «Diseño de la red de monitoreo pasivo de calidad de aire para la zona urbana del cantón Ambato», Pontificia Universidad Católica del Ecuador, Quito, 2019. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.puce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/79b1ff3d-e622-424f-8866-fb5c0bb13376/content>
- [3] L. Y. Silva, «“Revisión de las tecnologías de conservación de agua para consumo y riego y su potencial aplicación en la cuenca alta del río Pastaza”», Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.utc.edu.ec/bitstream/27000/8581/1/PC-002190.pdf>
- [4] «Plan de creación de oportunidades 2021-2025». 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/09/Plan-de-Creacio%CC%81n-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado.pdf>
- [5] Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial (PDYOT), «Actualización del plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Ibarra». 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.ibarra.gob.ec/site/docs/estrategico/PDYOT_2020.pdf
- [6] K. A. Narváez y A. M. Narváez, «Desarrollo de ruta de ensayo RDE en el cantón Ibarra», Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13662>
- [7] Censo Ecuador, «Población». [En línea]. Disponible en: <https://www.censoecuador.gob.ec/resultados-censo/>
- [8] D. A. Rodríguez, «Análisis de congestión vehicular generada por establecimientos educativos en el hipercentro de la ciudad de Ibarra», Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2021. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11101>
- [9] E. V. Cuasapaz y B. E. Cazares, «Análisis de la tasa de ocupación de las rutas de buses urbanos en la ciudad de Ibarra», Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8611>
- [10] Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), «Transporte». [En línea]. Disponible en: <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/transporte/>
- [11] Ministerio del Ambiente (MAE), «Inventario Preliminar de las Emisiones de Contaminantes del Aire, de los cantones Ambato, Riobamba, Santo Domingo de los Colorados, Latacunga, Ibarra, Manta, Portoviejo, Esmeraldas y Milagro». 2014. [En línea]. Disponible en: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/05/Libro-Resumen-Inventario-13-02-2014-prensa.pdf>
- [12] D. C. Loachamín, «“ Diagnóstico de la calidad del aire de la ciudad de Ibarra del periodo 2012- 2015 “», Universidad Central del Ecuador, Quito, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.dspace.uce.edu.ec/server/api/core/bitstreams/e7a2103d-6f45-4eea-8a96-025906300c42/content>
- [13] Environmental Protection Agency (EPA), «How to Use Air Sensors: Air Sensor Guidebook». 2022. [En línea]. Disponible en: <https://www.epa.gov/air-sensor-toolbox/how-use-air-sensors-air-sensor-guidebook>
- [14] European Environment Agency (EEA), «Explaining road transport emissions», p. 55, 2016, doi: 10.2800/71804.

- [15] United Nations Environment Programme, «Opening the Door to Cleaner Vehicles in Developing and Transition Countries: The Role of Lower Sulphur Fuels - Report of the Sulphur Working Group of the Partnership for Clean Fuels and Vehicles (PCFV)». 2012. [En línea]. Disponible en: <https://wedocs.unep.org/xmlui/handle/20.500.11822/21550>
- [16] World Health Organization (WHO), «WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide». 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>
- [17] M. V. Tapia y S. I. Urresta, «Evaluación de emisiones de vehículos por medio de medidores de calidad de aire de bajo costo», Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14061>
- [18] Ministerio del Ambiente, «Norma Ecuatoriana de Calidad del Aire (NECA), Libro VI Anexo 4». 2011. [En línea]. Disponible en: <https://leap.unep.org/en/countries/ec/national-legislation/acuerdo-n-97a-norma-de-calidad-del-aire-ambiente-o-nivel-de>
- [19] Volkswagen Service, «Emisiones de gases de escape de vehículos». 2014. [En línea]. Disponible en: https://issuu.com/santisarasa/docs/230_emisi_n_de_gases_de_escape
- [20] L. F. Yanqui, «Análisis del impacto del tráfico vehicular sobre las emisiones contaminantes», Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2021. Accedido: 20 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/16039>
- [21] G. López, A. M. Pérez, y F. J. Camacho, «Variables Fundamentales del Tráfico: Intensidad, Velocidad y Densidad», p. 10, 2019.
- [22] Z. Y. Vega, «Análisis de la capacidad y niveles de servicio de las vías de ingreso a la ciudad de Cajamarca perteneciente a la red vial nacional.», Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unc.edu.pe/handle/20.500.14074/1834>
- [23] Instituto Nacional de Ecología (INECC), Ed., «Manual 1 Principios de Medición de la Calidad del Aire». [En línea]. Disponible en: <https://sinaica.inecc.gob.mx/archivo/guias/1-%20Principios%20de%20Medici%C3%B3n%20de%20la%20Calidad%20del%20Aire.pdf>
- [24] F. E. Gutiérrez, «Desarrollo de un muestreador atmosférico de bajo costo y de carácter didáctico», Universidad Pontificia Bolivariana, Bucaramanga, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/5291>
- [25] G. García y K. G. Rico, «Sensores de bajo costo para el monitoreo de calidad del aire», *EPISTEMUS*, vol. 13, n.º 27, pp. 30-37, 2019, doi: 10.36790/epistemus.v13i27.108.
- [26] F. Concas *et al.*, «Low-Cost Outdoor Air Quality Monitoring and Sensor Calibration: A Survey and Critical Analysis», vol. 17, n.º 2, 2021, doi: 10.1145/3446005.
- [27] AirGradient, «Outdoor Air Quality Monitor». [En línea]. Disponible en: <https://www.airgradient.com/outdoor/>
- [28] Thermo Fisher Scientific, «FH62C14 Instruction Manual Continuous Ambient Particulate Monitor». 2007. [En línea]. Disponible en: <https://www.thermofisher.com/search/results?query=FH62C14&persona=DocSupport&refinementAction=true>
- [29] Dirección General de Salud Ambiental, «Protocolo de Monitoreo de la Calidad del Aire y Gestión de los datos». 2005. [En línea]. Disponible en: http://www.digesa.minsa.gob.pe/norma_consulta/protocolo_calidad_de_aire.pdf

ANEXOS

Anexo 1. Formato de aforo vehicular

INGENIERÍA AUTOMOTRIZ								
Fecha (D.M.A):				Ubicación:				
Observador:				Coordinador:				
Fecha Inicio:				Fecha Fin:				
Periodo de Tiempo	Automóviles	SUV	Camionetas	Taxis	Motocicletas	Autobuses	Otros	Total
Hora								
0:00 – 0:15								
0:15 – 0:30								
0:30 – 0:45								
0:45 – 1:00								

Anexo 2. Instalación de sensores AirGradient



Anexo 3. Instalación de cámara para el conteo vehicular



Anexo 4. Instalación de sensores AirGradient junto a la estación de referencia



Anexo 5. Intensidad horaria vehículos mixtos

Intensidad de Tráfico							
Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
0:00	14	24	29	16	38	158	76
1:00	13	16	16	7	23	80	63
2:00	5	7	10	10	14	69	45
3:00	10	8	10	10	13	63	40
4:00	18	19	15	21	29	46	32
5:00	54	58	60	51	59	54	39
6:00	491	476	405	403	382	233	158
7:00	571	632	563	602	592	391	238
8:00	626	617	535	583	590	599	425
9:00	629	642	640	657	658	723	483
10:00	698	649	641	810	711	711	572
11:00	651	709	683	760	752	731	673
12:00	696	714	733	761	756	752	739
13:00	665	680	618	723	698	731	619
14:00	620	604	592	700	651	660	470
15:00	742	723	720	745	846	647	478
16:00	744	723	708	711	802	650	482
17:00	767	727	738	719	859	508	473
18:00	796	751	804	748	901	438	461
19:00	619	582	575	553	784	395	399
20:00	292	269	245	187	464	262	388
21:00	158	198	139	161	379	218	279
22:00	91	88	74	109	258	163	218
23:00	33	42	40	57	189	117	182

Anexo 6. Intensidad horaria vehículos pesados

Intensidad de Tráfico							
Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
0:00	0	0	0	0	1	1	3
1:00	1	3	1	1	1	0	1
2:00	0	0	1	0	0	0	1
3:00	2	1	0	0	0	0	0
4:00	3	6	1	2	2	2	1
5:00	6	4	6	3	6	4	2
6:00	64	69	63	63	60	33	22
7:00	81	86	75	90	68	56	43
8:00	78	72	79	71	80	68	41
9:00	74	80	76	83	86	74	52
10:00	63	80	72	87	76	82	44
11:00	76	80	76	86	93	63	50
12:00	82	85	77	87	79	74	45
13:00	82	74	75	89	70	63	40
14:00	61	67	74	80	69	55	42
15:00	77	78	75	82	73	61	43
16:00	78	68	69	88	73	65	39
17:00	74	72	69	83	71	48	41
18:00	62	58	60	61	64	37	23
19:00	15	20	17	13	26	17	9
20:00	6	10	5	5	13	5	10
21:00	2	5	1	2	14	13	3
22:00	1	6	1	4	7	1	4
23:00	0	0	1	3	4	3	2

Anexo 7. Concentraciones horarias de PM_{2,5}

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
0:00	3,8	7,8	1,5	6,5	1,2	14,9	13,1
1:00	3,5	7,9	0,6	6	0,8	17	9,9
2:00	2,6	7,9	2	6,4	0,9	13,5	8,8
3:00	2,3	8,1	1,9	5,5	1,8	13,1	9,9
4:00	1,6	9,3	6,2	6,9	3,7	8,8	9,7
5:00	2	8,9	9,9	8	8,8	9,2	11,7
6:00	47,6	38,5	21,9	31,6	34,8	24,5	23
7:00	35	47,3	36,7	36,4	32,4	35,2	29,3
8:00	32,6	25,6	28,5	34,5	20,6	19,9	28,3
9:00	27	21,1	27,5	30,9	15,3	30,3	26
10:00	33,2	21,7	26,2	21,4	15,7	17,5	21,1
11:00	25	28,2	36,3	32,1	12,2	17,6	14,5
12:00	26,2	20,8	36	23,4	15,7	14,7	12,4
13:00	18,9	13,8	37,4	24,3	20,5	8	8,2
14:00	15	9,1	38,4	15,4	10	8,1	8,1
15:00	21,2	13,1	SD	18,4	20,2	13	7,5
16:00	22,2	19,7	SD	35,7	30,7	9	5,9
17:00	30,6	20,1	22,1	12,2	16,1	19,7	6,9
18:00	35,2	44,2	37,5	80,9	36,6	59,1	25,6
19:00	41,6	37,7	18,6	50,7	53,9	35,4	10,2
20:00	19,7	35,1	15,2	28,1	37,3	10,2	15,6
21:00	17,1	22,2	10,9	3,3	27,8	14,6	16,9
22:00	10,5	19,7	10,3	2,5	11,8	15,2	18,8
23:00	8	10,6	5,7	1,2	16,1	13,4	10,6
Promedio	20,10	20,77	19,60	21,76	18,54	18,41	14,67
Máximo	47,6	47,3	38,4	80,9	53,9	59,1	29,3
Mínimo	1,6	7,8	0,6	1,2	0,8	8	5,9

Anexo 8. Concentraciones horarias de PM₁₀

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
0:00	3,9	8	1,6	6,6	1,2	15,3	13,4
1:00	3,5	8,1	0,7	6	0,8	17,5	10,1
2:00	2,6	8,1	2	6,5	0,9	13,7	9,1
3:00	2,3	8,4	1,9	5,7	1,8	13,5	10,1
4:00	1,7	9,6	6,3	7	3,8	8,9	9,9
5:00	2,1	9,1	10,1	8,1	9	9,3	12
6:00	51	41,5	22,9	33,9	37	25,8	24,2
7:00	38,1	51	40	40,1	35,5	37,1	30,8
8:00	35,2	27,2	30,3	37	22	20,6	29,8
9:00	28,7	22,4	29,3	32,5	15,9	31,4	27,3
10:00	34,9	23	27,9	22,5	16,3	18	21,7
11:00	26,3	30,1	39,8	34,5	12,7	18,5	14,8
12:00	27,9	22,2	39	24,7	16,5	15,3	12,8
13:00	19,9	14,6	40,9	25,5	22	8,2	8,4
14:00	15,5	9,3	40,9	16	10,2	8,3	8,3
15:00	22,7	13,7	SD	19,1	21,5	13,6	7,6
16:00	23,5	20,4	SD	38,3	32,4	9,2	6
17:00	33,8	21	23,3	12,6	16,7	20,8	7,1
18:00	37,5	46,9	41,2	87	40,7	63,6	27,7
19:00	45,5	43,5	19,5	58,4	63,7	40,2	10,4
20:00	20,4	39,4	15,6	31,7	42,7	10,3	15,8
21:00	17,8	22,5	11	3,4	30	14,8	17,1
22:00	10,7	20,1	10,5	2,6	11,9	15,4	19,3
23:00	8,2	10,8	5,8	1,3	16,3	13,7	10,8
Promedio	21,40	22,12	20,93	23,38	20,06	19,29	15,19
Máximo	51	51	41,2	87	63,7	63,6	30,8
Mínimo	1,7	8	0,7	1,3	0,8	8,2	6

Anexo 9. Concentraciones horarias de CO₂

Hora	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
0:00	419	420	392	416	391	425	427
1:00	417	416	390	419	398	415	427
2:00	417	415	392	419	398	422	424
3:00	420	416	389	421	400	429	425
4:00	420	415	404	425	401	424	427
5:00	417	416	424	423	405	429	432
6:00	440	435	407	437	430	432	436
7:00	450	442	451	451	444	436	443
8:00	436	417	428	432	416	433	426
9:00	427	404	421	429	414	426	420
10:00	428	409	415	426	412	416	417
11:00	433	418	435	435	415	424	412
12:00	426	409	436	425	414	418	411
13:00	427	408	440	416	433	410	403
14:00	424	407	427	409	412	410	403
15:00	444	409	SD	400	414	408	398
16:00	428	407	SD	406	410	414	400
17:00	443	418	409	408	407	415	399
18:00	425	409	413	410	414	414	402
19:00	411	399	401	403	411	408	393
20:00	427	401	399	395	405	402	396
21:00	435	399	407	394	399	400	394
22:00	432	394	420	391	398	417	395
23:00	427	394	418	390	413	430	418
Promedio	428,04	411,54	414,45	415,83	410,58	419,04	413,67
Máximo	450	442	451	451	444	436	443
Mínimo	411	394	389	390	391	400	393

Anexo 10. Concentraciones diarias de PM_{2,5}: estación de referencia vs sensor AirGradient

Día	Estación de referencia PM_{2,5} (µg/m³)	Sensor AirGradient PM_{2,5} (µg/m³)
3/7/2024	16,3	18,7
4/7/2024	15,48	18,1
5/7/2024	15,57	18,6
6/7/2024	10,66	9,8
7/7/2024	6,57	3,2
8/7/2024	7,31	3,9
9/7/2024	10,71	8,5
10/7/2024	11,32	8,9
11/7/2024	14,38	12,6
12/7/2024	11,55	8,7
13/7/2024	6,21	3,4
14/7/2024	5,78	2
15/7/2024	6,55	2,7
16/7/2024	8,63	4,9

Oficio Nro. GADDMQ-SA-2024-1202-O

Quito, D.M., 10 de junio de 2024

Asunto: Ignacio Bayardo Benavides Cevallos/UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE/Solicitud de colaboración para validación de sensores de bajo costo con las estaciones de referencia de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito/

Ingeniero
Ignacio Bayardo Benavides Cevallos
Coordinador Carrera Ingeniería Automotriz
UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
En su Despacho

De mi consideración:

En atención al oficio UTN-FICA-AU-2024-0014-O, de 14 de mayo de 2024, en donde solicita la colaboración para la validación de sensores de bajo costo para monitoreo de la Calidad de Aire en la Ciudad de Ibarra, nos complace informarle que su solicitud ha sido recibida y será atendida positivamente. Hemos programado la reunión técnica para el viernes 28 de junio a las 10h00 en las oficinas de la Secretaría de Ambiente, con el fin de coordinar la instalación de los monitores de calidad del aire; en tal sentido para cualquier detalle adicional, por favor comunicarse con María Valeria Díaz Suárez, de la Unidad de Investigación, Análisis y Monitoreo, a través del correo electrónico maria.diaz@quito.gob.ec o al número 0999862012.

La Secretaría de Ambiente está comprometida a colaborar con todas las instituciones para fomentar el conocimiento sobre la calidad de los recursos e incentivar la investigación.

Con sentimiento de distinguida consideración.

Atentamente,

Documento firmado electrónicamente

Ing. Santiago Fernando Sandoval Gallardo
SECRETARIO DE AMBIENTE
SECRETARÍA DE AMBIENTE



Oficio Nro. GADDMQ-SA-2024-1202-O

Quito, D.M., 10 de junio de 2024

Referencias:

- GADDMQ-SA-CAF-2024-1916-E

Copia:

Señora Ingeniera
Vielka Cristina Altuna Alvarez
Funcionario Directivo 6 / Jefa de la Unidad de Control y Seguimiento Ambiental
SECRETARÍA DE AMBIENTE - DMRCA - UNIDAD DE CONTROL Y SEGUIMIENTO AMBIENTAL

Señora Ingeniera
Rosa Elizabeth Fonseca Vasconez
Directora Metropolitana de Regularización y Control Ambiental
SECRETARÍA DE AMBIENTE - DIRECCIÓN METROPOLITANA DE REGULARIZACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL

Señorita Tecnóloga
Catalina de los Angeles Rueda Godoy
Asistente Administrativa - Servidor Municipal 5
SECRETARÍA DE AMBIENTE - DIRECCIÓN METROPOLITANA DE REGULARIZACIÓN Y CONTROL AMBIENTAL

Señora Ingeniera
Maria Valeria Diaz Suarez
Servidor Municipal 13 / Especialista Ambiental
SECRETARÍA DE AMBIENTE - DMRCA - UNIDAD DE CONTROL Y SEGUIMIENTO AMBIENTAL

Acción	Siglas Responsable	Siglas Unidad	Fecha	Sumilla
Elaborado por: MARIA VALERIA DIAZ SUAREZ	mvds	SA-DMRCA-UCSA	2024-06-07	
Revisado por: Vielka Cristina Altuna Alvarez	va	SA-DMRCA-UCSA	2024-06-07	
Aprobado por: Santiago Fernando Sandoval Gallardo	ss	SA	2024-06-10	

