



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

IMPACTO DEL FLUJO VEHICULAR EN LA CALIDAD DEL AIRE POR NO₂ Y SO₂
EN LAS AVENIDAS MORALES DUÁREZ Y UNIVERSITARIA, CERCADO DE LIMA,

2023

Línea de investigación:

Sistemas de información y optimización

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

Autora:

Vivanco Sandoval, Valeria Andrea

Asesor:

Martínez Cabrera, Rubén

ORCID: 0000-0002-4561-8627

Jurado:

Ventura Barrera, Carmen Luz

Guillén León, Rogelia

Valdivia Orihuela, Braulio Armando

Lima - Perú

2024



IMPACTO DEL FLUJO VEHICULAR EN LA CALIDAD DEL AIRE POR NO₂ Y SO₂ EN LAS AVENIDAS MORALES DUÁREZ Y UNIVERSITARIA, CERCADO DE LIMA, 2023

INFORME DE ORIGINALIDAD

22%

INDICE DE SIMILITUD

21%

FUENTES DE INTERNET

8%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	7%
2	repositorio.upeu.edu.pe Fuente de Internet	2%
3	documentop.com Fuente de Internet	<1%
4	1library.co Fuente de Internet	<1%
5	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.upsc.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	Submitted to Universidad Nacional Federico Villarreal Trabajo del estudiante	<1%
8	repositorio.udl.edu.pe Fuente de Internet	<1%



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

IMPACTO DEL FLUJO VEHICULAR EN LA CALIDAD DEL AIRE POR NO₂ Y SO₂ EN
LAS AVENIDAS MORALES DUÁREZ Y UNIVERSITARIA, CERCADO DE LIMA,
2023

Línea de Investigación:
Sistemas de información y optimización

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autora:

Vivanco Sandoval, Valeria Andrea

Asesor:

Martínez Cabrera, Rubén

ORCID: 0000-0002-4561-8627

Jurado:

Ventura Barrera, Carmen Luz

Guillén León, Rogelia

Valdivia Orihuela, Braulio Armando

Lima – Perú

2024

Dedicatoria

A mis padres, Walter Vivanco y Elvira Sandoval que estuvieron junto a mí desde siempre, me inculcaron valores desde que era pequeña, para ser la mejor versión de mí misma y por su sacrificio y esfuerzo.

A mi hermano, Diego Vivanco, mi compañero de juegos desde que era pequeña.

A mi abuela, Isabel Garibay, que nos crió a mi hermano y yo desde que éramos unos bebés, y que ahora es un ángel desde donde esté.

A mis tíos, por sus continuas palabras de aliento y motivación durante mi carrera universitaria.

A mi abuela Antonia, mi abuelo Ángel y mi tía Rosa que me cuidan desde el cielo.

Agradecimientos

Agradezco a Dios por haberme otorgado resiliencia de iniciar y concluir este trabajo de investigación.

A mis padres, mi hermano, mis tíos y mi abuela por su apoyo incondicional, cariño y comprensión.

A mi profesor de universidad y asesor, el Dr. Rubén Martínez, que dedicó su tiempo en la revisión de mi tesis de investigación.

Al Ing. José Junco, que me guío y me dio su soporte.

A mis amigos, que estuvieron alentándome y dándome mensajes de apoyo durante la elaboración de mi tesis.

ÍNDICE

Resumen.....	13
Abstract.....	14
I. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Descripción y formulación del problema.....	16
1.1.1. <i>Descripción del problema</i>	16
1.1.2. <i>Formulación del problema</i>	18
1.2. Antecedentes	18
1.2.1. <i>Antecedentes internacionales</i>	18
1.2.2. <i>Antecedentes nacionales</i>	21
1.3. Objetivos	23
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	23
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	23
1.4. Justificación.....	24
1.4.1. <i>Justificación teórica</i>	24
1.4.2. <i>Justificación práctica</i>	24
1.4.3. <i>Justificación metodológica</i>	25
1.4.4. <i>Justificación social</i>	25
1.5. Hipótesis.....	25
II. MARCO TEÓRICO.....	26
2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación.....	26
2.1.1. <i>Flujo vehicular</i>	26

2.1.2.	<i>Causa de la congestión vehicular</i>	26
2.1.3.	<i>Clasificación según categorías vehiculares</i>	26
2.1.4.	<i>Clasificación según el tipo de motor</i>	27
2.1.5.	<i>Fuentes móviles contaminantes</i>	27
2.1.6.	<i>Combustible</i>	28
2.1.7.	<i>Función del combustible</i>	28
2.1.8.	<i>Tipos del combustible</i>	29
2.1.9.	<i>Combustión</i>	29
2.1.10.	<i>Emisiones contaminantes del parque vehicular</i>	29
2.1.11.	<i>Motor a gasolina</i>	29
2.1.12.	<i>Motor a diésel</i>	31
2.1.13.	<i>Avances regulatorios en el Perú</i>	32
2.1.14.	<i>Calidad del aire</i>	32
2.1.15.	<i>Contaminación atmosférica</i>	33
2.1.16.	<i>Tipos de contaminación del aire</i>	33
2.1.17.	<i>Causas de contaminación atmosférica</i>	34
2.1.18.	<i>Efectos de los contaminantes atmosféricos</i>	35
2.1.19.	<i>Dispersión de contaminantes atmosféricos</i>	36
2.1.20.	<i>Gases de combustión</i>	36
2.1.21.	<i>Gases contaminantes</i>	38
2.1.22.	<i>Marco legal de la calidad del aire</i>	42

2.1.23. Índice de la Calidad del Aire [INCA].....	46
2.1.24. Métodos de medición de la calidad del aire	51
2.1.25. Comparación de métodos de medición de la calidad del aire.....	55
III. MÉTODO	57
3.1. Tipo de investigación	57
3.1.1. Diseño de la investigación	57
3.2. Ámbito temporal y espacial.....	57
3.2.1. Espacial (Geográfica).....	57
3.2.2. Temporal.....	58
3.3. Variables.....	58
3.3.1. Variable independiente: Flujo vehicular	58
3.3.2. Variable dependiente: Calidad del aire.....	58
3.4. Población y muestra	60
3.4.1. Población	60
3.4.2. Muestra	60
3.5. Instrumentos	60
3.5.1. Monitoreo de calidad del aire.....	60
3.5.2. Monitoreo vehicular.....	61
3.5.3. Información geográfica	62
3.5.4. Materiales de oficina	62
3.6. Procedimientos	63

3.6.1. <i>Objetivo 1: Cuantificar el flujo vehicular en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.</i>	63
3.6.2. <i>Objetivo 2: Determinar la concentración de NO₂ y SO₂ por método de difusión pasiva en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.</i> 67	
3.6.3. <i>Objetivo 3: Determinar la relación entre el flujo vehicular y las concentraciones de NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.</i>	73
3.6.4. <i>Objetivo 4: Proponer estrategias para reducir el flujo vehicular y mejorar la calidad del aire por NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.</i>	73
3.7. Análisis de datos.....	74
3.8. Consideraciones éticas	74
IV. RESULTADOS	75
4.1. Cuantificación del flujo vehicular en las avenidas Universitaria (tramos cuadra 27 – 30) y Av. Morales Duárez (tramos cuadra 1 – 2).....	75
4.1.1. <i>Flujo vehicular en la avenida Universitaria</i>	75
4.1.2. <i>Flujo vehicular en la avenida Morales Duárez</i>	77
4.1.3. <i>Comparación de flujo vehicular en la avenida Universitaria y Morales Duárez</i> .	79
4.2. Determinación de la concentración de NO ₂ y SO ₂ en las avenidas Universitaria y Morales Duárez	80
4.2.1. <i>Concentración de NO₂ y SO₂ en las avenidas Universitaria y Morales Duárez</i> ...	80
4.2.2. <i>Análisis de velocidad y dirección del viento</i>	84

4.2.3. Modelación de dispersión de contaminantes de NO ₂ en las avenidas Universitaria y Morales Duárez.....	88
4.3. Relación entre el flujo vehicular y la concentración de NO ₂ y SO ₂ en las avenidas Universitaria y Morales Duárez.....	88
4.3.1. Preparación de la muestra para análisis de significancia y relación.....	88
4.3.2. Análisis Estadístico Descriptivo Comparativo.....	88
4.3.3. Análisis Estadístico Inferencial.....	90
4.3.4. Prueba Hipótesis Mann – Whitney.....	93
4.3.5. Contrastación de Hipótesis de Investigación.....	99
4.4. Propuesta de estrategias orientadas a la reducción del flujo vehicular y mejoramiento de la calidad del aire en las avenidas Universitaria y Av. Morales Duárez.....	99
4.4.1. Plan Integrado de Movilidad Sostenible del distrito de Cercado de Lima.....	99
4.4.2. Programa Por un Aire Más Limpio.....	106
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	108
VI. CONCLUSIONES.....	112
VII. RECOMENDACIONES.....	114
VIII. REFERENCIAS.....	115
IX. ANEXOS.....	124

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Comparación entre partículas finas y gruesas.....	41
Tabla 2 Estándares de Calidad Ambiental para Aire	44
Tabla 3 Valores del Índice de Calidad del Aire	47
Tabla 4 Cálculo del ICA para Material particulado (PM10) promedio 24 horas	48
Tabla 5 Cálculo del ICA para Dióxido de azufre (SO ₂) promedio 24 horas	49
Tabla 6 Cálculo del ICA para Monóxido de carbono (CO) promedio 8 horas.....	49
Tabla 7 Cálculo del ICA para Sulfuro de Hidrógeno (H ₂ S) promedio 24 horas	50
Tabla 8 Cálculo del ICA para Material particulado (PM2.5) promedio 24 horas	50
Tabla 9 Cálculo del ICA para Ozono (O ₃) promedio 8 horas.....	51
Tabla 10 Cálculo del ICA para Dióxido de Nitrógeno (NO ₂) promedio 1 hora.....	51
Tabla 11 Ventajas y desventajas de los métodos de medición de calidad del aire	55
Tabla 12 Matriz de operacionalización.....	59
Tabla 13 Agrupación de datos para análisis de relaciones estadísticas entre las variables estadísticas en la investigación	88
Tabla 14 Análisis estadístico descriptivo de las variables Concentración de NO ₂ del mes de mayo versus Flujo Vehicular del mes de mayo	94
Tabla 15 Análisis de la estimación de las diferencias entre las variables concentración de NO ₂ del mes de mayo versus flujo vehicular del mes de mayo.....	95
Tabla 16 Prueba de hipótesis Mann – Whitney del mes de mayo	95
Tabla 17 Resultado de aplicación de la prueba hipótesis Mann - Whitney	96
Tabla 18 Análisis estadístico descriptivo de las variables Concentración de NO ₂ del mes de junio versus Flujo Vehicular del mes de junio.....	97
Tabla 19 Análisis de estimación de las diferencias entre las variables Concentración de NO ₂ versus flujo vehicular del mes de junio.....	97

Tabla 20 Prueba de hipótesis Mann - Whitney del mes de junio.....	98
Tabla 21 Resultados de aplicación de la prueba hipótesis Mann-Whitney.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Porcentaje aproximado de los gases de escape de un motor a gasolina	30
Figura 2 Porcentaje aproximado de los gases de escape de un motor diésel.....	31
Figura 3 Contaminación del aire.....	38
Figura 4 Equipo Hi-Vol - P555.....	52
Figura 5 Monitor de partículas automático para medición de PM10 y PM2.5.....	53
Figura 6 Sentidos de las vías en Av. Morales Duárez y Av. Universitaria	64
Figura 7 Puntos de conteo vehicular.....	65
Figura 8 Toma de coordenadas UTM de los puntos de muestreo	68
Figura 9 Filtro combi instalado en el porta filtro.....	69
Figura 10 Instalación de los porta tubos en los postes de alumbrado público.....	69
Figura 11 Porcentaje según tipo de vehículos en la avenida Universitaria (15 al 21 de mayo del 2023)	76
Figura 12 Porcentaje según tipo de vehículos en la avenida Universitaria (19 al 25 de junio del 2023)	77
Figura 13 Porcentaje según tipo de vehículos en la avenida Morales Duárez (15 al 21 de mayo del 2023)	78
Figura 14 Porcentaje según tipo de vehículos en la avenida Morales Duárez (19 al 25 de junio del 2023)	79
Figura 15 Comparación del flujo vehicular en la avenida Universitaria y Morales Duárez .	80
Figura 16 Concentración de NO ₂ en los puntos de muestreo	81
Figura 17 Concentración de SO ₂ en los puntos de muestreo.....	82
Figura 18 Comparación de la concentración de NO ₂ en los puntos de muestreo con el ECA, OMS y Suiza.....	83

Figura 19 <i>Comparación de la concentración de SO₂ en los puntos de muestreo con el ECA, OMS y Suiza</i>	84
Figura 20 Rosa de Vientos generado de la estación meteorológica San Martín de Porres de mayo a junio del 2023.....	85
Figura 21 Distribución de frecuencias de la clase de viento en la estación meteorológica San Martín de Porres.....	86
Figura 22 Rosa de Vientos de la estación meteorológica de la estación San Martín de Porres superpuesta en Google Earth	87
Figura 23 Prueba de Normalidad 1	90
Figura 24 Prueba de Normalidad 2	91
Figura 25 Prueba de Normalidad 3	92
Figura 26 Prueba de Normalidad 4	93
Figura 27 Avenidas Morales Duárez (tramos cuadra 27-30) y Universitaria (tramos cuadra 1-2).....	126
Figura 28 Punto de conteo vehicular (UV - 01).....	132
Figura 29 Punto de conteo vehicular (UV - 02).....	132
Figura 30 Punto de conteo vehicular (MD - 01).....	133
Figura 31 Punto de conteo vehicular (MD - 02).....	133
Figura 32 Punto de muestreo de calidad del aire: UV – 01	137
Figura 33 Punto de muestreo de Calidad del aire: UV – 02	137
Figura 34 Punto de muestreo de calidad del aire: UV - 03.....	138
Figura 35 Punto de muestreo de calidad del aire: MD - 01	138
Figura 36 Punto de muestreo de calidad del aire: MD - 02	139
Figura 37 Punto de muestreo de calidad del aire: MD - 03	139

Resumen

Esta tesis ha tenido como propósito evaluar el impacto del flujo vehicular en la calidad del aire por NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez (cuadras 27-30) y Universitaria (cuadras 1-2). Este estudio se realizó mediante el método de conteo vehicular en las avenidas mencionadas en la tercera semana de los meses de mayo y junio y se utilizó dispositivos de muestreo pasivo para conocer las concentraciones de NO₂ y SO₂. Como resultado, se obtuvo que el mayor flujo vehicular por hora fue de 2388 vehículos, en el mes de junio en la avenida Universitaria y el flujo vehicular más bajo registrado por hora fue de 1676 vehículos, en el mes de mayo en la avenida Morales Duárez. La mayor concentración de NO₂ fue de un valor promedio de 77.8 µg/m³ en el mes de mayo en la avenida Universitaria y el menor, de 42.7 µg/m³ para el mes de junio en la avenida Morales Duárez; y la mayor concentración de SO₂ fue de 1.6 µg/m³, en una estación de muestreo en el mes de mayo, mientras que los demás valores obtenidos estuvieron por debajo del límite de detección. Asimismo, mediante una prueba de hipótesis de Mann-Whitney, se afirmó que, si existe mayor flujo vehicular, el impacto de la calidad del aire será considerable respecto a las concentraciones de NO₂ y SO₂. Concluyéndose que, el impacto del flujo vehicular en la calidad del aire por NO₂ y SO₂ es muy alto en las avenidas Universitaria y Morales Duárez.

Palabra clave: calidad del aire, flujo vehicular, NO₂, SO₂.

Abstract

The purpose of this thesis was to evaluate the impact of vehicular flow on air quality due to NO₂ and SO₂ on Morales Duárez avenues (blocks 27-30) and Universitaria avenues (blocks 1-2). This study was carried out using the vehicle counting method in the aforementioned avenues in the third week of the months of May and June and passive sampling devices were used to determine the concentrations of NO₂ and SO₂. As a result, it was obtained that the highest vehicle flow per hour was 2,388 vehicles, in the month of June on Universitaria Avenue and the lowest vehicle flow recorded per hour was 1,676 vehicles, in the month of May on Morales Duárez Avenue. The highest concentration of NO₂ was an average value of 77.8 µg/m³ in the month of May on Avenida Universitaria and the lowest, 42.7 µg/m³ for the month of June on Avenida Morales Duárez; and the highest concentration of SO₂ was 1.6 µg/m³, at a sampling station in the month of May, while the other values obtained were below the detection limit. Likewise, through a Mann-Whitney hypothesis test, it was stated that, if there is greater vehicular flow, the impact on air quality will be considerable with respect to NO₂ and SO₂ concentrations. Concluding that the impact of vehicular flow on air quality due to NO₂ and SO₂ is very high on Universitaria and Morales Duárez avenues.

Key Word: air quality, vehicle flow, NO₂, SO₂.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de investigación se propone evaluar el impacto del flujo vehicular y cómo afecta en la calidad de aire por NO₂ y SO₂, tomando como muestra el flujo vehicular en los tramos de la avenida Morales Duárez (cuadras 27-30) y Universitaria (cuadra 1-2). Esta tesis de investigación se realizó mediante el método de conteo observacional del comportamiento vehicular y el método de monitoreo pasivo para evaluar la afectación de los contaminantes NO₂ y SO₂ en las avenidas mencionadas, con la finalidad de proponer estrategias para mejorar la calidad del aire.

En el Capítulo I, se expone la descripción del problema, que nos permitirá realizar el planteamiento del problema de investigación, los antecedentes nacionales e internacionales que servirán como apoyo al desarrollo de la tesis, los objetivos, justificación e hipótesis planteada.

En el Capítulo II, se desarrolla el marco teórico, donde se detalla la información que sostiene el estudio de investigación, y se definen los términos de flujo vehicular y calidad del aire.

En el Capítulo III, se desarrolla la metodología de investigación que es de tipo descriptiva, diseño no experimental y alcance longitudinal, cuyo ámbito espacial comprende las avenidas Morales Duárez y Universitaria en el período de observación durante los meses de mayo y junio de 2023.

En el Capítulo IV, se exponen los hallazgos obtenidos en consonancia con los objetivos establecidos y se introducen las propuestas de estrategia para mejorar la calidad del aire a partir de la reducción del flujo vehicular.

En el Capítulo V, se efectúa un análisis comparativo de los hallazgos de la investigación, contrastándolos con los obtenidos en otras investigaciones.

En el Capítulo VI y Capítulo VII, se presenta las conclusiones y recomendaciones de la tesis de investigación.

En el Capítulo VIII y Capítulo IX, corresponden a las fuentes consultadas y se presenta información complementaria en forma de anexos.

1.1. Descripción y formulación del problema

1.1.1. Descripción del problema

La afectación de la calidad del aire en el mundo es un problema que repercute en el ámbito ambiental y en el ámbito de la salud, y que es originado por causas naturales y antropogénicas. Debido al aumento de la extensión urbana, por el continuo crecimiento de la población mundial, se produce la necesidad de las personas de moverse de un lugar a otro, causando la demanda de compra de vehículos automotores en el mundo. Este problema se manifiesta en el incremento de la liberación de agentes contaminantes en el aire, causando un riesgo para las personas y el medio ambiente.

Según la actualización de la base de datos sobre el monitoreo de calidad del aire en el 2022, la Organización Mundial de la Salud informó que un porcentaje extremadamente alto de la población mundial inhala aire que no cumple con los límites considerados seguros por la propia organización (Noticias ONU, 2022).

En nuestro país, desde hace aproximadamente dos décadas, se ha incrementado la flota vehicular, que, ha generado, sobre todo en las zonas urbanas, un mayor flujo vehicular con efectos contaminantes en la atmósfera; de ahí que, resulta necesario conocer la calidad de aire que respiramos para determinar las acciones necesarias que controlen y reduzcan la contaminación ambiental que afecta a la población en general (Serio et al., 2020).

En el Perú, a pesar de ciertos inconvenientes en la comercialización de los vehículos por causa de la pandemia del COVID-19, la Asociación Automotriz del Perú informó de ciertas variaciones del parque automotor a enero del 2022, en comparación a enero 2021; la adquisición de vehículos livianos (automóvil, camionetas, SUV, pick up y furgonetas) se incrementó, en promedio, en el orden del 13,4% (14,245 unidades), los vehículos pesados, en

cuanto a camiones y tractocamiones, se expandieron en un 6,1% (1,235 unidades) y respecto a la venta de minibús y ómnibus se redujo en 19,8% (178 unidades); por último, los vehículos menores; la comercialización de las motos aumentó en 1,5% (21,778 unidades) a causa de la mayor demanda del servicio de entrega a domicilio (Asociación Automotriz del Perú, 2022).

En ese orden, en el año 2021, los niveles altos de porcentaje del flujo vehicular mostraron una relación por el incremento de las emisiones que contaminan el aire; y mientras menor sea el porcentaje de vehículos se observó una reducción de las emisiones (Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología, 2021).

En el ámbito regional, de acuerdo al Informe Anual de Políticas Energéticas de la Universidad de Chicago, se posicionó a Lima Metropolitana como la ciudad con peor calidad del aire a nivel de Latinoamérica, informándose que la expectativa de vida de un habitante limeño fue disminuida en 4.7 años. A su vez, el estudio sostuvo que las emisiones vehiculares y la congestión vehicular son principalmente responsables de la pobre calidad del aire, el cual no solo está afectando las áreas urbanas, sino a las regiones rurales (Lee & Greenstone, 2021).

En los últimos años, se han realizado estudios de evaluación de calidad del aire en distritos de la región de Lima Metropolitana, que concluyeron que algunos contaminantes sobrepasaron los valores recomendados por la OMS en las zonas de Lima Este y Lima Norte (Valverde, 2016).

En el Día Interamericano de la Calidad del Aire, se hizo énfasis en la alarmante situación del parque automotor en el Cercado de Lima, cuyas emisiones sobrepasan en un 300% los estándares internacionales, y se produce por la mala calidad de los combustibles y la antigüedad del parque automotor (Mendoza, 2019).

Actualmente, la Municipalidad Metropolitana de Lima realiza un monitoreo de calidad del aire a tiempo real, teniendo estaciones de monitoreo en el distrito de Cercado de Lima,

donde se advierte que el Índice de Calidad del Aire (INCA), tiene un rango de Moderada a Mala (qAIRa, s.f.).

De lo expresado en los párrafos anteriores, la investigadora consideró realizar el presente estudio formulando la siguiente problemática.

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

¿Cuál es el impacto del flujo vehicular en la calidad de aire por NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023?

1.1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo es el flujo vehicular en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023?
- ¿Cuál es la concentración de NO₂ y SO₂ en la calidad del aire en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023?
- ¿Cuál es la relación entre el flujo vehicular y las concentraciones por NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023?
- ¿Qué propuestas se pueden realizar para reducir el flujo vehicular y mejorar la calidad del aire por NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023?

1.2. Antecedentes

1.2.1. Antecedentes internacionales

Se presentó como respaldo la incorporación de estudios similares de orden nacional e internacional. En tal sentido, se consideró como antecedentes a los siguientes investigadores internacionales:

Cocha (2017) presentó su tesis de investigación para obtener el grado académico de magíster. Su principal objetivo era determinar la relación entre las emisiones de gases contaminantes y la calidad del aire de la zona urbana de la ciudad de Riobamba. La metodología utilizada por la investigadora fue el método de muestreo pasivo para determinar los niveles de gases contaminantes en tres estaciones de monitoreo durante el período 2008-2016. Asimismo, se realizó conteo vehicular en dos avenidas y una calle céntrica de la ciudad con alto tráfico vehicular, situadas próximas a las estaciones de monitoreo pasivo. Los resultados del estudio indicaron que las concentraciones promedio de dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2) se mantuvieron por debajo del límite establecido en la Norma Ecuatoria de Calidad del Aire. En base a este hallazgo, los autores concluyeron que, según sus datos, la presencia de estos dos contaminantes no ejerce una influencia significativa en la condición del aire que circula en el ámbito urbano de Riobamba.

Ortiz y Serrano (2020) presentaron una tesis a la Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador. La investigación se centró en determinar la relación entre la disminución del tráfico vehicular durante la pandemia de COVID-19 y la calidad del aire en la zona de estudio. Como metodología de recopilación de datos se tuvieron en cuenta las muestras tomadas en los veinte puntos de vigilancia del Municipio de la ciudad de Cuenca y publicadas por la empresa de movilidad pública de Cuenca (EMOV EP). Para la lectura, análisis e interpretación de las muestras utilizaron diversas técnicas como el machine learning. Los investigadores observaron como resultado que las restricciones vehiculares por la pandemia tuvieron como efecto una reducción de los gases contaminantes; llegando a la conclusión una relación directa y proporcional, de modo que, a menor flujo vehicular, menor contaminación y menores contagios y a mayor flujo vehicular, mayor incremento de gases contaminantes e incremento de contagiados.

Puertas (2019) presentó una tesis para la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, en la que propuso como objetivo conocer el estado de contaminación del aire en zonas de alto tráfico vehicular del Centro Histórico de Quito y el Valle de los Chillos. Como método se estableció 10 puntos de medición instalando el muestreado AQM60 durante 8 días. Para los resultados tuvieron en cuenta las series de tiempo, correlaciones cruzadas y análisis de componentes principales. Concluyó que los gases se encuentran por debajo de los límites permisibles de la regulación nacional salvo el SO₂; ahora bien, ese mismo contaminante supera los máximos permitidos por la OMS en dos puntos de evaluación.

Heydarizadeh y Kahforoushan (2019) exhibieron un estudio científico para Environmental Science and Pollution Research que, contuvo como objetivo establecer el alcance del nivel de emisiones de CO, SO₂ y NO₂ producidos por los vehículos de motor en dos tuneles de alta frecuencia vehicular en Teherán, Irán. De metodología cuantitativa, encontraron como resultado comparativo que en uno de los túneles se encontró un 11 % más altos de CO, un 22 % más bajos de SO₂ y un 40 % más altos de NO₂. En tal sentido, concluyeron que, establecidos los niveles contaminantes de emisión de SO₂, estos están asociados con el alto flujo vehicular de vehículos gasolineros.

Kumar et al. (2016) desarrollaron una revista científica para la Transportation Research Part D: Transport and Environment; la investigación se centró en la caracterización y evaluación de las emisiones de CO, NO₂ y SO₂ generadas por la flota vehicular en Delhi, India. Para tal efecto, emplearon el método predictivo de GFLSM. Los resultados hallaron que los valores de emisión, pronosticados en el estudio, se posicionaron en las bandas de error del 5%, 6% y 7%. Los estudiosos concluyeron que la herramienta y el método empleado muestran la capacidad de predecir objetivamente las emisiones de gases contaminantes.

1.2.2. Antecedentes nacionales

Esteban (2021), presentó una tesis, donde tuvo como objetivo, determinar la influencia del flujo vehicular en la calidad del aire en dos avenidas del distrito de San Juan de Lurigancho: Próceres de la Independencia y Las Flores. Utilizó la metodología tipo aplicada, no experimental, correlacional, transversal. Encontró como resultado del flujo vehicular una alta asociación entre las variables, en los meses de noviembre y diciembre del 2019. En la avenida Las Flores se observa un aumento significativo en la velocidad de recorrido, este incremento se presenta principalmente en el mes de diciembre 2019, coincidiendo con el período de mayor carga vehicular. Por otra parte, la intensidad horaria se incrementó a 2123 vehículos/hora en el mes de diciembre. Concluyó que existe una correlación moderada entre la variable flujo vehicular y la calidad del aire del 61,4% en el mes de noviembre 2019 y de 82,6% en el mes de diciembre 2019. Asimismo, se observó una correlación moderada entre ambas variables, de 61,4% en el mes de noviembre 2019 y de 82,6% en el mes de diciembre 2019.

Limas (2016), en su tesis de investigación presentada a la Universidad Nacional Federico Villarreal, se propuso investigar la influencia del flujo vehicular en la calidad del aire con respecto a los gases SO_2 y NO_2 en plazas históricas del Cercado de Lima. Aplicó un tipo de metodología empírica, con nivel descriptivo y diseño no experimental. Los hallazgos confirmaron que la afluencia de vehículos es un factor importante en la concentración del gas contaminante NO_2 en las plazas históricas, ya que se encontró que, a mayor tráfico, mayor presencia de NO_2 . Con respecto al SO_2 , se observó una relación inversa entre ambas variables en la Plaza Bolognesi, a diferencia de las otras plazas históricas. La investigación concluyó que el flujo vehicular tiene un impacto directo en el gas contaminante NO_2 en las plazas históricas. En el caso del SO_2 , no se pudo determinar una asociación significativa con la afluencia vehicular.

Flores (2023), en su tesis de investigación presentada a la Universidad Nacional Federico Villarreal tuvo como propósito analizar cómo la afluencia vehicular afecta la calidad del aire (NO_2 y SO_2) en el Cercado de Lima mediante un conteo observacional de vehículos, encuestas a conductores para recopilar datos sobre el estado de sus vehículos y la medición de los gases contaminantes por difusión pasiva. De acuerdo a sus resultados, contrario a lo esperado, el estudio no encontró una asociación entre el flujo vehicular y los niveles de gases contaminantes. No obstante, se observó una correlación positiva entre las concentraciones de estos gases con el uso de combustible Diesel y flota vehicular con más de 15 años de antigüedad.

Rivera (2020) presentó una tesis; que tuvo como propósito analizar la relación entre el parque automotor y la calidad del aire en Lima Metropolitana. Metodología cuantitativa, correlacional, no experimental. El estudio encontró una relación entre el tipo de combustible utilizado y las emisiones de los contaminantes del aire. En particular, se observó que el consumo de combustible diésel se relaciona con los contaminantes NO_2 , PM_{10} , y $\text{PM}_{2.5}$; el consumo de combustible Gasolina/Gasohol se asocia con los gases CO , NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$ y PM_{10} ; el consumo de combustible GLP automotriz se asocia con los contaminantes $\text{PM}_{2.5}$, y el combustible Gasolina/Gasohol se asocia con los contaminantes SO_2 . Asimismo, pudo observar que la reducción del consumo de combustibles por efecto de la pandemia del COVID-19 mejoró la calidad de aire. El investigador concluyó que existe una relación del parque automotor y la calidad del aire durante el aislamiento social en Lima Metropolitana producida por el COVID-19.

García (2019) presentó una tesis a la Universidad Peruana Unión; cuyo objetivo fue evaluar el nivel de gases contaminantes emitidos por la afluencia de vehículos a través del monitoreo de gases de combustión en el distrito de Morales. Empleó como metodología el enfoque cuantitativo, diseño no experimental, correlacional transversal. Como resultado

observó que, de los 4 puntos de observación, dos presentaron un alto flujo vehicular; sobre todo en las horas punta entre las 6 a.m. a 7 a.m. y 11 p.m. a 12 a.m.; de modo que guardan una relación con la emisión de contaminantes, es decir, en los puntos 1 y 4 las emisiones sobrepasaban el indicador ECA. En tal sentido, se determinó la presencia de dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre y monóxido de carbono; respecto al dióxido de nitrógeno debido a la combustión de los motores de los vehículos. Concluyendo que existe una asociación directa entre la afluencia de vehículos y del nivel de CO; por otra parte, no se evidenció una relación entre la afluencia de vehículos y los niveles de SO₂ y NO₂.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Evaluar el impacto del flujo vehicular en la calidad de aire por NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.

1.3.2. Objetivos específicos

- Cuantificar el flujo vehicular en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.
- Determinar la concentración de NO₂ y SO₂ por método de difusión pasiva en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.
- Determinar la relación entre el flujo vehicular y las concentraciones de NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.
- Proponer estrategias para reducir el flujo vehicular y mejorar la calidad del aire por NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.

1.4. Justificación

Las cifras de la OMS nos advierten sobre el peligro que representa la contaminación del aire para la salud global. La organización estima que siete millones de personas mueren anualmente por enfermedades relacionadas con la exposición a las partículas contaminantes del aire (Organización Mundial de la Salud, 2018).

En consideración a la realidad actual, los monitoreos ambientales en Lima Metropolitana no son permanentes. Dado que el sector transporte es la principal fuente de afectación al aire, este estudio se propuso analizar el impacto del flujo vehicular en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima y su asociación con los niveles de NO₂ y SO₂; y por consiguiente, proponer estrategias para reducir la problemática que afecta a las personas y el entorno ambiental.

1.4.1. Justificación teórica

Con la finalidad de explicar las razones que motivan la ejecución del proyecto de investigación, la justificación teórica de este estudio es que al evaluar el efecto del tránsito de vehículos y la presencia de SO₂ y NO₂ en el aire en las avenidas Morales Duárez y Universitaria, se añadirá un precedente al realizarse en el distrito de Cercado de Lima y al complementarse con otros estudios de monitoreo de calidad del aire realizados en Lima Metropolitana por organismos nacionales e internacionales, que buscan reafirmar el efecto entre ambas variables.

1.4.2. Justificación práctica

La justificación práctica del estudio, es que, con los hallazgos obtenidos de la investigación, se ampliará el conocimiento sobre el estado de la calidad del aire y el impacto de las emisiones vehiculares en las avenidas Morales Duárez y Universitaria a las entidades ambientales, investigadores y al público en general. Asimismo, se brindará un aporte para que las autoridades pertinentes realicen la toma de decisiones correspondientes para establecer

estrategias de mejora que busquen contrarrestar la contaminación atmosférica por emisiones vehiculares.

1.4.3. Justificación metodológica

En cuanto a la justificación metodológica, la investigadora planificó y desarrolló la investigación basada en el enfoque cuantitativo, y en el uso de normas y regulaciones vigentes para la medición del tránsito vehicular y los niveles de dióxido de azufre y dióxido de nitrógeno en el aire, de modo que, permite el cumplimiento de los objetivos trazados y la comprobación de la hipótesis formulada.

1.4.4. Justificación social

La justificación social, es que la aplicación de las propuestas señaladas en el estudio permite la mejora las condiciones ambientales en la calidad del aire, que beneficiará a la población residente o circulante del distrito.

1.5. Hipótesis

H₀: El impacto del flujo vehicular en la calidad de aire por NO₂ y SO₂ no es muy alto en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.

H₁: El impacto del flujo vehicular en la calidad de aire por NO₂ y SO₂ es muy alto en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1. *Flujo vehicular*

Es crucial destacar, que según Gasteiz, el tránsito vehicular se configura como la mayor fuente de emisiones en las ciudades; en tal sentido, esta fuente conlleva una exclusividad e importancia específica; cabe observar, que en el fondo de la metrópoli se encuentran integrados los componentes de contaminación de otros orígenes. Ahora bien, los componentes de los que dependen estas emisiones son: (1) componentes propios de las unidades vehiculares en la que se destaca su tipología, antigüedad, peso, el combustible utilizado y la velocidad imprimida; (2) componentes externos al vehículo en la que se considera las características del pavimento por donde realiza el trayecto, el tramo recorrido y; asimismo, la temperatura ambiente y; (3) componentes individuales, esto incluye el estilo de conducción o la distancia total recorrida (Rázuri, 2018).

2.1.2. *Causa de la congestión vehicular*

El exceso vehicular es generado por varios factores; no obstante, las razones que la ocasionan tiene que ver con el corto y extenso plazo: (a) Corto plazo, se deben al aumento de la población que trae consigo también el incremento de los hogares y centro de trabajo; a la reducción de los costos de adquisición; a las facilidades crediticias; y al pobre nivel de infraestructura vial que no guardan relación con la densidad poblacional y; (b) Extenso plazo, debido a la concentración de viajes de trabajo; a las preferencias de transporte en vehículos privados (García, 2019).

2.1.3. *Clasificación según categorías vehiculares*

Los vehículos se clasifican en: (a) Categoría I (automóviles, mototaxis y motos lineales); (b) Categoría II (camioneta rural y camioneta panel, camioneta pick up, Camión 2-5

Ton) y; (c) Categoría III (Couster, Camión > 5 Ton y Ómnibus) (Ministerio de Transporte y Comunicaciones, 2018).

2.1.4. Clasificación según el tipo de motor

Las clases de tipo de motor de los vehículos se clasifican en:

- Con motor ciclo diésel: usan como combustible el gas oil; siendo su principal gas contaminante el de particulado carbonoso, que presenta el clásico humo negro. Distintos contaminantes son los hidrocarburos sin quemar y el óxido de nitrógeno. Cabe resaltar la poca manifestación de monóxido de carbono (Fernández y Malca, 2019).
- De carburación ciclo otto: el vehículo usa nafta, que pueden ser común, super u otras; o, por el contrario, gas natural. Dado que la combustión no se da completamente el resultado es la producción y emisión de gran cantidad de monóxido de carbono, las que se manifiestan especialmente cuando la unidad está encendida y en espera por las altas concentraciones de flujo vehicular (Fernández y Malca, 2019).
- De inyección ciclo otto: el vehículo cuenta con una computadora que regula la alimentación del combustible al motor utilizando el sistema de inyección, de modo que, proporciona la cuota necesaria de carburante y aire. Este sistema favorece la mitigación de gases contaminantes (Fernández y Malca, 2019).

2.1.5. Fuentes móviles contaminantes

La característica principal es la emisión de gases contaminantes durante el desplazamiento del auto. Estas unidades móviles pueden ser carros, camiones, barcos, aviones, entre otros. Los motores de estas unidades móviles al hacer combustión emiten diferentes gases contaminantes los cuales son nocivos y atentan contra la salud pública. Los gases contaminantes se pueden clasificar en diferentes tipos según cómo se liberan al medio ambiente: (a) Emisiones húmedas calientes; las cuales se inician por la volatilización del combustible (efecto del calor remanente) cuando está apagado el motor; (b) Emisiones en

circulación; que se dan con el motor encendido las cuales generan la emisión de gases contaminantes en estado líquido o gaseoso; (c) Emisiones diurnas; generadas por el incremento de la presión del vapor y de la temperatura de combustible en el tanque de combustible, por efecto del entorno ambiental; (d) Emisiones en la recarga del combustible; se manifiestan con la unidad móvil en reposo, producto del desplazamiento de los gases del depósito durante la recarga; (e) Emisiones en reposo; que se dan por circunstancias de fuga o por la capacidad que tienen los conductos del vehículo de que fluya el combustible por éste (Limas, 2016).

2.1.6. Combustible

Mediante la destilación fraccionada del petróleo tienen la posibilidad de obtener diversos tipos de combustibles de propiedades bastante disímiles, esto se debería a que los elementos expuestos al destilado tienen puntos de ebullición a diferentes temperaturas. La gasolina es el primordial derivado del petróleo, producido entre los 40 y los 200°C y es un combustible compuesto por una mezcla de hidrocarburos que son destinados a la propulsión de motores de combustión interna. Su calidad depende de las cualidades antidetonantes. La gasolina una vez que se mezcla con el viento tiene la característica de comprimirse poderosamente y posee la capacidad de encenderse de manera explosiva. El añadido de reducidas porciones de ciertos agregados a la gasolina posibilita minimizar de forma notable la tendencia a la detonación del combustible y, por consiguiente, la implementación de cilindros con mayor capacidad de compresión, lo cual significa que haya una mayor potencia para el coche (Encyclopaedia Britannica, 2011).

2.1.7. Función del combustible

El combustible produce energía química siendo transformada a energía mecánica en las cámaras de combustión del motor. Por ejemplo, en una combustión con motor de ciclo diésel, la explosión del combustible en las cámaras de combustión genera una energía que al empujar los pistones produce el giramiento del cigüeñal. Ahora bien; se debe tener en cuenta que una

combustión total del combustible sería lo ideal para no generar emisión de contaminantes por el déficit de residuos (Limas, 2016).

2.1.8. Tipos del combustible

En el mercado nacional, es frecuente observar que los tipos de gasolina ofertados son la gasolina de 84 octanos sin plomo, 90 octanos sin plomo, 95 octanos sin plomo, 97 octanos sin plomo y otros combustibles como el petróleo diésel, gas licuado de petróleo y; por último, el gas natural vehicular, son los tipos de gasolina ofertados en el mercado nacional (Encyclopaedia Britannica, 2011).

2.1.9. Combustión

Se da en el proceso de oxidación, denominado así por la mezcla del oxígeno con un elemento que hace combustión. Las oxidaciones producen en un corto tiempo grandes proporciones de energía luminosa y calorífica (García, 2019).

2.1.10. Emisiones contaminantes del parque vehicular

Los motores de explosión tienen como finalidad la producción de energía mecánica originada por la energía química que se obtiene en el proceso de oxidación (Rafael y Hernández, 2017).

2.1.11. Motor a gasolina

El motor de gasolina es el proceso de combustión se da con la unión de aire con la gasolina que es encendida por medio de una chispa. En ese orden, se emite al ambiente el CO₂ y H₂O, que no son considerados nocivos. Por otro lado, respecto a la mezcla estequiométrica, es necesario 14,7 gramos de aire para que cause la combustión de un gramo de gasolina (Encyclopaedia Britannica, 2011).

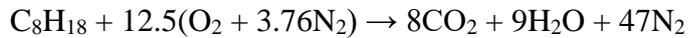
RELACIÓN AIRE – COMBUSTIBLE

Aire

Nitrógeno: 79

Oxígeno: 21/3,76

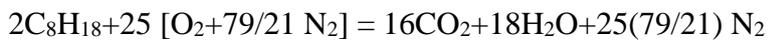
Gas + Aire → Dioxido de Carbono + Agua



$$(12.5(16.2) + 12.5(3.76) (14) (2)) / (8(12) + 1(18)) = 1716 / 114 = 15 / 1$$

A continuación, se presentan las ecuaciones que permiten mostrar cómo se efectúa las reacciones químicas en un motor de gasolina:

- **Proceso de combustión teórico**



- **Proceso de combustión real**

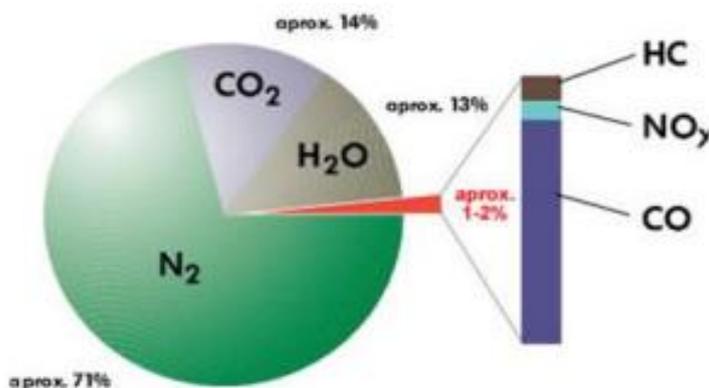
Es importante recordar que la cantidad de combustible y comburente que se utiliza en el proceso real de combustión varía según la altitud a la que opera el motor.

- **Componentes químicos presentes en los gases que libera un motor de gasolina después de la combustión**

En la Figura 1, se detalla la composición química aproximada de los gases que se emanan de un motor de gasolina.

Figura 1

Porcentaje aproximado de los gases de escape de un motor a gasolina



Nota. Adaptado de *Emisiones de NO y NO₂ en motores diésel*, por Cándido, 2015,

<https://almadeherrero.blogspot.com/2015/10/emisiones-de-no-y-no2-en-motores-diesel.html>

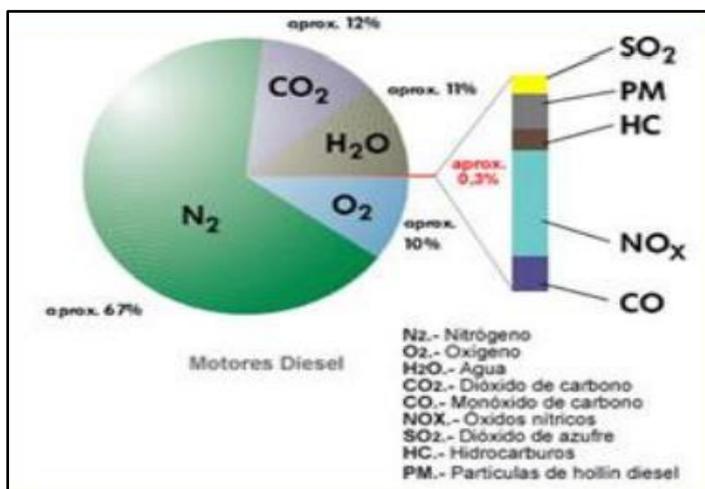
2.1.12. Motor a diésel

La combustión del motor diésel emana gases no contaminantes como el N_2 y CO_2 similar a la combustión de gasolina. En esta situación, puesto que no ocurre de forma constante una combustión completa en el motor, pueden llegar a liberarse partículas sólidas y dióxidos de azufre, que pueden ser nocivos.

En comparación de las emisiones del motor diésel con los del motor otto, si bien las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) han sido similares en ambos tipos de motores, los motores otto generan menos emisiones de CO y HC. En cuanto a las concentraciones de partículas como se visualiza en la figura 2, hay mayor presencia en el motor diésel y si son sólidas (hollín) se manifiestan componentes como los hidrocarburos, agua, sulfato y; azufre y óxidos metálicos varios (Limas, 2016).

Figura 2

Porcentaje aproximado de los gases de escape de un motor diésel



Nota. Adaptado de *Emisiones de NO y NO₂ en motores diésel*, por Cándido, 2015,

<https://almadeherrero.blogspot.com/2015/10/emisiones-de-no-y-no2-en-motores-diesel.html>

2.1.13. Avances regulatorios en el Perú

En el Perú la modernización del transporte es lenta, siendo el promedio de antigüedad de 15 años; siendo alarmante la antigüedad de los buses que llega a un promedio de 18 años y en camiones a 20 años (Derteano, 2019).

Por otra parte, el Ministerio del Ambiente indicó que se ha desarrollado una estrategia cuya finalidad es conseguir la eficiencia energética y la reducción del combustible líquido en el transporte nacional. No obstante, en el Perú, se ha incrementado y modernizado el parque automotor y se ha venido a menos la venta de autos usados (Ministerio del Ambiente, 2014).

Respecto al marco normativo, podemos señalar los siguientes:

- Decreto Supremo N° 047-2001-MTC; en esta norma que define los niveles máximos de emisiones contaminantes para vehículos automotores.
- Decreto Supremo N° 009-2012-MTC; que modifica el Decreto Supremo N° 047-2001-MTC.
- Resolución Ministerial N° 139-2012-MEM/DM, el cual define la veta y consumo de Diésel B5 con niveles de azufre superiores a 50 ppm en los departamentos de Lima, Arequipa, Cusco, Puno y Madre de Dios y en la Provincia Constitucional del Callao.
- Decreto Supremo N° 004-2013-MINAM; que modifica el anexo 1 del Decreto Supremo N° 009-2012-MTC.

2.1.14. Calidad del aire

El marco legal peruano contempla un Estado que fomenta y ejecuta acciones para impulsar medidas de protección ambiental, en tal sentido, es el responsable del desarrollo e implementación de medidas para cumplir con los estándares de calidad ambiental (ECA) y, asimismo, con los niveles máximos permitidos de contaminantes. Por otro lado, advierte que la expansión del parque automotor es uno de los principales emisores de contaminantes y, además, que la optimización de la calidad de los combustibles y el desarrollo económico han

tenido un efecto en las condiciones del aire, por la mayor demanda de energía y recursos de parte de las industrias y población en general (Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología, 2021).

2.1.15. Contaminación atmosférica

Se contempla previamente tener en cuenta otras definiciones, como la existencia de partículas o compuestos gaseosos, que tiene efectos en la salud humana y en general de los seres vivos (García, 2019).

Por otra parte, la contaminación se hace efectiva cuando se presentan elementos extraños en sus componentes, en sus medidas y tiempos determinados; las cuales representan una afectación para la salud de los seres vivos (Organización Mundial de la Salud, 2018).

2.1.16. Tipos de contaminación del aire

Hay afectación en el aire cuando existen elementos diferenciados a su estructura natural, en medidas y tiempos determinados, las cuales pueden ser perjudiciales para los seres vivos. Cabe resaltar que no existe un aire puro, dado el manifiesto y permanente cambio de la materia de los seres vivos en sus diversas capas: hidrósfera, atmósfera y litósfera (Organización Mundial de la Salud, 2018).

2.1.16.1. Contaminación por ambiente. Se da por dos frentes, el primero es el ambiente interno; es decir, se da en el interior de los domicilios, ya sea casa, oficina, talleres, etc.; estos efectos pueden empeorar por las condiciones de ventilación y calefacción que presenten, hábitos de fumar, la humedad, el cocinar y la eliminación deficiente del monóxido de carbono y; por último, el entorno; que se observa por la contaminación de lugares públicos como los parques, campos, calles, avenidas, etc. (García, 2019).

2.1.16.2. Contaminantes del aire. Los estudios señalan que son las fuentes primarias, que representan el 90% de participación contaminante y proviene de la misma fuente de emisión y va hacia la atmósfera y; las fuentes secundarias, que se dan en el aire por la

conjunción de dos o más fuentes primarias. En cuanto a las fuentes contaminantes se puede observar que son de tres tipos: física, química y biológica. La primera, refiere a cualquier contaminación natural o industrial que permite la liberación de gases o partículas, cabe precisar, que la mayor fuente de contaminación física es el ser humano, por ejemplo, por la fabricación de detergentes o productos que utilizan arena; el segundo, refiere a procesos industrializados o de actividades del ser humano como la combustión, cocción; además, se considera también los efectos naturales del aire por su reacción natural por el ozono o por ejemplo por el óxido de azufre y; por último, los biológicos se deriva de la propagación de microorganismos al aire por causa de las personas y animales, como los virus, hongos y bacterias (García, 2019).

2.1.17. Causas de contaminación atmosférica

Según su origen son de 2 tipos: a) Natural: Alteración del viento como consecuencia de la emisión de partículas contaminantes por fuentes naturales, como volcanes, polvo o polen . En tal sentido, se considera la relevancia de los incendios forestales que son provocados naturalmente y emanan niveles elevados de emisiones de óxido de nitrógeno, dióxido de carbono, humo, ceniza y polvo y; las ocupaciones de los organismos vivos, donde poseemos los procesos respiratorios, que liberan grandes porciones de CO₂, las plantas que efectúan la polinización a través del viento y la degradación de los restos de organismos vivos por acción de microorganismos por la cual se genera el metano. Por otro lado, b) Antropogénica: Ocasionada por la actividad antrópica como, por ejemplo, agricultura, industria, asimismo, las actividades humanas, como las del hogar, el transporte, la agricultura y la gestión de residuos, generan una considerable cantidad de partículas y gases contaminantes. En el hogar, el uso de artefactos domésticos con combustible genera calor y libera contaminantes al aire, donde el tipo de combustible utilizado y la frecuencia de uso de cada artefacto determinan el nivel de contaminación. Por otro lado, el transporte es considerado, un gran responsable de la contaminación atmosférica, ya que las emisiones de los vehículos liberan gases nocivos al aire.

En otro ámbito, la agricultura a gran escala, con el uso intensivo de fertilizantes, produce gases de efecto invernadero que contribuyen al cambio climático y la incineración de residuos sólidos, una práctica cultural recurrente, también tiene un impacto negativo en las condiciones del aire. Es por ello, que la polución generada por actividades antrópicas suele tener un alcance local o regional, siendo más significativa en las zonas urbanas, donde la concentración de contaminantes es mayor (García, 2019; Pinedo et al., 2020).

Por otra parte, las contaminaciones antropogénicas pueden ser: (a) Fuentes móviles: estas fuentes sólo contaminan en movimiento y, (b) Fuentes fijas: contaminan en un punto fijo, ejemplo, las fábricas (Pinedo et al., 2020).

2.1.18. Efectos de los contaminantes atmosféricos

2.1.18.1. Efectos sobre el ser humano. A pesar de que los agentes contaminantes tienen la posibilidad de influir a la dermis, ojos y otros sistemas corporales, el primordial afectado es el sistema respiratorio. La inhalación de contaminantes presentes en el aire, representa un riesgo significativo para la salud humana, provocando efectos agudos y crónicos. Habitualmente, los efectos agudos de la exposición a contaminantes del aire se manifiestan de forma inmediata y, en general, son reversibles una vez que cesa la exposición. Entre los efectos agudos más frecuentes, encontramos las náuseas, dolor de cabeza e irritación de ojos. En ocasiones, los efectos crónicos se manifiestan de forma tardía, persistiendo indefinidamente y, en la mayoría de los casos, siendo irreversibles. La exposición prolongada a contaminantes tóxicos, como el asbesto y berilio, puede ocasionar una disminución en la capacidad pulmonar y el desarrollo de cáncer de pulmón, ambos considerados efectos crónicos en la salud (García, 2019).

La contaminación atmosférica resulta ser, en la actualidad, el primer causante de fallecimientos en Europa; en efecto, esta problemática mundial es la causa de la muerte anual de 6,5 millones de personas (Marrodán et al., 2019).

2.1.18.2. Efectos sobre los Ecosistemas (Lluvia Ácida). La lluvia ácida es un fenómeno que se produce cuando la humedad entra en contacto con gases y partículas contaminantes presentes en la atmósfera, adquiriendo un pH ácido. Contribuyendo a: - Declive poblacional de peces y otros organismos. - Modificaciones de estructura al suelo debido al aumento de acidez. - El deterioro de pinturas y degradación de materiales de creación referente a los materiales. - Los efectos nocivos sobre los bosques se manifiestan en la decoloración del follaje, defoliación y mortalidad de árboles (García, 2019).

2.1.19. Dispersión de contaminantes atmosféricos

La dispersión de contaminantes es la manera como se combinan o incorporan los gases que son provocados por las fuentes estáticas o móviles con los gases que hay en el viento, las variaciones climáticas del entorno influyen también en la forma en que se desarrolla la dispersión de acuerdo a su incidencia. El movimiento del aire en la atmósfera actúa como un mecanismo de dilución de los contaminantes, lo que reduce su concentración en un área específica. A su vez, las variaciones térmicas juegan un papel importante en la distribución y concentración de estos contaminantes en el aire (García, 2019).

En efecto, los estudios realizados en el último cuarto de siglo, han podido comprobar la existencia del vínculo de la contaminación atmosférica con la flota vehicular (Vintimilla, 2015).

2.1.20. Gases de combustión

Los gases que emanan de un motor de combustión interna de gasolina pueden ser clasificados como contaminantes o inofensivos:

A. Contaminantes. La exposición prolongada a altas concentraciones de monóxido de carbono puede provocar un cambio permanente en la hemoglobina, impidiendo que esta cumpla su función vital de transportar oxígeno a los pulmones y a las células del cuerpo. La combustión incompleta, debido a la falta de oxígeno, genera monóxido de carbono en lugar de

dióxido de carbono. La alta concentración de CO en la hulla de los vehículos puede generar dos situaciones: una mezcla inicial con exceso de combustible o una deficiencia de oxígeno. Los hidrocarburos, dependiendo de su estructura molecular tienen la posibilidad de exponer diversos efectos dañinos, la presencia de estos compuestos, junto con la acción de la luz ultravioleta y la estratificación atmosférica conduce a la generación del smog fotoquímico. La interacción de los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos que se encuentran en el smog junto con la humedad del viento producen ácidos nitrosos. Estos ácidos, con el tiempo, precipitan como lluvia ácida, contaminando extensas áreas de la tierra (Castelli, 2011).

B. Inofensivos. El nitrógeno es un gas inerte este se muestra en el viento que respiramos con una concentración de 79%. Las altas temperaturas que tienen la posibilidad de exponer en un motor hacen que el nitrógeno se oxide, una vez que esto ocurre están compuestos pequeñas porciones de óxidos de nitrógeno. El oxígeno es un factor imprescindible para la combustión, éste está con una concentración de 21%, si la mezcla es bastante rica o bastante pobre, el oxígeno no va a poder oxidar a todos los enlaces de hidrocarburos y este va a ser expulsado con lo demás de los gases de hulla. El dióxido de carbono, un subproducto de la combustión completa del carbono, no es intrínsecamente dañino para los seres vivos. De hecho, juega un papel crucial en la alimentación de las plantas, actuando como una fuente esencial para su fotosíntesis (Castelli, 2011).

Ver Figura 3.

Figura 3

Contaminación del aire



Nota. Adaptado de *Contaminación vehicular: qué es, tipos, causas y consecuencias*, por Fernández y Malca, 2019, <https://core.ac.uk/download/335023351.pdf>

2.1.21. Gases contaminantes

2.1.21.1. Óxidos de carbono

A. Monóxido de Carbono (CO). Este gas, a pesar de ser incoloro, insípido e inodoro, presenta un alto grado de peligrosidad. Su toxicidad reside en su capacidad para interactuar con la hemoglobina en la sangre, disminuyendo el transporte de oxígeno y poniendo en riesgo la salud, la actividad humana produce grandes cantidades de CO₂, que es un contaminante liberado en grandes proporciones al entorno por actividades antrópicas, en los motores de los vehículos, la quema incompleta de la gasolina genera monóxido de carbono (García, 2019).

Algunos estudios evidencian que los vehículos del tipo liviano con los que emiten más CO (Reyes, 2019).

B. Dióxido de carbono. Este gas, presente de forma natural en la atmósfera, se caracteriza por su ausencia de color, olor y sabor. Este gas, no tóxico, desempeña un papel esencial en el ciclo del carbono en la naturaleza y es responsable del efecto invernadero (García, 2019).

2.1.21.2. Óxidos de azufre

A. Dióxido de Azufre (SO₂). El dióxido de azufre se compone de una mezcla de gases que contienen óxidos de azufre, estos gases incoloros, se originan por la oxidación del azufre cuando éste entra en contacto con el oxígeno, que son su principal fuente de contaminación al quemar combustibles. Los procesos geológicos, como las erupciones volcánicas, no solo liberan gases a la atmósfera, sino que también pueden contribuir a la formación de combustibles fósiles como la gasolina, el petróleo, el diésel y el carbón. Al entrar en contacto con el oxígeno presente en la atmósfera, este contaminante experimenta un proceso de oxidación que da lugar a la formación de sulfatos, los cuales pueden ser trasladados como partículas y en presencia de humedad formar ácidos (García, 2019).

El SO₂ como problema científico se presentó, en la década del 30, cuando se cobró la vida de más de 60 personas en la ciudad de Meuse (Flores et al.,2018).

Este gas, imperceptible a la vista, no presenta riesgo de combustión y desprende un olor penetrante y desagradable. Su presencia en el aire se debe principalmente las acciones del hombre, como la fundición y la quema de carbón y petróleo, sin embargo, existe de forma natural, en el medio ambiente debido a la actividad volcánica (Flores et al.,2018).

El dióxido de azufre (SO₂) se genera a partir de las actividades humanas, especialmente de la quema de petróleo y carbón. Si bien los incendios de pastos, incendios forestales y la actividad volcánica son fuentes naturales de dióxido de nitrógeno, la quema de combustibles fósiles por parte del hombre se ha convertido en la principal responsable de la emisión de este gas a la atmósfera. El SO₂ es dañino para el sistema respiratorio porque puede llegar a las áreas más recónditas de los pulmones e irritarlos. Cabe destacar que, el valor nacional de ACE establecido en 20 µg/m³ (2 horas) está en línea con la recomendación de la OMS. La exposición a corto plazo a elevadas concentraciones puede causar irritación de las vías respiratorias,

reacciones asmáticas y trastornos respiratorios en personas vulnerables (Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología, 2021).

2.1.21.3. Óxidos de nitrógeno (NO_x). Es color amarillo y naturaleza tóxica, el óxido de nitrógeno se genera como resultado de la quema de combustibles fósiles en vehículos y centrales eléctricas. Este gas irritante es precursor de la formación de partículas de nitrato, las cuales generan ácidos en el ambiente. Su producción se da de dos maneras: primero, por la interacción directa entre oxígeno y el nitrógeno presente en la atmósfera a altas temperaturas, lo que produce óxido nítrico (NO). Una parte de este monóxido de nitrógeno se transforma en dióxido de nitrógeno mediante proceso de oxidación. Esta reacción química da lugar a la emisión de óxidos de nitrógeno en proporciones variables de NO y NO_2 (Esteban, 2021).

A. Dióxido de Nitrógeno (NO_2). El NO_2 , un gas inerte con efectos anestésicos, participa en el calentamiento global y debilitamiento de la capa de ozono. Su formación se da por la oxidación del nitrógeno atmosférico durante la combustión a alta temperatura. Este contaminante presenta alta toxicidad por sus propiedades oxidantes y juega un papel crucial en la formación de ozono al ser su precursor. Su origen se encuentra en los hogares, donde se genera a través del uso de estufas de gas y aceite, así como en hornos industriales y en la combustión de combustibles fósiles como petróleo y carbón. El dióxido de nitrógeno se refiere a mezclas de compuestos de óxido nitroso en forma gaseosa, pero se consideran dióxido de nitrógeno, que es el principal contaminante. Su principal fuente artificial proviene de vehículos motorizados, ya sea de centrales eléctricas de petróleo o de gas natural, producción de carbón o generación de energía, el óxido de nitrógeno tiene la capacidad de producirse de forma natural mediante incendios forestales o descomponer nitratos orgánicos (García, 2019).

2.1.21.4. Material particulado. El PM10 con un diámetro inferior a 10 micrómetros, representa entre un tercio y dos tercios de cantidad total de material particulado emitido. Su

capacidad para acumularse en los pulmones y causar daños pulmonares, tiene un impacto significativo en las personas (Organización Mundial de la Salud, 2018).

Presenta una combinación integrada por partículas tanto sólidas como líquidas con una variedad de tamaños, formas y composiciones químicas. Estas partículas en suspensión son clasificadas en nanopartículas, en base al diámetro aerodinámico (Rangel et al., 2022).

En la Tabla 1, se expone las diferencias entre las partículas finas y gruesas que se encuentran en suspensión en el aire.

Tabla 1

Comparación entre partículas finas y gruesas

Características	Partículas finas	Partículas gruesas
Se forma a partir de	Gases	Sólidos grandes/gotas pequeñas
Formadas por	Reacción química, nucleación, condensación, coagulación, evaporación de niebla y gotas de nubes donde los gases se han disuelto y reaccionado	Disrupción mecánica (trituration, abrasión de superficies); evaporación de atomizadores; suspensión de polvo.
Composición	Sulfato; nitrato; amonio; ion hidrógeno; carbón elemental; compuestos orgánicos (HAP's); metales (Pb, Cd, V, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe); agua ligada a las partículas	Polvos suspendidos; ceniza de carbón y petróleo; óxidos metálicos de elementos presentes en la corteza terrestre (Si, Al, Ti, Fe); CaCO ₃ , NaCl, sal marina; polen, esporas de moho; fragmentos de animales y plantas; restos de llantas gastadas.
Solubilidad	Muy soluble, higroscópico y deliquescente.	Muy insoluble y no higroscópico.
Fuentes	Combustión de carbón, hidrocarburos; madera; productos de transformación atmosférica	Re suspensión del polvo industrial; suspensión de tierra removida; fuentes biológicas; construcción y

	de NO _x , SO ₂ y compuestos orgánicos, procesos de altas temperaturas, etc.	demolición; combustión de carbón e hidrocarburos; brisa marina.
Tiempo de vida	De días a semanas	De minutos a horas
Distancia de viaje	Cientos a miles de kilómetros	Hasta 10 kilómetros

Nota. Adaptado de *Comparación entre partículas finas y gruesas*, por Organización Mundial de la Salud, 2018, <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking->

En la actualidad los gobiernos regulan la emisión de los gases contaminantes con la finalidad de alinearse a los objetivos establecidos por la OMS (Medina, 2019).

2.1.22. Marco legal de la calidad del aire

En líneas generales, se presentarán los documentos normativos y normas legales que se asocian con la calidad del aire:

2.1.22.1. Constitución Política del Perú. Este documento conocido como la Carta Magna, promulgada el 29 de diciembre de 1993, expone en el inciso 22 del artículo 2, que toda persona tiene derecho a gozar de un ambiente equilibrado y adecuado al desarrollo de la vida (Constitución Política del Perú, 1993)

2.1.22.2. Ley N.º 28611. Ley General del Ambiente. Tiene la finalidad de establecer y regular acciones con la finalidad de proteger el medio ambiente durante el desarrollo de las actividades humanas para velar por la salud, desarrollo sostenible, aprovechamiento sostenible de los recursos naturales. Asimismo, en el artículo 118 de la presente ley, se señala que las autoridades públicas deben adoptar directrices para vigilancia, prevención y control ambiental, asegurando el mejoramiento, la conservación y recuperación de la calidad del aire, especialmente en áreas donde los niveles de contaminación superan los límites establecidos. (Ley N.º 28611, 2005)

2.1.22.3. Decreto Legislativo N.º 1013. Creación del Ministerio del Ambiente. La presente norma establece la creación del Ministerio del Ambiente como una entidad dependiendo del Poder Ejecutivo, definiendo su alcance en materia ambiental, su estructura organizativa y sus responsabilidades. Las funciones de este ministerio incluyen el diseño, establecimiento, ejecución y supervisión de la política ambiental nacional y sectorial (Decreto Legislativo N.º 1013, 2008).

2.1.22.4. Ley N.º 28611. Ley General del Ambiente. Estándares de calidad ambiental del aire. Según la ley 28611, la Ley General del Ambiente, el Estándar de Calidad Ambiental, comúnmente llamado ECA, se define como la cantidad o proporción de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos que se encuentran en el aire, agua o suelo, sin que representen un riesgo considerable para la salud humana o el medio ambiente (Ley N.º 28611, 2005).

El ECA es obligatorio en el diseño de las normas legales y las políticas públicas. Es un referente obligatorio en el diseño y aplicación de todos los instrumentos de gestión ambiental.

A. Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM. En junio de 2017, se publicó los nuevos Estándares de Calidad Ambiental para Aire en la norma mencionada, los cuales siguen vigentes actualmente. En esta norma, se menciona la aprobación del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire, que servirá como sustento para que se realice siguiendo las regulaciones vigentes. Asimismo, sostuvo que los límites permisibles de concentración de mercurio gaseoso total en el aire entrarán en vigor a partir del día siguiente a la publicación del Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire. (Decreto Supremo N° 003-2017-MINAM, 2017).

Tabla 2*Estándares de Calidad Ambiental para Aire*

Parámetro	Período	Valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Criterios de evaluación	Método de análisis
Benceno (C_6H_6)	Anual	2	Media aritmética anual	Cromatografía de gases
Dióxido de Azufre (SO_2)	24 horas	250	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia ultravioleta (método automático)
Dióxido de Nitrógeno (NO_2)	1 hora	200	NE más de 24 veces al año	Quimioluminiscencia (Método automático)
	Anual	100	Media aritmética anual	
Material particulado con diámetro menor a 2,5 micras ($\text{PM}_{2,5}$)	24 horas	50	NE más de 7 veces al año	Separación inercial/filtración (gravimetría)
	Anual	25	Media aritmética anual	
Material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM_{10})	24 horas	100	NE más de 7 veces al año	Fluorescencia UV (método automático)
	Anual	50	Media aritmética anual	Separación inercial/filtración (gravimetría)

Parámetro	Período	Valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Criterios de evaluación	Método de análisis
Mercurio Gaseoso Total (Hg)	24 horas	2	No exceder	Espectrometría de absorción atómica de vapor frío (CVAAS) o Espectrometría de fluorescencia atómica de vapor frío (CVAFS) o Espectrometría de absorción atómica Zeeman. (Métodos automáticos)
Monóxido de carbono (CO)	1 hora	30000	NE más de 1 vez al año	Infrarrojo no dispersivo (NDIR) (Método automático)
	8 horas	10000	Media aritmética móvil	
Ozono (O₃)	8 horas	100	Máxima media diaria NE más de 24 veces al año	Fotometría de adsorción ultravioleta (Método automático)
Plomo (Pb) en PM₁₀	Mensual	1.5	NE más de 4 veces al año	Método para PM ₁₀ (Espectrofotometría de absorción atómica)
	Anual	0.5	Media aritmética de los valores mensuales	

Parámetro	Período	Valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Criterios de evaluación	Método de análisis
Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)	24 horas	150	Media aritmética	Fluorescencia ultravioleta (Método automático)

Nota. Adaptado de *Estándares de Calidad Ambiental para Aire*, por Ministerio del Ambiente, 2017, <https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/ds-003-2017-minam.pdf>

2.1.23. Índice de la Calidad del Aire [INCA]

Es un indicador que nos provee información sobre las condiciones del aire en un área delimitada, se caracteriza por tener un valor óptimo comprendido entre 0 y 100, cuyo cálculo se realizó considerando los Estándares de Calidad Ambiental del Aire, y como escala final, el valor umbral de aplicación de los Niveles de Estados de Alerta (Ministerio del Ambiente, 2016).

El INCA, como es mayormente conocido, se divide en cuatro categorías de calidad de calidad del aire:

- La primera categoría comprende a la Calificación Buena, que comprende valores del 0 a 50 y se caracteriza por representarse de color verde, la presente categoría establece que la condición del aire se encuentra dentro de los límites considerados como satisfactorios, lo que implica no tiene efectos adversos para la salud humana (Ministerio del Ambiente, 2016).
- La segunda categoría comprende a la Calificación Moderada, que comprende valores del 51 al 100 y se caracteriza por representarse de color amarillo, esta categoría informa que la población de mayor riesgo podría experimentar problemas de salud (Ministerio del Ambiente, 2016).

- La tercera categoría comprende a la Calificación Mala, que comprende valores de 101 a *VUEC y se caracteriza por representarse de color anaranjado, esta categoría informa que la población sensible y población general podría sentirse afectar por problemas de salud (Ministerio del Ambiente, 2016).
- La cuarta categoría comprende a la Calificación Umbral de Cuidado o *VUEC (Valor umbral de estado de cuidado), que significa que los valores del INCA superan este valor umbral, y se caracteriza por representarse de color rojo. De acuerdo con la información disponible, la exposición a la concentración de contaminantes en esta categoría puede provocar múltiples consecuencias para la salud, desde síntomas leves hasta enfermedades graves, especialmente en la población sensible (Ministerio del Ambiente, 2016).

Tabla 3

Valores del Índice de Calidad del Aire

Calificación	Valores del INCA	Colores
Buena	0-50	Verde
Moderada	51-100	Amarillo
Mala	101-VUEC*	Anaranjado
VUEC*	>VUEC*	Rojo

Nota. Adaptado de *Cálculo del Índice de Calidad del Aire por contaminante*, por Ministerio del Ambiente, 2016, <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/RM-N%c2%b0-181-2016-MINAM.pdf>

Según se expuso en el primer párrafo de este apartado, el cálculo del Índice de Calidad del Aire se realizó utilizando como base de los Estándares de Calidad Ambiental de Aire. En paralelo, se estableció, como límite superior el valor de umbral que define la activación de los Niveles de Estados de Alerta. Asimismo, se tomó como referencia las mediciones de los seis contaminantes criterio mencionados:

- Material particulado con diámetro menor a 10 micras (PM10)
- Dióxido de azufre (SO₂)
- Monóxido de carbono (CO)
- Sulfuro de Hidrógeno (H₂S)
- Material particulado con diámetro menor a 2.5 micras (PM2.5)
- Ozono (O₃)
- Dióxido de nitrógeno (NO₂)

A continuación, se presentarán los cuadros del cálculo del INCA para cada contaminante, basado en fórmulas matemáticas:

Tabla 4

Cálculo del ICA para Material particulado (PM10) promedio 24 horas

Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ecuación
0 – 50	0-75	$I(\text{PM10}) = [\text{PM10}] * 100 / 150$
51 – 100	76-150	
101 – 167	151-250	
>167	>250	

Nota. Adaptado de *Cálculo del Índice de Calidad del Aire por contaminante*, por Ministerio del Ambiente, 2016, <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/RM-N%c2%b0-181-2016-MINAM.pdf>

Tabla 5

Cálculo del ICA para Dióxido de azufre (SO₂) promedio 24 horas

Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones (µg/m ³)	Ecuación
0 – 50	0-10	$I (SO_2)=[SO_2]*100/20$
51 – 100	11-20	
101 – 625	21-500	
>625	>500	

Nota. Adaptado de *Cálculo del Índice de Calidad del Aire por contaminante*, por Ministerio del Ambiente, 2016, <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/RM-N%c2%b0-181-2016-MINAM.pdf>

Tabla 6

Cálculo del ICA para Monóxido de carbono (CO) promedio 8 horas

Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones (µg/m ³)	Ecuación
0 – 50	0-5049	$I (CO)=[CO]*100/10000$
51 – 100	5050-10049	
101 – 150	10050-15049	
>150	>15050	

Nota. Adaptado de *Cálculo del Índice de Calidad del Aire por contaminante*, por Ministerio del Ambiente, 2016, <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/RM-N%c2%b0-181-2016-MINAM.pdf>

Tabla 7

Cálculo del ICA para Sulfuro de Hidrógeno (H₂S) promedio 24 horas

Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ecuación
0 – 50	0-75	$I(\text{H}_2\text{S}) = [\text{H}_2\text{S}] * 100 / 150$
51 – 100	76-150	
101 – 1000	151-1500	
>1000	>1500	

Nota. Adaptado de *Cálculo del Índice de Calidad del Aire por contaminante*, por Ministerio del Ambiente, 2016, <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/RM-N%c2%b0-181-2016-MINAM.pdf>

Tabla 8

Cálculo del ICA para Material particulado (PM_{2.5}) promedio 24 horas

Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Ecuación
0 – 50	0-12.5	$I(\text{PM}_{2.5}) = [\text{PM}_{2.5}] * 100 / 25$
51 – 100	12.6-25	
101 – 500	25.1-125	
>500	>125	

Nota. Adaptado de *Cálculo del Índice de Calidad del Aire por contaminante*, por Ministerio del Ambiente, 2016, <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/RM-N%c2%b0-181-2016-MINAM.pdf>

Tabla 9

Cálculo del ICA para Ozono (O₃) promedio 8 horas

Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones (µg/m ³)	Ecuación
0 – 50	0-60	$I(O_3)=[O_3]*100/120$
51 – 100	61-120	
101 – 175	121-210	
>175	>210	

Nota. Adaptado de *Cálculo del Índice de Calidad del Aire por contaminante*, por Ministerio del Ambiente, 2016, <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/RM-N%c2%b0-181-2016-MINAM.pdf>

Tabla 10

Cálculo del ICA para Dióxido de Nitrógeno (NO₂) promedio 1 hora

Intervalo del INCA	Intervalo de concentraciones (µg/m ³)	Ecuación
0 – 50	0-100	$I(NO_2)=[NO_2]*100/200$
51 – 100	101-200	
101 – 150	201-300	
>150	>300	

Nota. Adaptado de *Cálculo del Índice de Calidad del Aire por contaminante*, por Ministerio del Ambiente, 2016, <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/RM-N%c2%b0-181-2016-MINAM.pdf>

2.1.24. Métodos de medición de la calidad del aire

Actualmente, existen múltiples métodos que permiten monitorear la calidad del aire, sin embargo, a continuación, se expondrán los métodos principales utilizados en el país según su tecnología:

2.1.24.1. Sistemas manuales activos. Las muestras de contaminantes se recolectan por medio de colección físico o químico, destinadas a su análisis posterior en el laboratorio. Generalmente, se succiona una cierta cantidad de aire sirviéndose de un colector, como un filtro o una solución química en el transcurso de un período de tiempo específico y luego se retira para ser analizado. Este tipo de método requiere de energía eléctrica, las técnicas de muestreo más habituales para evaluar la afectación del aire incluyen el uso burbujeadores acidímetros para la medición de gases como CO, H₂S, SO₂, COV's, HC, NO₂, O₃; el método de filtración para la determinación de partículas totales suspendidas y el método gravimétrico de altos volúmenes (High Vol) para la cuantificación de partículas en suspensión (Prieto, 2016).

Figura 4

Equipo Hi-Vol - P555



Nota. Adaptado de *Equipos Hi-Vol PM₁₀* por Sanabria, 2012, <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2634/2012andressanabria.pdf>

2.1.24.2. Sistemas automáticos. Este método usa una bomba de succión, a diferencia de los otros métodos a mencionar, a diferencia de otros equipos, estos no se diseñan para la obtención de muestras y su análisis posterior en un laboratorio. Su propósito principal es

conocer la concentración del analito directamente en una cámara de análisis, utilizando diversos métodos ópticos (Ministerio del Ambiente, 2019).

Destacan por la alta precisión de sus mediciones, posibilitando el registro de concentraciones incluso por hora o en intervalos más cortos. La amplia gama de contaminantes que se pueden medir incluye desde los contaminantes criterio regulados (PM10, PM2.5, CO, SO₂, NO₂, O₃) hasta tóxicos presentes en el aire como el mercurio y algunos compuestos orgánicos volátiles. Los equipos disponibles se clasifican en: analizadores automáticos y monitores de partículas. Los analizadores automáticos se emplean para cuantificar los gases contaminantes en el aire, aprovechando las características físicas o químicas de estos gases. Mediante los monitores de partículas, se determina la presencia y cantidad de partículas en suspensión en el aire, enfocándose en PM10 y PM2.5. (Ferro, 2020)

Figura 5

Monitor de partículas automático para medición de PM10 y PM2.5



Nota. Adaptado de *Monitor de Partículas automático para medición de PM10 y PM2.5 en bajo volumen con aprobación US-EPA*, por Sanambiente, s.f., <https://www.sanambiente.com.co/equipos-para-medicion-de-particulas/#categorias>

2.1.24.3. Sistemas manuales pasivos. Los muestreadores pasivos es un método utilizado para tomar muestras de gases y vapores. A diferencia de los sistemas manuales activos, no requiere el bombeo de aire para recolectar muestras. Es por ello, que es denominado “muestreo por difusión” porque se basa en el proceso natural de difusión.

Es un dispositivo que se caracteriza por contar en un extremo del recipiente, una superficie difusora, por donde ingresan las moléculas gaseosas y de vapor; mientras que, en el otro extremo, está el medio adsorbente, donde se recogen las moléculas. Una vez finalizada la exposición al aire, el muestreador pasivo se lleva al laboratorio para el análisis del compuesto absorbido.

La medición de muestreadores pasivos cuenta con una metodología establecida en la Norma Técnica Peruana: NTP 900.036.2017, la cual establece los requisitos y métodos de ensayo para la determinación de la concentración de gases y vapores utilizando muestreadores pasivos (Ministerio del Ambiente, 2019).

A. Muestreadores pasivos para el dióxido de nitrógeno. El principio de funcionamiento del muestreador se basa en la difusión molecular del dióxido de nitrógeno hacia un material que lo absorbe, específicamente trietanolamina. Este proceso permite la captura y retención del gas para su posterior análisis. Su diseño facilita la manipulación y transporte. La magnitud de NO_2 adsorbida en el muestreador por el medio ambiente es directamente proporcional a los niveles de NO_2 presente en el entorno. Tras un período de exposición determinado, se extrae la cantidad total del gas contaminante absorbido por el muestreador, mediante la aplicación de la reacción de Saltzmann a una longitud de onda de 540 micrómetros utilizando un espectrofotómetro (Limas, 2016).

B. Muestreadores pasivos para el dióxido de azufre. El muestreador pasivo aprovecha el fenómeno de difusión molecular para capturar el gas SO_2 del aire y transferirlo a un material que lo retiene. Este proceso permite que el dióxido de azufre presente en el ambiente se difunda

sin necesidad de energía adicional hacia un medio absorbente compuesto por carbonato de potasio y glicerina. Los instrumentos de muestreo empleados se componen de una carcasa de polipropileno que presenta una abertura circular de 20 milímetros de diámetro. Para reducir el impacto del viento en la medición, se incorpora una membrana sostenida por una red metálica. La membrana actúa como una barrera que permite la entrada del aire a una velocidad controlada, minimizando la distorsión de la muestra. Existe una relación directa entre la cantidad del gas contaminante absorbida por el medio absorbente y la concentración de este gas presente en el medio ambiente. Una vez finalizada la exposición al aire, se retira el muestreador y se analiza la cantidad total de dióxido de azufre absorbido mediante cromatografía iónica (Limas, 2016).

2.1.25. Comparación de métodos de medición de la calidad del aire

La tabla a continuación muestra las fortalezas y limitaciones de las técnicas de medición de la calidad del aire:

Tabla 11

Ventajas y desventajas de los métodos de medición de calidad del aire

Métodos de medición	Ventajas	Desventajas
Sistemas manuales activos	<ul style="list-style-type: none"> - Fácil de operar - Muy confiables. - Costo relativamente bajo (requieren energía eléctrica). 	<ul style="list-style-type: none"> - No se aprecian los valores mínimos y máximos durante el día, solo promedios de 24 horas. - Requieren de análisis de laboratorio.
Sistemas automáticos	<ul style="list-style-type: none"> - Valores en tiempo real. 	<ul style="list-style-type: none"> - Costo elevado de adquisición y operación.

Métodos de medición	Ventajas	Desventajas
	<ul style="list-style-type: none"> - Se obtiene concentraciones máximas y mínimas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Requieren personal capacitado para su manejo. - Requieren mantenimiento y calibración constante.
Sistemas manuales pasivos	<ul style="list-style-type: none"> - Simple de operar. - Bajo costo (no requiere de energía eléctrica). 	<ul style="list-style-type: none"> - No son para todos los contaminantes. - Proporciona valores promedios semanales o mensuales. - Dan valores referenciales

Nota. Adaptado de *Métodos de medición de la calidad del aire*, por Tito, 2021,

<https://ingenieriaambiental.net/metodos-de-medicion-de-la-calidad-del-aire/>

III. MÉTODO

La investigación tuvo un enfoque cuantitativo porque su característica fue la de recolectar datos en el lugar de los hechos para ser analizados por medio de herramientas matemáticas (Hernández y Mendoza, 2018).

En efecto, la investigadora recolectó y analizó los datos con el uso de la matemática y la estadística para fundamentar la propuesta hipotética.

3.1. Tipo de investigación

El presente estudio fue de tipo descriptiva, dado que, se realizó la captura de los datos para medir las características poblacionales relacionados a las variables propuestas (Hernández y Mendoza, 2018).

3.1.1. *Diseño de la investigación*

Se aplicó el diseño no experimental. Se caracterizó por la no manipulación deliberada de las variables, en tal sentido, la investigadora procedió a realizar un diagnóstico, en el lugar de los hechos, sin alterar el objeto de la investigación (Hernández y Mendoza, 2018).

Además, por su alcance longitudinal, debido a que, se observó el fenómeno y se recopiló los datos en distintos períodos de tiempo (Hernández y Mendoza, 2018).

3.2. **Ámbito temporal y espacial**

3.2.1. *Espacial (Geográfica)*

El estudio se realizó en las avenidas Morales Duárez (tramos cuadra 27-30) y Universitaria (tramos cuadra 1-2) ubicadas en la provincia de Lima, en el departamento de Lima. El área designada como crítica está localizada entre las coordenadas geográficas 273841.74 m E con 8668332.01 m S; la coordenada 273814.69 m E con 8668603.24 m S; la coordenada 273588.25 m E con 8668581.33 m S; 274061.82 m E con 8668678.38 m S, con una elevación de 75 m.s.n.m. (Anexo A).

La dimensión del estudio en las avenidas Morales Duárez (desde la cuadra 27 hasta la cuadra 30) comprende una superficie 17, 126 m² con una amplitud de 486.12 metros; por otra parte, la avenida Universitaria (desde la cuadra 1 hasta la cuadra 2) comprende una superficie de 7,967 m² con una amplitud de 274 metros.

Demarcación del área de estudio:

- Por el Norte con la avenida Perú
- Por el Sur con la avenida Enrique Meiggs
- Por el Este con la avenida Nicolas Dueñas
- Por el Oeste con la avenida Faucett

3.2.2. *Temporal*

Para desarrollar el estudio se consideró un período de veinticuatro meses consecutivos (desde enero de 2022 a diciembre de 2023), que obedece a la revisión de literatura, proceso de obtención de los muestreadores pasivos; hasta la etapa de conclusiones y recomendaciones de la tesis. Cabe mencionar, que el período de observación se dio en los meses de mayo y junio de 2023, además que la bibliografía utilizada para el presente trabajo data desde el año 2012 hasta el año actual.

3.3. Variables

3.3.1. *Variable independiente: Flujo vehicular*

3.3.1.1. Dimensión:

- Tránsito semanal: El indicador es el número de vehículos por semana.

3.3.2. *Variable dependiente: Calidad del aire*

3.3.2.1. Dimensiones:

- Dióxido de nitrógeno: El indicador son los niveles de concentración de dióxido de nitrógeno expresados en microgramos por metro cúbico.

- Dióxido de azufre: El indicador son los niveles de concentración de dióxido de azufre expresados en microgramos por metro cúbico.

La tabla 12 muestra la correspondiente Matriz de operacionalización.

Tabla 12

Matriz de operacionalización

VARIABLES	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición
Flujo vehicular	La principal fuente de emisión en los sistemas urbanos.	La variable flujo vehicular se midió por medio de la dimensión de intensidad horaria. Utilizando una ficha de registro de campo para el registro de los datos	Intensidad	Horario	N° vehículos/hora en una semana
Calidad de aire	Tener un ambiente equilibrado y sano para la vida dicho por la constitución política de nuestro país, una adecuada	La variable calidad de aire se midió por medio de las dimensiones dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre.	Parámetros Físico-Químico	Dióxido de nitrógeno <hr/> Dióxido de azufre	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ <hr/> $\mu\text{g}/\text{m}^3$

VARIABLES	DEFINICIÓN	DEFINICIÓN	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE
	Conceptual	Operacional			Medición
	y buena calidad de aire mejora la calidad de vida de una población (Ministerio del Ambiente, 2016).	Utilizando una ficha de registro de campo para el registro de los datos			

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

La población de la presente investigación lo conformó el flujo vehicular en las 96 manzanas que conforman la avenida de Morales Duárez y las 202 manzanas que conforman la avenida Universitaria donde existen problemas que influyen en la alteración de la calidad del aire.

3.4.2. Muestra

La muestra lo conformó el flujo vehicular que recorren las 4 manzanas de Morales Duárez (tramos cuadra 27-30) y las 4 manzanas de la avenida Universitaria (tramos cuadra 1-2) en la tercera semana de mayo y tercera semana de junio del 2023.

3.5. Instrumentos

3.5.1. Monitoreo de calidad del aire

3.5.1.1. Información

- Norma técnica peruana NTP 900.036:2017.

3.5.1.2. Instrumento

- Formato de ubicación de puntos de muestreo (Anexo B), este instrumento nos permitió registrar los puntos de muestreo de calidad del aire, mediante el GPS.

3.5.1.3. Materiales

- Escalera retráctil, sirvió como apoyo para colocar el muestreador pasivo a una altura de 2 a 3 m sobre el nivel de suelo en el poste de alumbrado público.
- Cintilla de plástico, permitió asegurar el portatubo en el poste de alumbrado público, para evitar su caída durante la medición.
- Wincha, permitió medir la altura sobre el nivel del suelo para ubicar el portatubo en el poste de alumbrado público.
- Portatubos, sirvió como protección de los muestreadores pasivos frente a las condiciones meteorológicas durante el tiempo de medición.

3.5.1.4. Equipos

- Muestreadores pasivos, equipo de muestreo de método pasivo, que permitió medir el grado de concentración de los gases contaminantes durante el período de medición.
- GPS, equipo que permitió calcular las coordenadas UTM de los puntos de muestreo de calidad del aire.

3.5.2. *Monitoreo vehicular*

3.5.2.1. Instrumento

- Formato de conteo de vehículos (Anexo C), permitió calcular la cantidad de automóviles que recorren las avenidas Morales Duárez y Av. Universitaria.

3.5.2.2. Materiales

- Lápices o lapiceros, sirvió como material de escritura para anotar la cantidad de vehículos que transitan por los tramos de las avenidas Morales Duárez y Av. Universitaria.
- Tabla de apoyo, sirvió como medio de soporte para el personal de apoyo que realizaba la medición de conteo de vehículos.
- Sobre manila, permitió guardar y mantener en buenas condiciones los instrumentos de campo: Formato de ubicación de puntos de muestreo y Formato de ubicación de puntos de muestreo.

3.5.3. Información geográfica

- Carta digital de Lima, a escala 1:100,000 (Desarrollado por el Instituto Geográfico Nacional – IGN – Geo servidor).
- De igual forma, se empleó la siguiente información complementaria en formato de shapefile de los Geo servidores:
- Límite distrital de Lima Metropolitana del Instituto de Estadística e Informática (INEI).
- Límite provincial de Perú del Instituto de Estadística e Informática (INEI).

3.5.4. Materiales de oficina

- Equipos: (a) Un (01) GPS (Global Positioning System) GARMIN; permitió el registro de la ubicación actual en coordenadas, las cuales se trasladaron a un mapa para identificar la localización específica dentro del ámbito de investigación; (b) Un (01) computador portátil ACER NITRO 5 AN515-55, con procesador CORE i7, RAM 8 GB, Disco duro 512 GB, tarjeta de video dedicada de 4 GB, Monitor de 15,6 pulgadas, marca ACER; impulsó la gestión y elaboración de archivos en formato electrónico; (c) Una (01) impresora EPSON Stylus CX3500; permitió la

impresión de los documentos desarrollados a lo largo del estudio y, por último; (d) Una (01) Cámara Digital; propició la obtención de imágenes como evidencia del trabajo de campo.

- Software: (a) ArcGIS 10.4: Se utilizó para la creación de mapas que presentaban la ubicación de las avenidas Universitaria y Morales Duárez, incluyendo los puntos de conteo vehicular y puntos de muestreo de calidad del aire. Adicionalmente, permitió la creación de mapas que mostraban la distribución espacial de la concentración de SO₂ y NO₂ y permitió la evaluación de la presencia de ambos contaminantes en el aire; (b) AERMOD View 11.2 – Model: AERMOD: Facilitó la creación de modelos para evaluar la concentración y deposición de contaminantes de SO₂ y NO₂; (c) WRPLOT View – Freeware 7.0: Se empleó para analizar el comportamiento del viento a través de la construcción de un diagrama de Rosa de Vientos, por medio de la toma de información de parámetros del viento de la Estación Meteorológica San Martín de Porres – SENAMHI, a lo largo del intervalo de muestreo; (d) Google Earth: Sirvió para estudiar las características del terreno de Lima y ubicar los puntos de conteo vehicular y puntos de muestreo; (e) Programa Microsoft Excel 2013: se empleó para el procesamiento de datos y elaboración de gráficos del flujo vehicular, y; (f) Microsoft Word 2013: para la redacción del presente trabajo de investigación.

3.6. Procedimientos

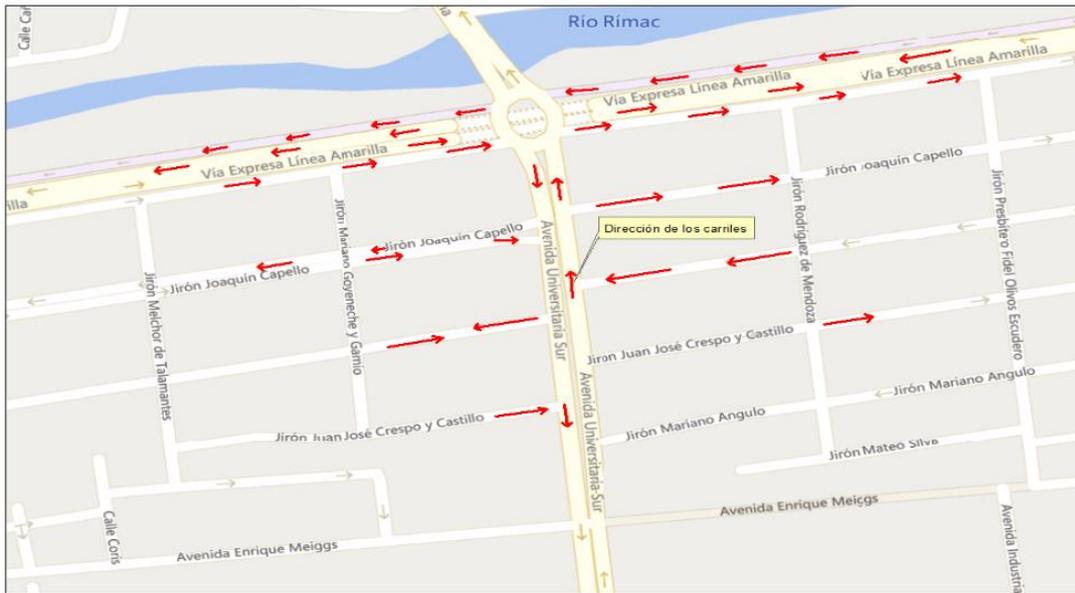
3.6.1. Objetivo 1: Cuantificar el flujo vehicular en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.

3.6.1.1. Elección de puntos de conteo vehicular. Se realizó una delimitación del área de estudio con la ayuda de la plataforma de Google Maps, como soporte para visualizar los

tramos de recorridos las avenidas Morales Duárez (tramos cuadra 27-30) y Universitaria (tramos cuadra 1-2) y los sentidos de los carriles que alimentan ambas avenidas (ver Figura 6).

Figura 6

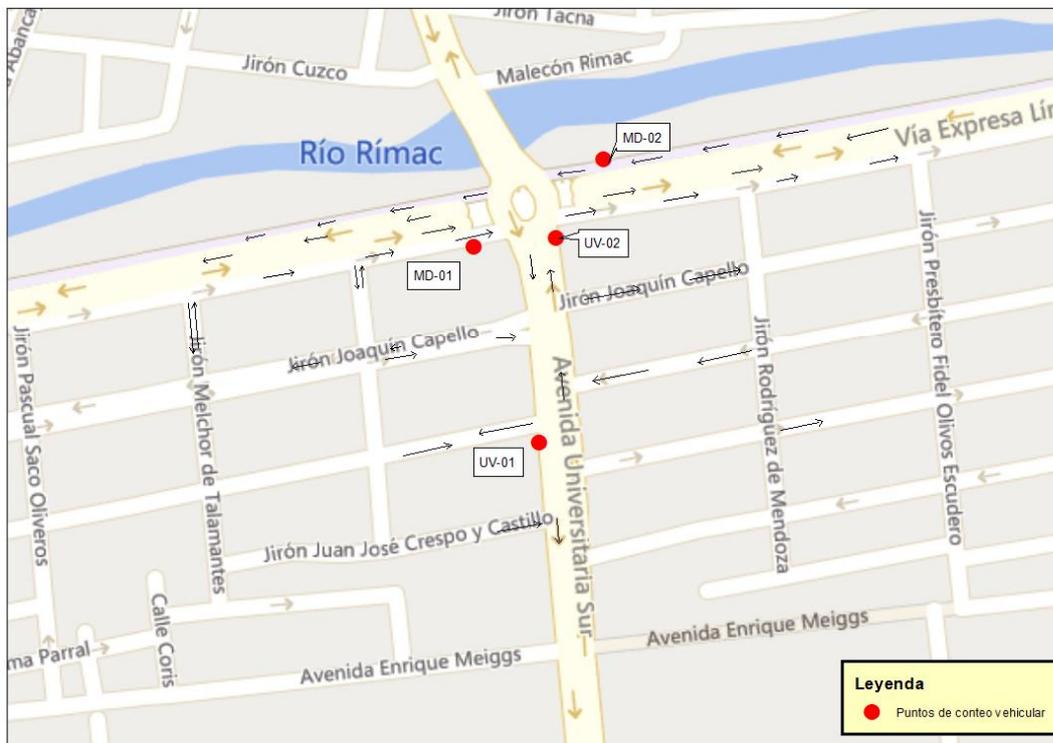
Sentidos de las vías en Av. Morales Duárez y Av. Universitaria



Por otra parte, se hizo un estudio observacional en el área de estudio para elegir los puntos idóneos de observación.

Debido a que, la gran mayoría de carros que circulan por la Av. Universitaria, son provenientes de norte a sur y de sur a norte se eligió dos puntos de conteo por avenida, conformado por un colaborador por punto para ambos tramos. Así mismo, para la Av. Morales Duárez, se eligió dos puntos de conteo, el cual fue conformado por un colaborador por punto para ambos tramos.

La localización de las estaciones de aforo vehicular en los tramos de las avenidas mencionadas, se definieron considerando las intersecciones, el flujo de tráfico vehicular y la ubicación de los paraderos en ambas avenidas. Las estaciones de aforo vehicular se observan en la Figura 7.

Figura 7*Puntos de conteo vehicular*

3.6.1.2. Diseño del formato de conteo vehicular. El formato de conteo vehicular fue elaborado por la investigadora, y fue diseñado para categorizar los vehículos según los siguientes criterios: Vehículos livianos, vehículos pesados y vehículos menores.

Este formato contó con la siguiente información:

- a. Nombre de avenida: Es la avenida en donde se está realizando el conteo vehicular.
Ejemplo: Av. Nicolas Dueñas
- b. Código: Es el código asignado por la investigadora al punto de conteo vehicular.
Ejemplo: UV-01
- c. Fecha: Es la fecha de medición del conteo vehicular.
Ejemplo: dd/mm/aa
- d. Hora: Es la hora de medición del conteo vehicular.
Ejemplo: 7:00 a.m. – 8:00 a.m.

Debido al alto flujo vehicular en las avenidas, se diseñó un formato donde se registró la cantidad y tipo de vehículos que transitan por las avenidas por cada hora para recolectar de forma más adecuada la información. Es decir, en un día de medición, se utilizaron 12 Formatos de conteo de vehículos por punto de medición.

En el Anexo C, se crearon dos columnas por cada 20 minutos de medición, ya que la primera columna, sirvió para anotar el número de vehículos que el personal observaba según su tránsito en la avenida y la segunda columna sirvió para anotar el resultado de la suma de la cantidad de vehículos que transitaron a lo largo de la vía durante los 20 minutos de medición según su categoría.

Al finalizar la hora de medición, se sumaron los tres resultados de la suma por cada 20 minutos de medición, para obtener el total de vehículos observados en una hora por categoría vehicular.

3.6.1.3. Selección de personal para aforo vehicular. El conteo vehicular se realizó mediante el método manual, es decir se seleccionaron a cuatro colaboradores para cuantificar el número de vehículos por un tiempo determinado, estos colaboradores fueron capacitados previamente para el llenado del Formato de conteo de vehículos (Anexo C).

3.6.1.4. Conteo vehicular en las avenidas Morales Duárez y Av. Universitaria. El conteo vehicular se realizó en la tercera semana del mes de mayo y tercera semana del mes de junio, en el horario de 07:00 am a 7:00 pm, durante los días de lunes a domingo. Se registró la afluencia de vehículos en las vías, mediante el uso del Formato de conteo de vehículos (Anexo C), según las características de los vehículos:

- Vehículos livianos: Automóvil, Station Wagon, Pick up, camioneta rural, camioneta panel y microbús.
- Vehículos pesados: Bus, camión (carga pesada), semi trailer y trailer.
- Vehículos menores: Motos lineales, mototaxis y trimotos de carga.

En el Formato de conteo de vehículos (Anexo C), se registraron la cantidad de vehículos que recorrieron las vías durante una hora de medición, por lo que se utilizaron 12 formatos para recolectar el número de vehículos en un día de medición por cada punto de conteo.

3.6.1.5. Cálculo del flujo vehicular. Por medio del formato de conteo vehicular, se obtuvo la cantidad de vehículos que cruzan ambas avenidas por una hora, durante una semana de observación in situ por mes y se trasladó la información al Programa Microsoft Excel, donde se agrupó la información según la categoría o características de vehículo: vehículos livianos, pesados y menores.

Posteriormente, se obtuvieron los datos del flujo vehicular en cada avenida por mes, y se elaboraron cuadros y gráficos por cada avenida y por el mes de observación.

Asimismo, se elaboraron gráficos para comparar el flujo vehicular en cada avenida durante el período de observación.

3.6.2. *Objetivo 2: Determinar la concentración de NO₂ y SO₂ por método de difusión pasiva en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.*

3.6.2.1. Elección de puntos de muestreo de calidad del aire. Se utilizó el método no probabilístico por conveniencia, para determinar tres puntos de muestreo para cada avenida seleccionada.

Se tomaron las coordenadas UTM de los puntos de muestreo, mediante el uso de GPS y fueron registradas en Formato de ubicación de puntos de muestreo (Anexo B).

Figura 8

Toma de coordenadas UTM de los puntos de muestreo



3.6.2.2. Gestión para medición de calidad del aire. Se realizó la compra y recepción del equipamiento para la obtención de muestras, incluyendo 12 filtros de difusión pasiva para NO_2 y SO_2 , así como un filtro como blanco para su uso en campo, adicionalmente 6 porta filtros con la consultora Klepel Consulting S.A.C. Posteriormente, se tramitó un permiso al alcalde de la Municipalidad Metropolitana de Lima, con el propósito de instalar los dispositivos de muestreo pasivo en los postes de luz y se coordinó la obtención de materiales con el fin de instalar los dispositivos de muestreo mencionados en el ítem 3.5.1.

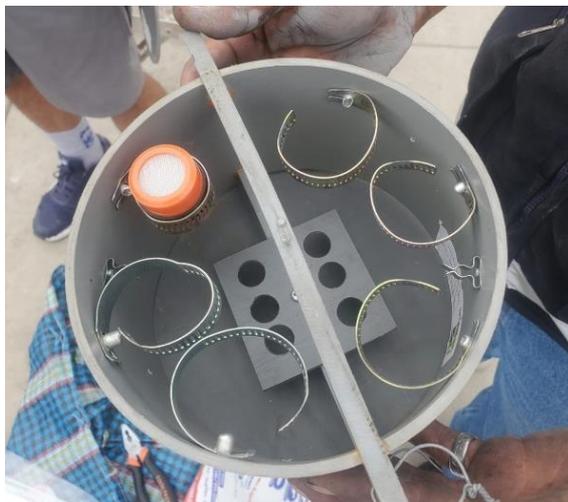
3.6.2.3. Instalación de muestreadores pasivos. Para la instalación de los puntos de muestreo de calidad del aire, se consideraron los siguientes criterios técnicos, siguiendo el Protocolo Nacional de Monitoreo de la Calidad Ambiental del Aire:

- Altura de muestreadores pasivos: Se consideró una altura comprendida entre 2 a 3 metros sobre el nivel del suelo.
- Libre de obstáculos: Se tomó en cuenta los postes de alumbrado con fácil acceso para la instalación y desinstalación de los dispositivos de muestreo.

Se acondicionaron los seis porta filtros, situando dentro del portafiltro 1 filtro combi de difusión pasiva para NO_2 y SO_2 por cada porta filtro.

Figura 9

Filtro combi instalado en el porta filtro



Los porta filtros se instalaron en los postes de luz en las estaciones de muestreo con la ayuda de una escalera retráctil y fueron asegurados con dos cintas retráctiles en la parte superior e inferior del porta filtro con el poste de alumbrado.

Figura 10

Instalación de los porta tubos en los postes de alumbrado público.



Posteriormente, se realizó el llenado de la cadena de custodia respectiva luego de la instalación de los filtros.

3.6.2.4. Operación de muestreadores pasivos. El período de medición de contaminantes fue de 2 meses, donde fueron monitoreados los gases contaminantes en el área de muestreo.

Al finalizar el mes de mayo, se retiraron los portafiltros y se reemplazó el filtro combi usado por el filtro combi que se utilizó para la medición del siguiente mes. Se volvió a instalar el portafiltro en el poste de alumbrado y se llenó la cadena de custodia.

3.6.2.5. Retiro de muestreadores pasivos. Finalizado los dos meses de monitoreo, se retiraron los dispositivos de muestreo pasivo y para la evaluación pertinente, se trasladaron a la empresa Klepel Consulting S.A.C. en el laboratorio PASSAM AG.

3.6.2.6. Gestión de resultados de análisis de laboratorio. Luego de obtener los resultados de análisis del laboratorio, se ingresaron los datos en el programa Microsoft Excel para la generación de gráficos de los parámetros de NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez y Universitaria. Posteriormente, se contrastó cada parámetro con la normativa ambiental peruana y normativa internacional (Organización Mundial de la Salud, 2018).

3.6.2.7. Procesamiento de información meteorológica de dirección y velocidad del viento. En el transcurso de la etapa de muestreo de calidad del aire, se descargaron las variables que caracterizan el comportamiento del viento, como su velocidad y dirección de la Estación Meteorológica SAN MARTIN DE PORRES en el programa Microsoft Excel. Posteriormente, se importó el archivo en el programa WRPLOT VIEW – Freeware 7.0, relacionándose las columnas con las descripciones que solicita el programa. Se ingresó a la pestaña “Station Information”, para seleccionar la referencia de ubicación de punto de monitoreo. Luego, se configuró los parámetros, se definió el nombre del archivo y se guardó con la extensión “.SAM”. Finalmente, se importaron los datos para la generación del gráfico.

3.6.2.8. Generación de modelo de dispersión de contaminantes de NO₂ y SO₂. Para crear el simulador de transporte de contaminantes, se utilizó el programa AERMOD 11.2, cuyo uso es muy recomendado por la USEPA. Sin embargo, previamente se utilizaron preprocesadores como apoyo para el modelamiento:

A. AERMET. Primero, se empleó el AERSURFACE, para precisar las características de la superficie, que son requeridas para AERMET. Se delimitó una superficie de una radio de 1 km alrededor de la estación meteorológica de la estación Jorge Chávez. Esta estación fue elegida ya que nos brindaba la información que se requería para el modelamiento a diferencia de la estación meteorológica San Martín de Porres. Al verificarse que las condiciones del suelo eran las mismas dentro de la circunferencia definida y la zona era Urbana, se obtuvieron los valores de albedo (0.2075), rugosidad (1.025) y Razón de Bowen (1).

Posteriormente, se usó ARMET, que es un preprocesador de datos meteorológicos, donde luego de ingresar los datos solicitados: Datos de superficie e información de radiosondeo, obtenemos dos archivos: Archivo de Superficie (.SFC) y Archivo de Perfil (.PFL).

La información se adquirió de la siguiente manera:

Los datos de superficie fueron descargados de <https://www.ncei.noaa.gov/pub/data/noaa/>, donde obtuvimos la información que provee la estación Jorge Chávez de manera diaria. El período de datos a usar fue de 1 de enero del 2022 al 30 de octubre del 2023, debido a que el período mínimo de datos para modelar es de 1 año para un estudio de modelamiento, se optó elegir este período para una mayor validez en el modelado.

Con respecto a los archivos de radio sondeo (Upper Air) se buscó su descarga de la plataforma NOAA/ESRL Radiosonde Database, sin embargo, la información al no encontrarse disponible se optó por un estimador de Upper Air del programa de AERMOD.

B. AERMAP. Luego, se usó el AERMAP, el cual es otro preprocesador del AERMOD, que permite calcular los parámetros que permiten al AERMOD, modelar la interacción de la pluma sobre el terreno.

A través de la página Internet Archive, (https://web.archive.org/web/20170124235850/https://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3/South_America/), se descargó el archivo de elevación digital DEM o Geo TIFF, luego se eligió el dominio de estudio de la modelación, tomándose los límites del área de estudio y se ingresó los valores de las coordenadas en UTM.

Luego del procesamiento de ambos preprocesadores, se utilizó el programa AERMOD, debido que el programa requería que se ingrese los valores de tasa de emisión en g/s, por lo que se buscó alternativas para determinar el cálculo de los gases contaminantes en esa unidad de medida. Se determinó un valor de 0.496 gr de NO₂ por kilómetro recorrido para vehículos a gasolina, mientras que un valor de 1.269 gr de NO₂ por kilómetro recorrido para vehículos a diésel, esta información en base al estudio de Ayala Aguirre & Beteta Alvarado (2016). Con respecto a los valores de SO₂, se halló una fórmula utilizada en la Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (2009), el cual es la siguiente:

$$E_{SO_2j} = 2 \times CC_{j,m} \times Scomb_m$$

Donde:

E_{SO_2j} : Emisiones de SO₂ emitidas por el vehículo tipo j, (ton/año)

$CC_{j,m}$: Consumo de combustible del vehículo tipo j que utiliza combustible m (ton/año)

$Scomb_m$: Contenido de azufre del combustible tipo m (en peso m/m)

Posteriormente, se determinó la tasa de emisión en base al número de vehículos por hora que transitan por ambas avenidas, la longitud de las avenidas y el factor de emisión, obteniéndose una tasa de emisión de contaminantes en la avenida Universitaria y Morales

Duárez. Para la avenida Universitaria, se consideró el flujo vehicular de automóviles y microbuses y para la avenida Morales Duárez, se consideró el flujo vehicular de automóviles; en ambos casos, se consideraron solo esos tipos de vehículos, al ser los que tenían una mayor afluencia vehicular en las avenidas.

Finalmente, se calculó la Altura de la Pluma (Plume Height), la Altura de Liberación del Contaminante (Release Height) y Dimensión Vertical Inicial de la Pluma de la fuente del área de emisión; este último parámetro fue usado para modelar fuentes móviles. Estos parámetros mencionados fueron calculados por el programa de AERMOD en base a las fórmulas establecidas en USEPA (2011). Por último, se realizó la ejecución del modelado de contaminantes en el área de estudio.

3.6.3. Objetivo 3: Determinar la relación entre el flujo vehicular y las concentraciones de NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.

Para determinar la asociación entre el flujo vehicular y las concentraciones de NO₂ y SO₂, se realizó el análisis de la influencia del tránsito vehicular en los niveles de contaminación atmosférica mediante la prueba estadística de Mann-Whitney, exportando los valores del programa Microsoft Excel de ambas variables al programa estadístico MINITAB versión 19, y se estimó con un nivel de confianza al 95%.

3.6.4. Objetivo 4: Proponer estrategias para reducir el flujo vehicular y mejorar la calidad del aire por NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023.

Finalmente, con base en los hallazgos de la investigación, se revisó Planes de Movilidad Sostenible de países latinoamericanos como de Argentina, Chile, México, Colombia, entre otros; que tuvieron el mismo problema ambiental que afronta el área de estudio. Las estrategias que se van a proponer en el capítulo de resultados tienen como base el fomentar el transporte

sostenible en el público y desincentivar a la población al uso de vehículos particulares, de igual manera la introducción de tecnologías en los automóviles para reducir la emisión de NO₂ y SO₂. Finalmente, las medidas sugeridas por este presente estudio son propuestas por la investigadora para ser replicadas en el Cercado de Lima.

3.7. Análisis de datos

Para la comprobación de la hipótesis, se utilizó el programa estadístico MINITAB, versión 19; en ese sentido se estableció los siguientes pasos:

- En primer lugar, se definió el flujo vehicular en las avenidas Morales Duárez (tramos cuadra 27-30) y Universitaria (tramos cuadra 1-2) ubicadas en Cercado de Lima.
- Luego, se tabuló los datos en una hoja de cálculo, en la que se consideró el registro de los datos de los vehículos y de los niveles de los gases contaminantes.
- Posteriormente, los datos fueron exportados al MINITAB, versión 19.

Para el análisis de los datos se aplicó la prueba estadística Mann-Whitney con el programa MINITAB, versión 19 para evaluar el impacto del flujo vehicular en la calidad del aire por dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre con un nivel de confianza al 95%.

3.8. Consideraciones éticas

La muestra censal fue tomada en los meses de mayo y junio de 2023 aplicando la metodología definida en el estudio, de modo que, se respetó estrictamente la captura de los datos tal cual se presente en el lugar de los hechos. Por otra parte, el análisis del laboratorio fue desarrollado por la investigadora con la guía y acompañamiento del jefe a cargo.

En cuanto a la elaboración y redacción de la investigación, se cumplió con las citas correspondientes, respetando los derechos de autor, siguiendo los lineamientos de la Normativa APA vigente y las consideraciones establecidas por el Reglamento General de Grados y Títulos de la Universidad Nacional Federico Villarreal.

IV. RESULTADOS

4.1. Cuantificación del flujo vehicular en las avenidas Universitaria (tramos cuadra 27 – 30) y Av. Morales Duárez (tramos cuadra 1 – 2)

Se determinó el conteo vehicular en las avenidas Universitaria y Morales Duárez durante la tercera semana del mes de mayo y junio, teniéndose como período de observación: Del 15 al 21 de mayo del 2023 y del 19 de junio al 25 de junio del 2023. Este conteo vehicular fue realizado de forma in situ, de 7:00 am a 7:00 pm, teniendo dos puntos de muestreo por cada tramo en cada avenida.

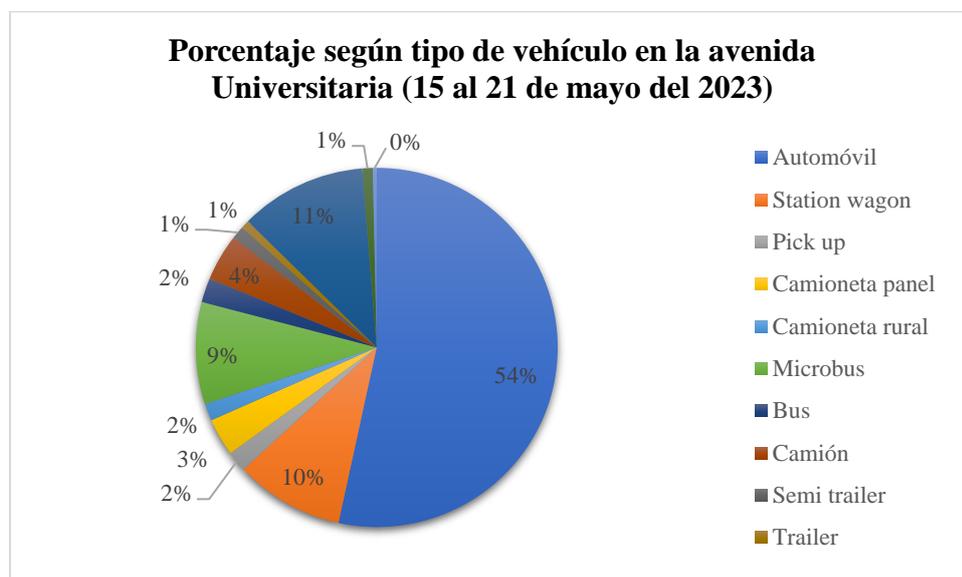
4.1.1. Flujo vehicular en la avenida Universitaria

A lo largo del intervalo de observación del 15 al 21 de mayo del 2023, se observó una afluencia de 184 301 vehículos, donde se visualizó que la mayor cantidad de vehículos que circularon fueron los automóviles (53.40 %), motos lineales (11.32 %) y los station wagon (9.75 %). Por otro lado, se apreció que la menor cantidad de vehículos que circularon por esas vías fueron los trimotos de carga (0.35 %), tráiler (0.76 %) y mototaxi (0.93 %).

La Figura 11 permite observar la distribución porcentual de los tipos de vehículos en la Avenida Universitaria del 15 al 21 de mayo.

Figura 11

Porcentaje según tipo de vehículos en la avenida Universitaria (15 al 21 de mayo del 2023)

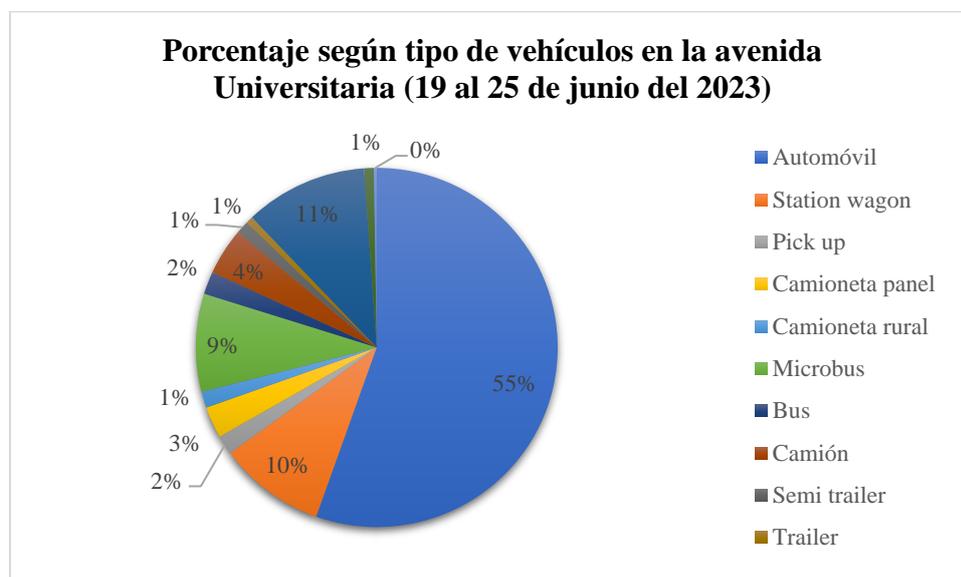


Durante el período de observación del 19 al 25 de junio del 2023, se observó una afluencia de 200 597 vehículos, donde se visualizó que la mayor cantidad de vehículos que circularon son los automóviles (55.44 %), motos lineales (10.98 %) y los station wagon (9.55 %). Por otro lado, se apreció que la menor cantidad de vehículos que circularon por esas vías fueron los trimotos de carga (0.25 %), tráiler (0.65 %) y mototaxi (0.87 %).

La Figura 12 nos permite ver la distribución porcentual de los vehículos según su tipología en la Avenida Universitaria del 19 al 25 de junio.

Figura 12

Porcentaje según tipo de vehículos en la avenida Universitaria (19 al 25 de junio del 2023)



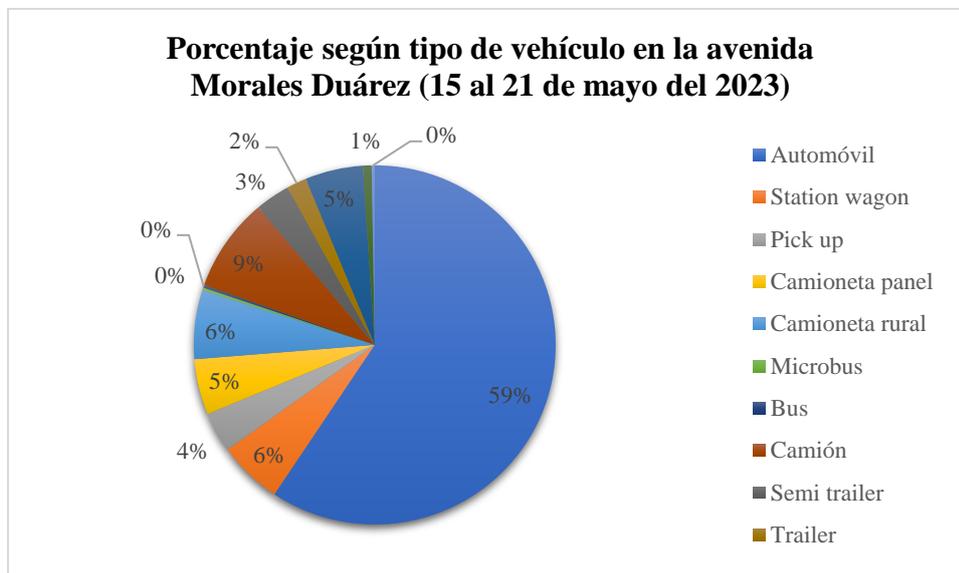
4.1.2. Flujo vehicular en la avenida Morales Duárez

A lo largo del intervalo de observación del 15 al 21 de mayo del 2023, se observó una afluencia de 140 756 vehículos, donde se visualizó que la mayor cantidad de vehículos que circularon fueron los automóviles (59.36 %), camiones (8.48 %) y camionetas rurales (6.19 %). Por otro lado, se apreció que la menor cantidad de vehículos que circularon por esas vías fueron los buses (0.24 %), microbuses (0.25 %) y trimotos de carga (0.27 %)

La Figura 13 permite observar la distribución porcentual de los tipos de vehículos en la Avenida Morales Duárez del 15 al 21 de mayo.

Figura 13

Porcentaje según tipo de vehículos en la avenida Morales Duárez (15 al 21 de mayo del 2023)

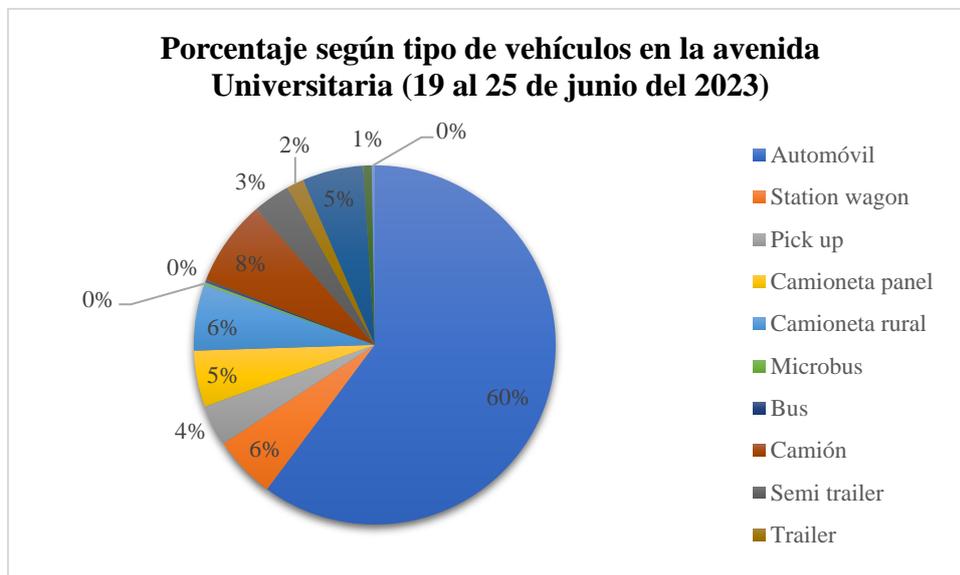


Durante el período de observación del 19 al 25 de junio del 2023, se observó una afluencia de 145 918 vehículos, donde se visualizó que la mayor cantidad de vehículos que circularon son los automóviles (60.14 %), camiones (7.76 %) y las camionetas rurales (5.94 %). Por otro lado, se apreció que la menor cantidad de vehículos que circularon por esas vías fueron los microbuses (0.24 %), buses (0.24 %) y trimotos de carga (0.27 %).

La Figura 14 nos permite ver la distribución porcentual de los vehículos según su tipología en la Avenida Morales Duárez del 19 al 25 de junio.

Figura 14

Porcentaje según tipo de vehículos en la avenida Morales Duárez (19 al 25 de junio del 2023)



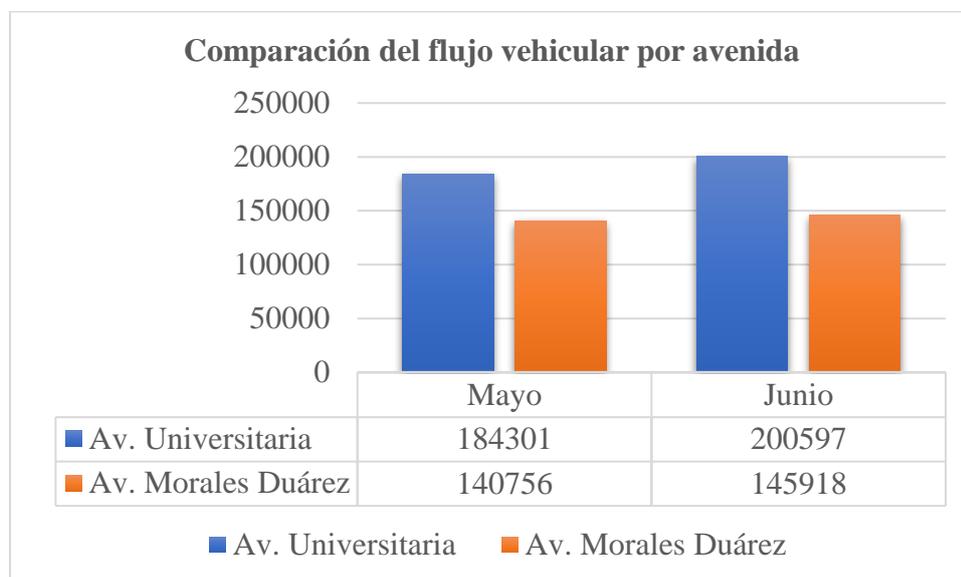
4.1.3. Comparación de flujo vehicular en la avenida Universitaria y Morales Duárez

Para realizar la comparación de flujo vehicular en ambas avenidas, se sumó el total de vehículos por cada mes y los resultados son observados en la Figura 15.

Durante el período de observación del conteo vehicular en ambas avenidas, se pudo observar que existe una mayor afluencia de vehículos en la avenida Universitaria en el mes de junio. Asimismo, se apreció que el flujo de vehículos en ambas avenidas, se incrementó en junio en comparación con mayo.

Figura 15

Comparación del flujo vehicular en la avenida Universitaria y Morales Duárez



4.2. Determinación de la concentración de NO₂ y SO₂ en las avenidas Universitaria y Morales Duárez

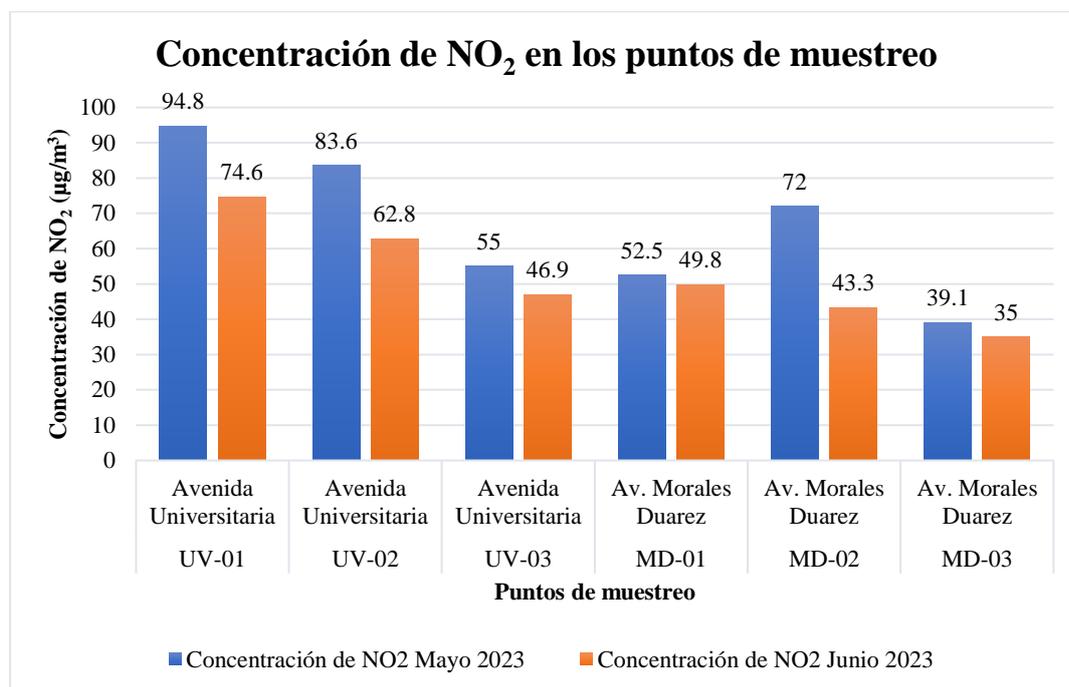
Se determinó los niveles de los gases contaminantes mediante el uso de dispositivos de muestreo pasivos instalados en los postes de luz en las avenidas Universitaria y Morales Duárez. Posteriormente, fueron analizados por el método SP19 Cromatografía Iónica.

4.2.1. Concentración de NO₂ y SO₂ en las avenidas Universitaria y Morales Duárez

4.2.1.1. Resultados del análisis de laboratorio de NO₂ en las avenidas Universitaria y Morales Duárez. En la Figura 16, se puede visualizar los hallazgos de los niveles de NO₂ en las seis estaciones de muestreo en los meses de mayo y junio del año 2023. Para el mes de mayo, se aprecia que la estación de muestreo UV-01 destacó por la más alta concentración de NO₂ con 94.80 µg/m³, por otro lado, el punto de muestreo MD-03 se distinguió por su baja concentración de NO₂ con 39.1 µg/m³. Para el mes de junio, se presenta que el punto de muestreo UV-01 obtuvo la más alta concentración de NO₂ con 74.60 µg/m³, por otro lado, el punto de muestreo MD-03 se diferenció por su baja concentración de NO₂ con 35 µg/m³.

Figura 16

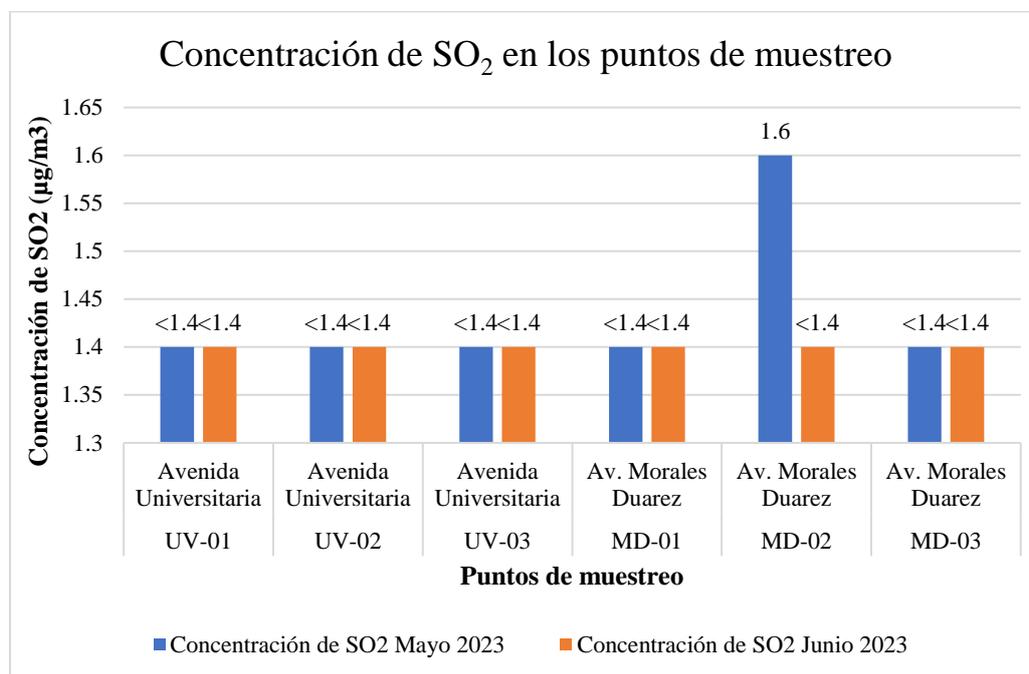
Concentración de NO₂ en los puntos de muestreo



4.2.1.2. Resultados del análisis de laboratorio de SO₂ en las avenidas Universitaria y Morales Duárez. En la Figura 17, se puede visualizar los hallazgos de los niveles de SO₂ en las seis estaciones de muestreo en los meses de mayo y junio del año 2023. Para el mes de mayo, se aprecia que la estación de muestreo MD-02 obtuvo el mayor nivel de SO₂ con 1.6 µg/m³, por otro lado, los demás puntos de muestreo obtuvieron concentraciones de SO₂ por debajo del límite de detección.

Figura 17

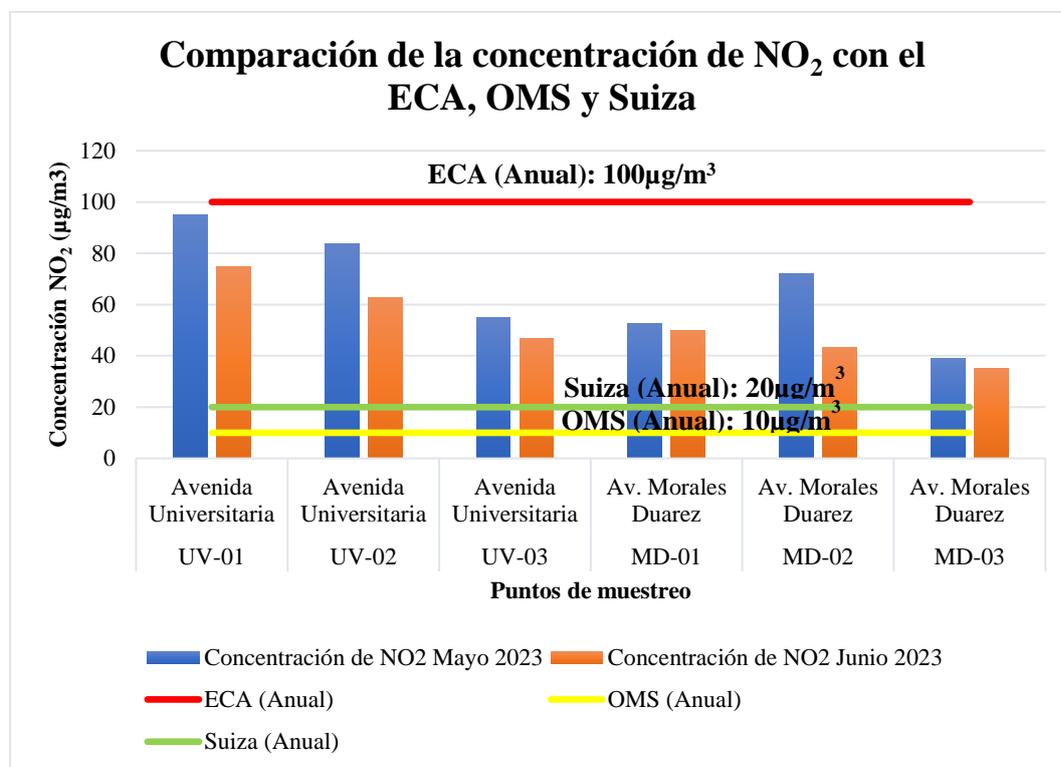
Concentración de SO₂ en los puntos de muestreo



4.2.1.3. Comparación de la concentración del NO₂ con estándares nacionales e internacionales. Se compararon las concentraciones de NO₂ obtenidos en los seis puntos de muestreo con el Estándar de la Calidad Ambiental del Aire (100 µg/m³), el Estándar Anual de la Organización Mundial de la Salud (10 µg/m³) y el Estándar de Suiza (20 µg/m³).

Figura 18

Comparación de la concentración de NO₂ en los puntos de muestreo con el ECA, OMS y Suiza

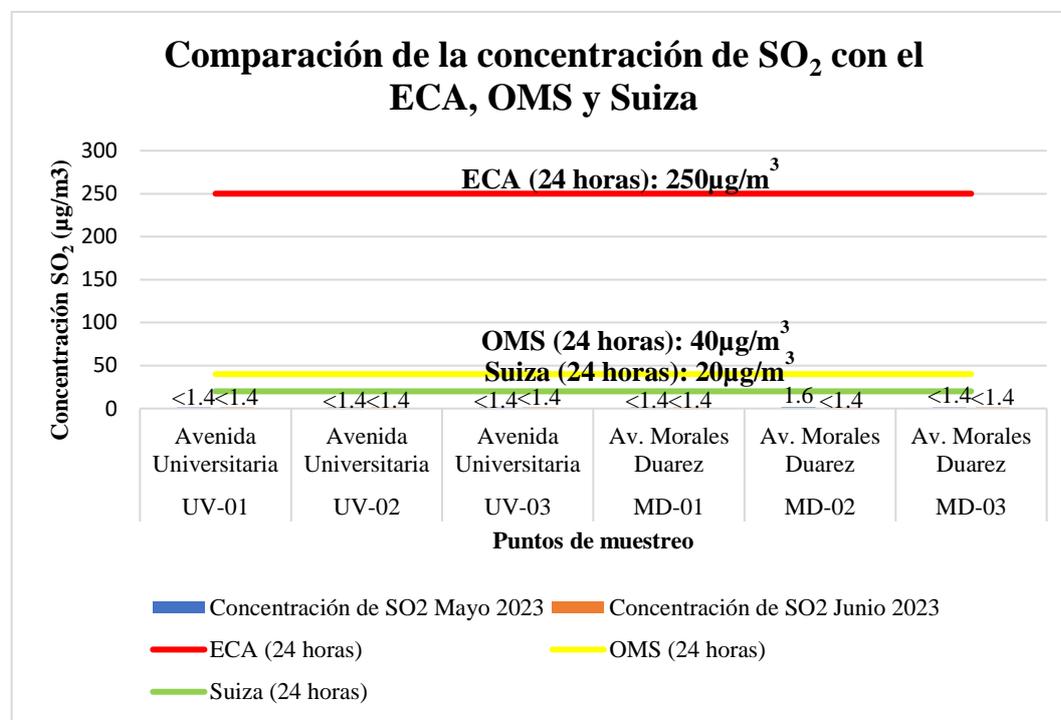


De acuerdo a lo que se puede apreciar en la Figura 18, se visualiza que ninguno de los puntos de muestreo superó el Estándar de Calidad Ambiental anual para NO₂. Un panorama distinto se presentó para el estándar anual de la OMS, donde todos los puntos de muestreo de la Avenida Universitaria y Avenida Morales Duárez, para los meses de mayo y junio del 2023, superaron su estándar anual. Por último, los puntos de muestreo de las avenidas Universitaria y Morales Duárez excedieron su valor en ambos meses con respecto al estándar anual de Suiza.

4.2.1.4. Comparación de la concentración del SO₂ con estándares nacionales e internacionales. Se compararon los niveles de SO₂ alcanzados en las estaciones de muestreo con el Estándar de la Calidad Ambiental del Aire que es de 250 µg/m³ para 24 horas, el Estándar de la Organización Mundial de la Salud para 24 horas que es de 40 µg/m³ y el Estándar de Suiza para 24 horas que es de 20 µg/m³.

Figura 19

Comparación de la concentración de SO₂ en los puntos de muestreo con el ECA, OMS y Suiza



De acuerdo a lo que se puede apreciar en la Figura 19, se visualiza que ninguno de los puntos de muestreo en las avenidas Universitaria y Morales Duárez en los meses de mayo y junio del año 2023 superó el Estándar de Calidad Ambiental del SO₂ para 24 horas, el Estándar de la Organización Mundial de la Salud de SO₂ para 24 horas y el Estándar de Suiza de SO₂ para 24 horas.

4.2.2. Análisis de velocidad y dirección del viento

4.2.2.1. Análisis con los datos de la Estación Meteorológica de SAN MARTIN DE PORRES.

En el transcurso del monitoreo de aire en la Avenida Universitaria y la Avenida Morales Duárez, se utilizaron las variables que caracterizan el comportamiento del viento, como la velocidad y dirección del viento, de la Estación Meteorológica SAN MARTIN DE PORRES en los meses de mayo y junio del 2023.

Distrito: San Martin de Porres **Latitud:** 12°0'32"S **Longitud:** 77°5'4.1"W **Altitud:** 56 msnm

4.2.2.2. Rosa de vientos generado con los datos de la estación meteorológica automática San Martín de Porres

Figura 20

Rosa de Vientos generado de la estación meteorológica San Martín de Porres de mayo a junio del 2023

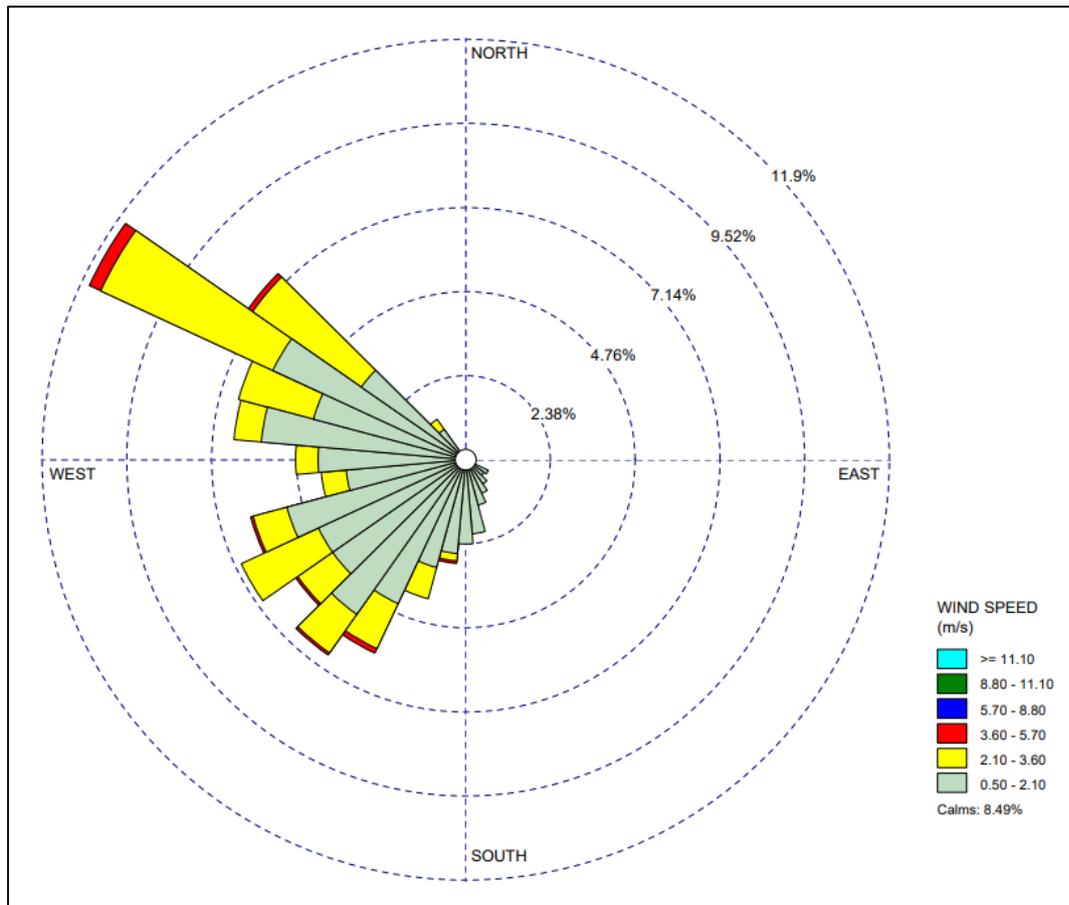
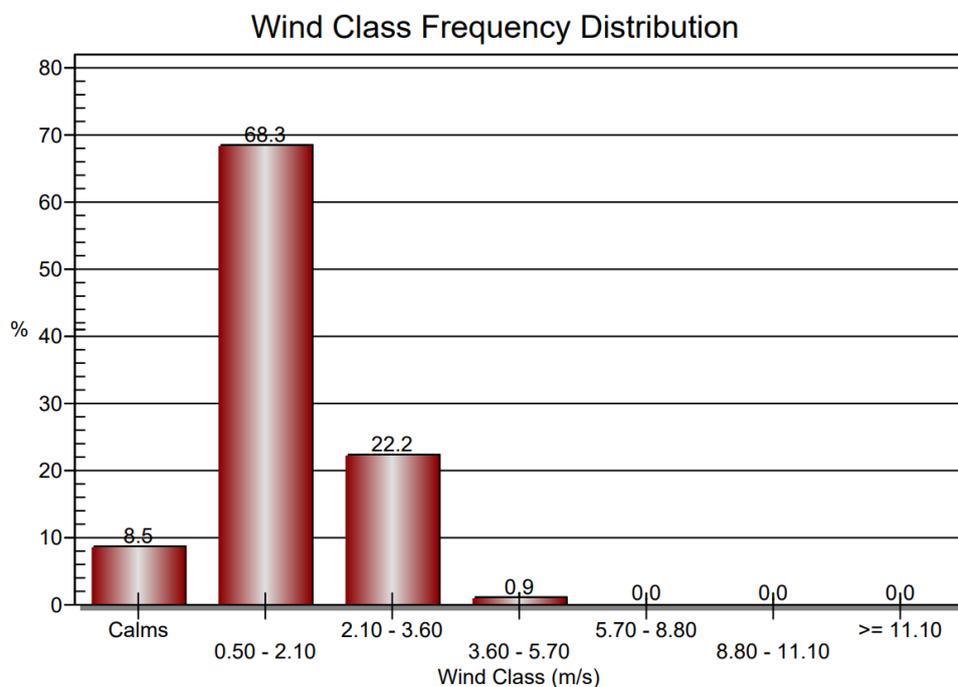


Figura 21

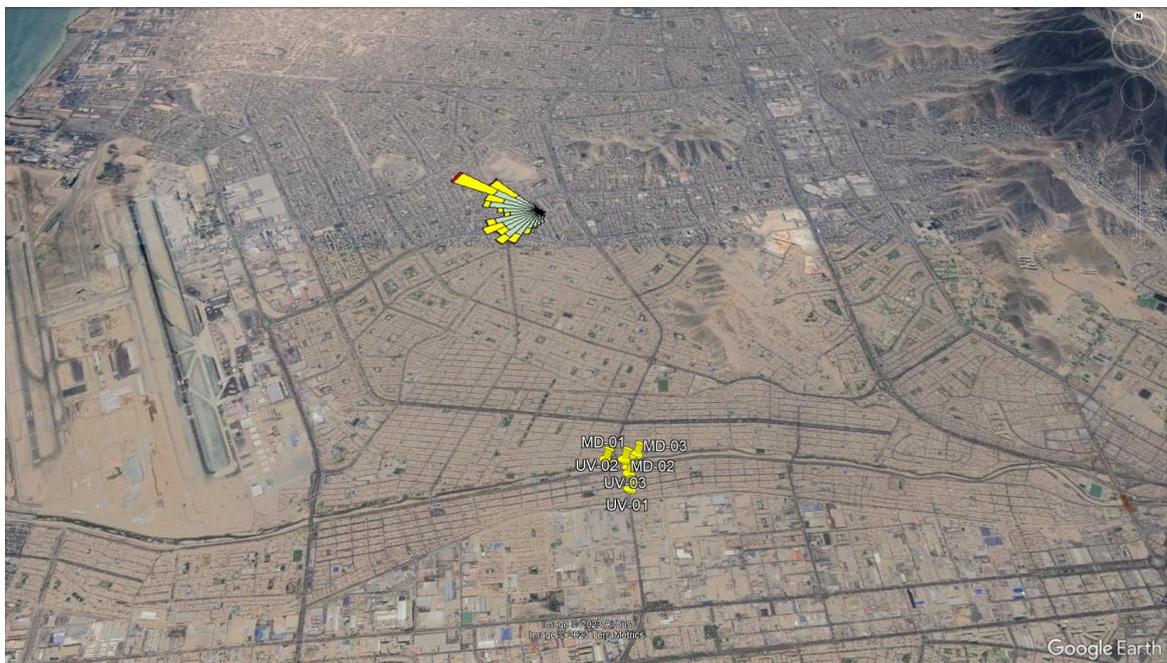
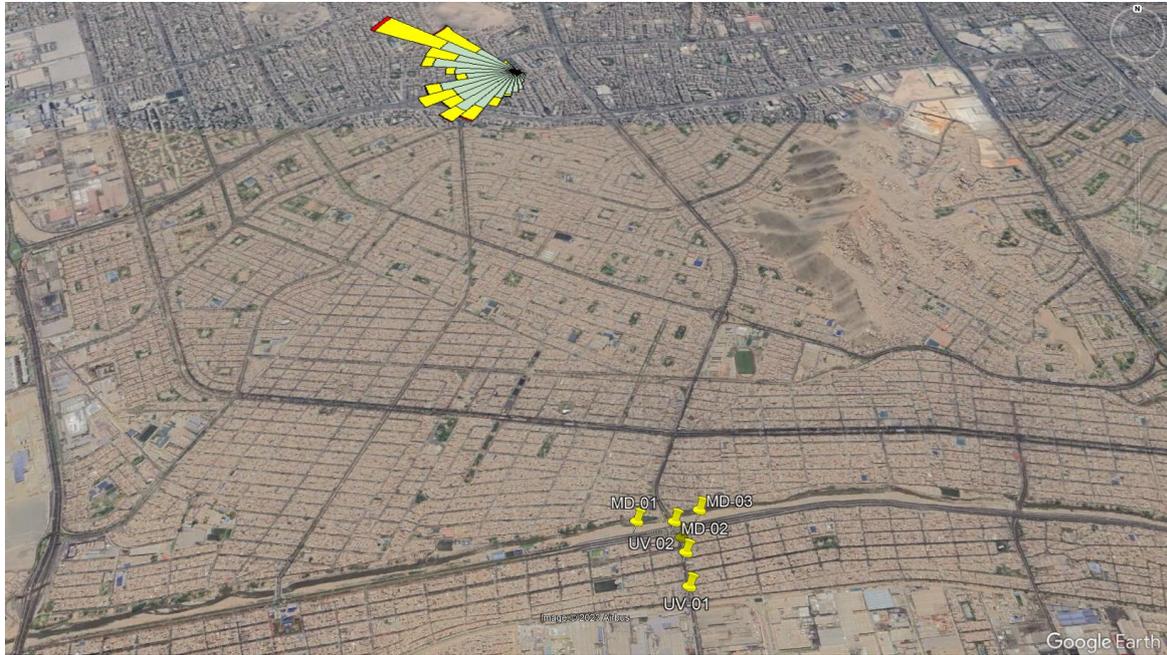
Distribución de frecuencias de la clase de viento en la estación meteorológica San Martín de Porres



En la Figura 21, se visualiza la distribución de frecuencias de la clase de viento que se registraron en mayo y junio, los vientos de tipo ventolina representaron un 68.3%, al registrarse una velocidad de 0.50 m/s a 2.10 m/s; por otro lado, los vientos de tipo suave y leve representaron un 22.2%, ya que oscilaban con una velocidad de 2.10 m/s a 3.6 m/s y por último, los vientos de tipo leve y moderado representaron un 0.9%, al registrarse una velocidad de 3.6 m/s a 5.7 m/s. Estos vientos provinieron desde el Noroeste y Suroeste dirigiéndose hacia el Noreste.

Figura 22

*Rosa de Vientos de la estación meteorológica de la estación San Martín de Porres
superpuesta en Google Earth*



4.2.3. Modelación de dispersión de contaminantes de NO₂ en las avenidas Universitaria y Morales Duárez

Se realizó la modelación de dispersión de contaminantes de dióxido de nitrógeno para el período de 1 hora y Anual en el programa AERMOD. No se realizó la modelación de dispersión del dióxido de azufre debido a que las concentraciones halladas no alcanzaron el umbral de detección.

Los mapas de isoconcentraciones de dióxido de nitrógeno para los períodos mencionados pueden visualizarse en el Anexo J y Anexo K.

4.3. Relación entre el flujo vehicular y la concentración de NO₂ y SO₂ en las avenidas Universitaria y Morales Duárez

4.3.1. Preparación de la muestra para análisis de significancia y relación

Para poder analizar y validar las hipótesis de esta investigación, se analizó la información base de flujo vehicular descriptivo en las avenidas Universitaria y Morales Duárez versus concentraciones de NO₂ y SO₂ determinadas en las mismas según posición específica.

Por lo que se completó un rango de 17 datos debido a que la data es insuficiente se completó teniendo en cuenta los umbrales máximos y mínimos de los datos y los promedios como base de completar los datos faltantes.

4.3.2. Análisis Estadístico Descriptivo Comparativo

Se estableció una tabla de datos completados según la siguiente forma, en base a lo obtenido en campo:

Tabla 13

Agrupación de datos para análisis de relaciones estadísticas entre las variables estadísticas en la investigación

ID	NO ₂ (mes de junio)	NO ₂ (mes de mayo)	Flujo vehicular (mes de mayo)	Flujo vehicular (mes de junio)	Avenidas monitoreadas

1	45.83	94.80	2065.96	2206.64	
2	51.00	83.60	2112.28	2307.27	
3	45.83	55.00	2012.50	2356.99	Muestra
4	52.07	38.00	2053.12	2259.53	relacionada
5	39.60	58.80	2071.03	2283.00	correspondiente
6	52.07	77.80	2066.01	2366.82	a la avenida
7	45.83	58.80	1904.39	2268.71	Universitaria
8	51.00	39.80	2007.75	2333.20	
9	52.07	77.80	2181.20	2226.71	
10	45.83	58.80	1415.18	1615.55	
11	39.60	38.00	1667.14	1543.64	Muestra
12	52.07	58.80	1383.33	1557.87	relacionada
13	45.83	39.80	1498.04	1608.74	correspondiente
14	39.60	38.00	1183.00	1687.59	a la avenida
15	52.07	77.80	1173.37	1716.8	Morales
16	45.83	38.00	1300.55	1699.95	Duárez
17	39.60	77.80	1208.22	1420.26	

Nota. Se agrupan las variables resultantes Flujo Vehicular Av. Universitaria, Av. Morales Duárez y Concentraciones de NO₂ y SO₂ determinadas en las zonas en mención siendo la concentración SO₂ no significativa para el análisis estadístico planteado por sus concentraciones demasiado bajas para estimar implicancias entre las variables, elaborado por propia autoría.

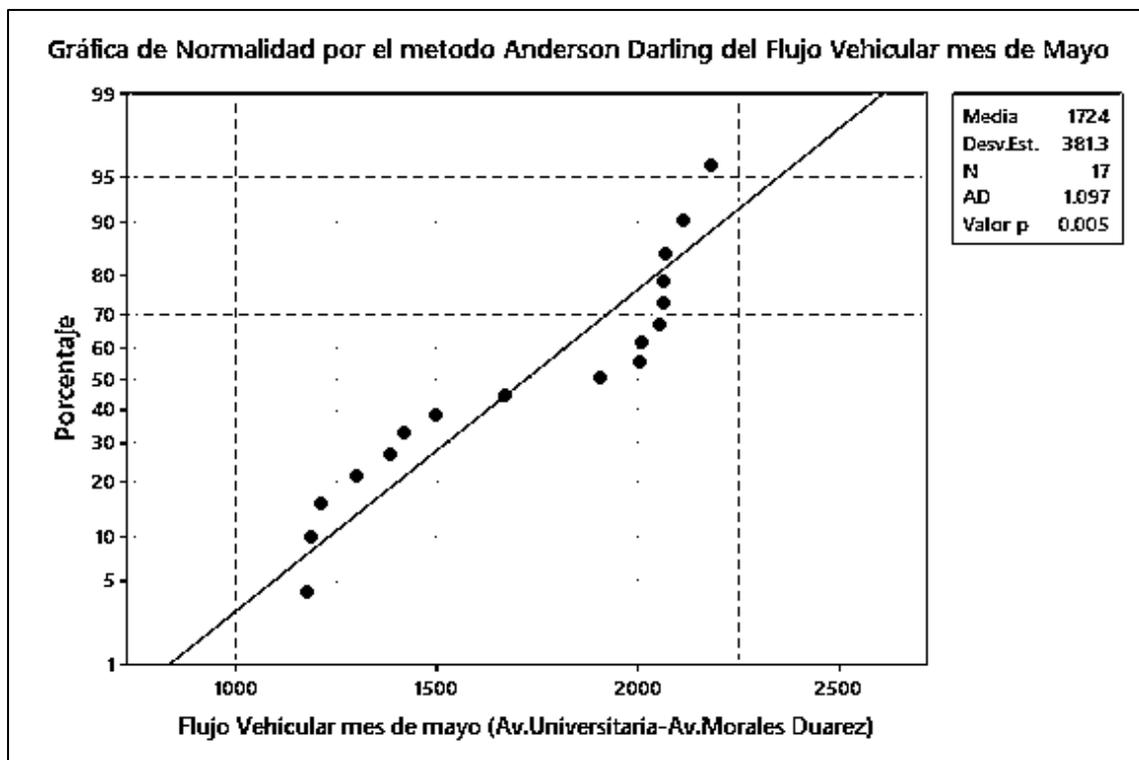
4.3.3. Análisis Estadístico Inferencial

Después de ordenar los datos adecuadamente se plantea analizar los datos para buscar relaciones entre las premisas planteadas en la hipótesis de investigación, para ello se procede realizando los siguientes análisis:

4.3.3.1. Prueba de Normalidad. Se realiza la prueba de normalidad en base a la prueba de Anderson Darling (AD) a los datos tabulados obteniendo los siguientes resultados:

Figura 23

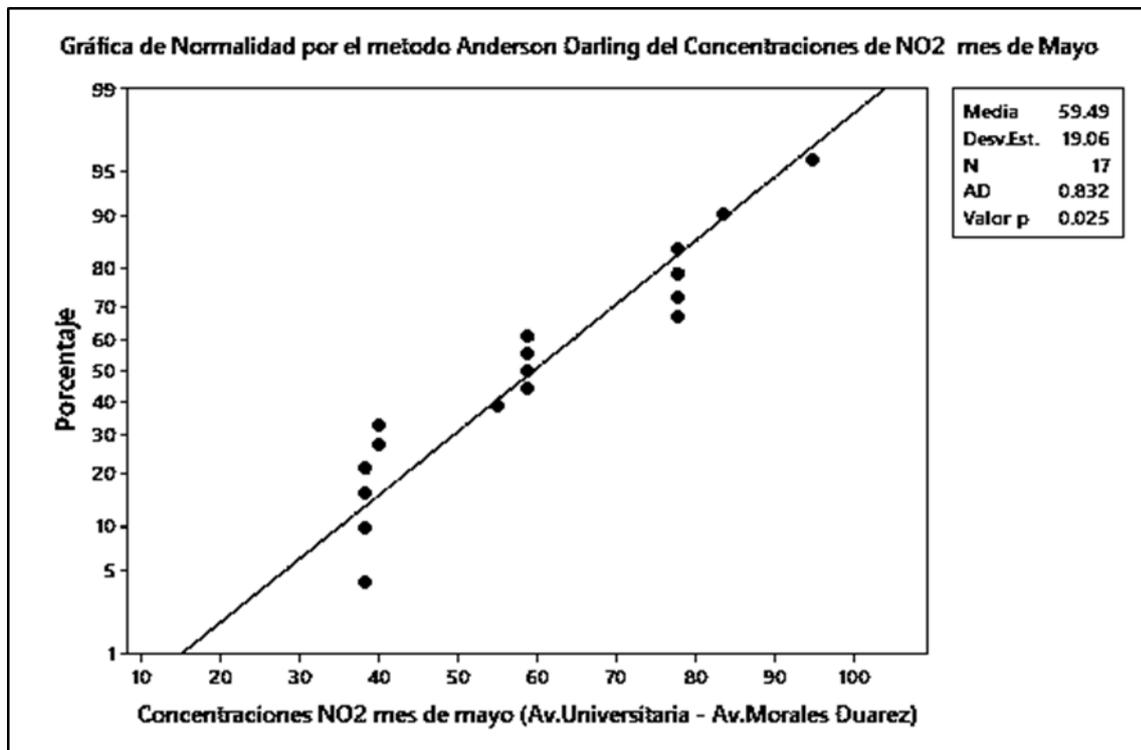
Prueba de Normalidad 1



Nota. Del análisis aplicando la prueba de Anderson Darling a la variable en cuestión, se tiene que presentar un indicador $AD = 1.097$ y un Valor $p = 0.005$, el cual es menor al Valor p de la investigación (0.05) por lo que los datos de la variable no presentan una distribución normal, elaborado en MINITAB versión 19.

Figura 24

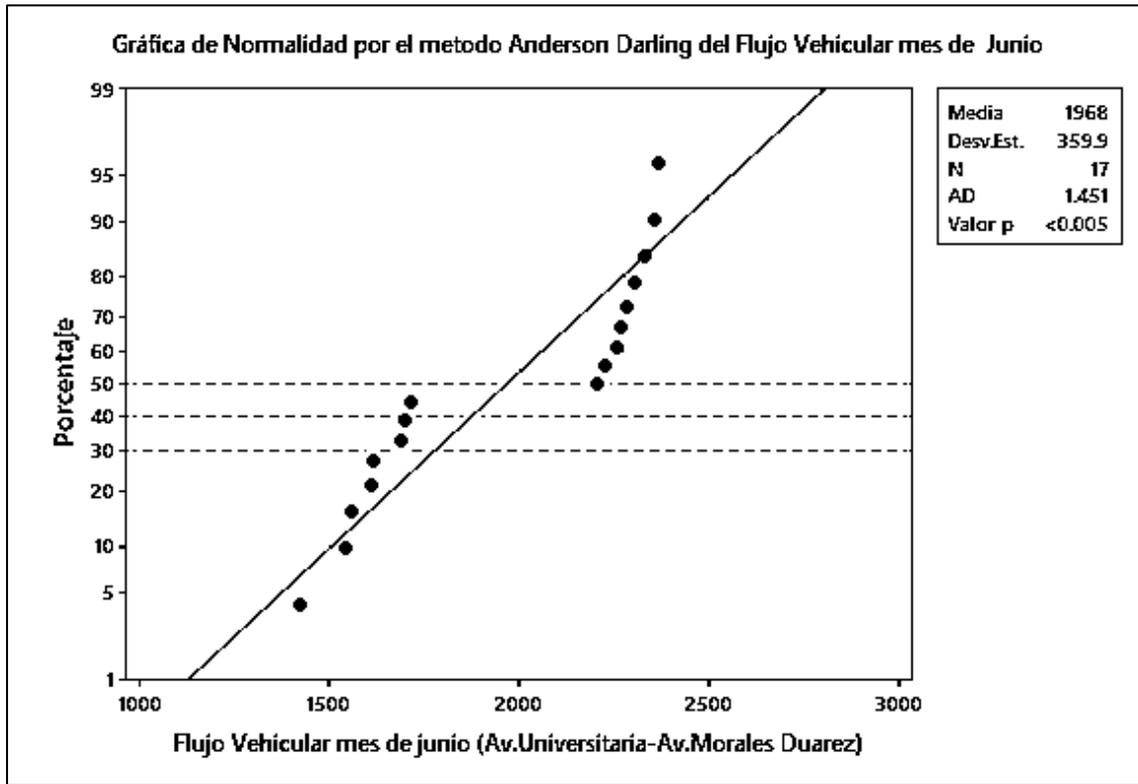
Prueba de Normalidad 2



Nota. Del análisis aplicando la prueba de Anderson Darling a la variable en cuestión, se tiene que presentar un indicador $AD = 0.832$ y un Valor $p = 0.025$, el cual es menor al Valor p de la investigación (0.05) por lo que los datos de la variable no presentan una distribución normal, elaborado en MINITAB versión 19.

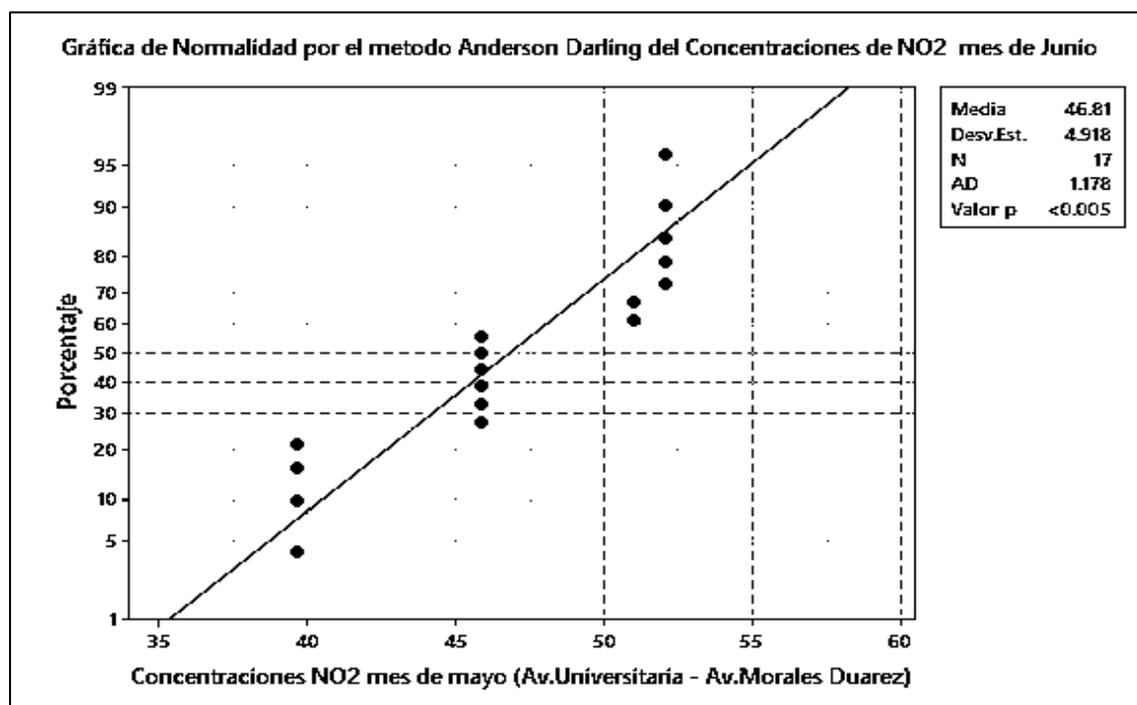
Figura 25

Prueba de Normalidad 3



Nota. Del análisis aplicando la prueba de Anderson Darling a la variable en cuestión, se tiene que presentar un indicador $AD = 1.451$ y un Valor $p < 0.005$, el cual es menor al Valor p de la investigación (0.05) por lo que los datos de la variable no presentan una distribución normal, elaborado en MINITAB versión 19.

Figura 26

Prueba de Normalidad 4

Nota. Del análisis aplicando la prueba de Anderson Darling a la variable en cuestión, se tiene que presentar un indicador $AD = 1.178$ y un Valor $p < 0.005$, el cual es menor al Valor p de la investigación (0.05) por lo que los datos de la variable no presentan una distribución normal, elaborado en MINITAB versión 19.

De lo que se deduce que la prueba hipótesis aplicable es una prueba hipótesis de datos no paramétricos.

4.3.4. Prueba Hipótesis Mann – Whitney

La prueba hipótesis Mann-Whitney es una técnica estadística que se suele utilizar cuando una serie de datos a relacionar no cumplen con ciertos requisitos para su evaluación mediante pruebas paramétricas, es decir en este caso el flujo vehicular de dos avenidas analizadas versus las concentraciones de gases contaminantes (NO_2 y SO_2), por la naturaleza de los datos y el comportamiento de los mismos, ya que se tuvo que hacer un análisis de consistencia para completar las series faltantes y desestimación de la serie concentraciones de

SO₂ por no tener consistencia para relacionarse, por ello se estimó conveniente hacer el análisis comparativos flujo vehicular versus concentración de NO₂ utilizando la mencionada prueba para verificar la verosimilitud de las hipótesis.

Para ello se aplica la metodología siguiente:

4.3.3.1. Mes mayo. Para la relación Concentración de NO₂ del mes de mayo versus Flujo vehicular del mes de mayo:

A. Método

η_1 : mediana de Concentración de NO₂ mes de mayo

η_2 : mediana de Flujo Vehicular mes de mayo

Diferencia: $\eta_1 - \eta_2$

B. Estadística descriptiva

Tabla 14

Análisis estadístico descriptivo de las variables Concentración de NO₂ del mes de mayo versus Flujo Vehicular del mes de mayo

Muestra	N	Mediana
Concentración de NO ₂ mes de mayo	17	58.80
Flujo Vehicular mes de mayo	17	1904.39

Nota. Se agrupo con una serie completada de diecisiete datos los cuales se completaron con los promedios y con el rango determinado de la muestra original según la tendencia de los datos.

Elaborado en MINITAB versión 19.

C. Estimación de la diferencia

Tabla 15

Análisis de la estimación de las diferencias entre las variables concentración de NO₂ del mes de mayo versus flujo vehicular del mes de mayo

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-1845.59	(-1988.16; -1345.33)	95.04%

Nota. Se analiza la diferencias y rangos entre las variables en mención para verificar la verosimilitud de las hipótesis aplicadas. Elaborado en MINITAB versión 19.

C. Prueba hipótesis Mann - Whitney

Tabla 16

Prueba de hipótesis Mann – Whitney del mes de mayo

Hipótesis nula	H ₀ : El impacto del flujo vehicular en la calidad del aire por NO ₂ y SO ₂ no es muy alto en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023 (mes de mayo).
Hipótesis alterna	H ₁ : El impacto del flujo vehicular en la calidad del aire por NO ₂ y SO ₂ es muy alto en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023 (mes de mayo).

Tabla 17*Resultado de aplicación de la prueba hipótesis Mann - Whitney*

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	153.00	0.000
Ajustado para empates	153.00	0.000

Nota. Se realizó la prueba hipótesis de Mann-Whitney para datos agrupados no paramétricos, la cual arroja un valor $p = 0.000$, lo que indica el rechazo de la hipótesis nula planteada y la aceptación de la hipótesis alterna por lo que se puede afirmar que: El impacto del flujo vehicular en la calidad del aire por NO_2 y SO_2 es muy alto en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023, esto para lo determinado y monitoreado el mes de mayo. Elaborado en MINITAB versión 19.

4.3.3.1. Mes junio. Para la relación Concentración de NO_2 del mes de junio versus Flujo vehicular del mes de junio:

A. Método

η_1 : mediana de Concentración de NO_2 mes de mayo

η_2 : mediana de Flujo Vehicular mes de mayo

Diferencia: $\eta_1 - \eta_2$

B. Estadística descriptiva

Tabla 18

Análisis estadístico descriptivo de las variables Concentración de NO₂ del mes de junio versus Flujo Vehicular del mes de junio

Muestra	N	Mediana
Concentración de NO ₂ mes de junio	17	45.83
Flujo Vehicular mes de junio	17	2206.64

Nota. Se agrupó con una serie completada de diecisiete datos los cuales se completaron con los promedios y con el rango determinado de la muestra original según la tendencia de los datos. Elaborado en MINITAB versión 19.

C. Estimación de la diferencia:

Tabla 19

Análisis de estimación de las diferencias entre las variables Concentración de NO₂ versus flujo vehicular del mes de junio

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-2160.81	(-2229.11; -1635.52)	95.04%

Nota. Se analiza la diferencias y rangos entre las variables en mención para verificar la verosimilitud de las hipótesis aplicadas. Elaborado en MINITAB versión 19.

B. Prueba hipótesis Mann - Whitney

Tabla 20

Prueba de hipótesis Mann - Whitney del mes de junio

Hipótesis nula	H ₀ : El impacto del flujo vehicular en la calidad del aire por NO ₂ y SO ₂ no es muy alto en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023 (mes de junio).
Hipótesis alterna	H ₁ : El impacto del flujo vehicular en la calidad del aire por NO ₂ y SO ₂ es muy alto en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023 (mes de junio).

Tabla 21

Resultados de aplicación de la prueba hipótesis Mann-Whitney

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	153.00	0.000
Ajustado para empates	153.00	0.000

Nota. Se realizó la prueba hipótesis de Mann-Whitney para datos agrupados no paramétricos la cual arroja un valor $p = 0.000$, lo que indica el rechazo de la hipótesis nula planteada y la aceptación de la hipótesis alterna por lo que se puede afirmar que: El impacto del flujo vehicular en la calidad del aire por NO₂ y SO₂ es muy alto en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023, esto para lo determinado y monitoreado el mes de junio. Elaborado en MINITAB versión 19.

4.3.5. Contratación de Hipótesis de Investigación

Se afirma que con un Valor $W = 153.00$ y un valor $p = 0.000$, que el impacto del tránsito vehicular en la calidad del aire por NO_2 y SO_2 es muy alto en las avenidas Morales Duárez y Universitaria ubicadas en el Cercado de Lima, 2023. Con esto se trata de afirmar estadísticamente que, si existe mayor flujo vehicular, el impacto sobre la calidad del aire en materia de NO_2 y SO_2 será considerable; respecto a las concentraciones de SO_2 estadísticamente son insuficientes para analizarlas estadísticamente, pero presentan una relación directa en el aire con el NO_2 por eso se le incluye en el análisis.

4.4. Propuesta de estrategias orientadas a la reducción del flujo vehicular y mejoramiento de la calidad del aire en las avenidas Universitaria y Av. Morales Duárez

De acuerdo a los resultados alcanzados del tránsito vehicular en las avenidas Universitaria y Morales Duárez, y de las concentraciones obtenidas en las avenidas mencionadas, se creyó conveniente sugerir medidas orientadas a reducir la afluencia el flujo vehicular, teniendo como consecuencia el mejoramiento de la calidad del aire en nuestra área de estudio.

4.4.1. Plan Integrado de Movilidad Sostenible del distrito de Cercado de Lima

La Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao (ATU), como autoridad adscrita al Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, tiene las funciones de planificar, organizar, gestionar la movilidad pública urbana de Lima y Callao. Asimismo, junto a este órgano, se encuentra con el apoyo de la Gerencia de Movilidad Urbana de la Municipalidad Metropolitana de Lima, que, a su vez, posee las funciones de evaluar, ejecutar, supervisar la regulación de la movilidad urbana y fiscalizar el transporte de carga, carga en vehículos menores, servicio especial de pasajeros y tránsito.

En este presente estudio como medida se sugiere el diseño e implementación de un Plan Integrado de Movilidad Sostenible del distrito de Lima, el cual estaría a cargo del ATU, al ser

el principal responsable del transporte público urbano y con el soporte de la Municipalidad Metropolitana de Lima dentro del marco de sus funciones.

El objetivo de Plan sería promover el uso del transporte público urbano en el distrito, mejorando las condiciones del servicio y desincentivando al público usuario el uso de autos particulares. Este Plan estaría orientado a las siguientes temáticas: Movilidad a pie, Ciclistas, Transporte Público, Transporte de Carga Pesada y Automóviles particulares.

Las acciones para la formulación del Plan serían:

- Recopilación de la información base, consistiría en que se realicen encuestas al usuario, donde se le consulte sobre los medios de transporte que usan de manera habitual para llegar a su trabajo. Esta herramienta permitiría al órgano recabar información sobre el punto de partida y destino del usuario y la distancia que toma su recorrido por el medio de transporte.
- Estrategias de gestión, en este capítulo se plantearían las estrategias de gestión dirigidas para el Peatón, Ciclistas, Transporte Público, Transporte de Carga Pesada y Automóviles particulares.
- Costos y financiamiento, en base a las estrategias propuestas en el capítulo anterior, se evaluarían los costos y las opciones de financiamiento por parte de alianzas con empresas privadas u órganos no gubernamentales (ONG).
- Implementación y Seguimiento de proyecto, se implementaría el proyecto y se haría un seguimiento continuo anual de la eficacia las estrategias.

De acuerdo a lo mencionado, en el presente estudio, se sugiere que se consideren las siguientes estrategias para conseguir la promoción de una movilidad sostenible en el distrito según la Pirámide Invertida del Transporte:

4.4.1.1. Movilidad a Pie. Las siguientes estrategias propuestas para el beneficio de los peatones estarían a cargo de la Municipalidad Metropolitana de Lima:

A. Mejora de la infraestructura peatonal. Delimitar las zonas de mayor tránsito peatonal nos permitiría localizar los puntos que son más concurridos por los peatones y tener esas áreas elegidas, como proyecto piloto de mejora de la infraestructura peatonal. Esta mejora puede consistir en ampliaciones de veredas dándole prioridad al peatón, mejoras en el pavimento y mobiliario público del centro histórico.

B. Implementación de señaléticas de información. Implementar carteles colocados de manera estratégica en las calles de la ciudad, que nos indique el tiempo de llegada y la distancia a los principales puntos del centro como la estación del metro más cercana, centro de salud más cercano, atractivo turístico, entre otros. Esta medida sería contemplada por la municipalidad, con el propósito de beneficiar al público que se moviliza a pie, y brindarle una mejor facilidad de localizarse a tiempo real, sin que tenga que moverse innecesariamente.

4.4.1.2. Ciclistas. Las siguientes estrategias propuestas para el beneficio de los ciclistas estarían a cargo de la Municipalidad Metropolitana de Lima:

A. Mejoramiento de infraestructura de ciclovías. Esta estrategia se basaría en mejorar las ciclovías antiguas que se encuentran en el distrito. Las mejoras podrían comenzar en las ciclovías donde su ancho no sea suficiente para que se transporten los ciclistas, en las ciclovías donde existan un alto tránsito de ciclistas y ciclovías que tengan conectividad con avenidas principales.

Posteriormente, la creación de un sistema de interconexión de ciclovías en el distrito, adicionando calles que puedan conectarse a esta red, fomentaría a que el público usuario tenga la predisposición de usar esta movilidad. Este sistema de interconexión se crearía en base a la información recopilada por medio de encuestas realizadas al público sobre sus viajes más frecuentes.

B. Estacionamiento público de bicicletas. La creación de estacionamientos públicos para bicicletas en puntos estratégicos del distrito permitirá a las personas guardar sus bicicletas

cuando tienen la necesidad de trasladarse a distancias cortas o grandes. La construcción de esta infraestructura es imprescindible para integrar este tipo de movilidad sostenible con el transporte público.

Se podría comenzar instalando estos estacionamientos públicos en las estaciones del Metropolitano, Tren Eléctrico o Metro. Posteriormente podría expandirse en colegios, universidad, hospitales, entre otros; teniendo en cuenta zonas de alto congestionamiento vehicular. Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario que estos estacionamientos cuenten con un horario de atención y un registro de los ciclistas que guardan su bicicleta en base a su número de DNI.

Es decisión de la Municipalidad si considera que estos estacionamientos cuenten con personal de vigilancia, sea de acceso libre o de pago y si estarán sobre una zona al aire libre o una zona cubierta.

C. Estaciones de reparación de bicicletas. De igual manera, como se promueve el uso de las bicicletas, es imprescindible la instalación de estaciones de reparación de este tipo de movilidad en los estacionamientos públicos de bicicletas. Este servicio público permitirá al usuario realizar la reparación básica, mantenimiento y limpieza de su bicicleta, en caso se encuentre en una emergencia.

Se presentará de forma gratuita al público, abierto al público que decida desplazarse por el distrito con bicicletas.

D. Sistema de bicicletas públicas compartidas. El establecimiento de un sistema de bicicletas públicas que estén disponibles para el usuario, les permitirá desplazarse de un lugar a otro.

La Municipalidad Metropolitana de Lima podría disponer de una aplicación, donde el usuario que solicite una bicicleta pública, se registre colocando sus datos completos, número

de DNI, número de teléfono, entre otros datos. Posteriormente, se elegiría el plan de pago de la aplicación, a elección del usuario, que puede ser de 1 hora, diario, semanal, mensual o anual.

Cuando el usuario, desee disponer de una bicicleta, deberá escanear el QR de la bicicleta y quitar la traba de la bicicleta para poder usarla. Finalmente, cuando esté próximo a su destino, dejarla en la estación más cercana.

Con la finalidad de evitar el robo de la bicicleta, esta contaría con un seguimiento de GPS.

4.4.1.3. Sistema de Transporte Público. La Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao (ATU), tendría la responsabilidad de implementar las siguientes estrategias sugeridas por el presente estudio, para promover un sistema de transporte público sostenible y eficiente:

A. Promover la adquisición de vehículos de transporte público Euro V o VI. Primero, se sugiere que el ATU revise los contratos de prestación de servicio de transporte público e incluir en su marco normativo de adjudicación de contratos que las licitaciones con las empresas de transporte cuenten con tecnología Euro V o VI o buses eléctricos de batería. El que se decida que los buses de transporte público adopten una tecnología Euro VI a gas natural, puede contemplar un modelo más económico incluyendo los costos sociales por contaminación, ya que lograría reducciones importantes en las emisiones de NO_x, reducción el CO₂ y mejora de la economía del combustible.

Adicionalmente, se sugiere que de tener licitaciones con empresas que adopten este tipo de tecnología, se pueda considerar extender las duraciones de los contratos con renovación automática para aumentar la confianza de la empresa.

B. Adopción de tecnologías de reducción de emisiones de gases y partículas. Una alternativa ecológica puede ser la implementación de soluciones tecnológicas para la disminución de emisiones de gases y partículas en los buses de transporte público, utilizando

los Filtro DPF o Filtro de Partículas de Diésel, que, según estudios nacionales, es el combustible más usado en el país. Esta tecnología permitiría reducir el número de partículas nocivas que salen de los sistemas de gases de escape.

C. Aplicación para Planificación de Viaje. La creación de una aplicación para planificar el viaje, cuyo servicio se encuentre disponible las 24 horas del día, podrá permitir a los usuarios conocer la llegada del transporte público a una parada de autobús determinada. En la aplicación se puede consultar cómo se puede movilizar desde un punto a otro, el detalle del viaje, la línea de autobús más recomendable para moverse, la ubicación de la parada inicial del autobús y la ubicación de la parada final del autobús que es la más cercana a su destino. Este servicio permitirá a los usuarios, mayores facilidades para acceder al transporte público y buscará bajar la demanda del transporte particular.

4.4.1.4. Transporte de Carga Pesada. Las siguientes estrategias propuestas para el transporte de carga pesada estarían a cargo de la Municipalidad Metropolitana de Lima:

A. Implementación de nuevas medidas regulatorias. Se recomienda la aplicación de medidas regulatorias para el transporte de carga pesada por ser de bajo costo de implementación, donde se requerirá, sin embargo, una fiscalización constante. Estas medidas deben permitir la optimización del desplazamiento del transporte de carga pesada y las operaciones de carga y descarga en zonas urbanas. Para ello, es necesario que el personal de la municipalidad revise lo que indica las operaciones de carga y descarga en las ordenanzas municipales y comparar con lo que ocurre en las calles del distrito.

B. Creación de red de tránsito pesado. Esta medida sería posible mediante la creación de una ordenanza por la municipalidad que presente las redes de avenidas y calles por las cuales pueden circular vehículos con un peso total bruto mínimo requerido según a consideración del municipio. Esto permitiría que estas avenidas o calles sean utilizadas exclusivamente por este transporte de carga pesada y reducir los niveles de tráfico en otras zonas.

4.4.1.5. Automóviles Particulares. Las siguientes estrategias propuestas para el transporte de carga pesada estarían a cargo de la Municipalidad Metropolitana de Lima:

A. Estacionamientos inteligentes. Esta herramienta sería similar al uso de estacionamiento público de bicicletas, permitiría regular el estacionamiento en las zonas donde existe una alta demanda de vehículos particulares. Primeramente, se optaría por la creación de estos estacionamientos en el municipio que comprende Cercado de Lima, y estaría disponible en una aplicación móvil para su uso. El usuario podría registrarse a través de su celular, colocando sus datos personales, número de DNI, dirección, placa vehicular, entre otros; de igual forma asociaría su cuenta a su tarjeta donde se cargará el importe después de finalizar el estacionamiento.

Para iniciar el estacionamiento, se abriría la aplicación, se indicaría la matrícula del carro, el área donde se desea estacionar y el tiempo que permanecerá el carro en el estacionamiento. En caso de que el tiempo fin del estacionamiento este cerca de cumplirse, se mandaría una alarma al celular para prolongar la estadía del vehículo, en caso el usuario desee que su carro permanezca allí.

Las zonas delimitadas para estos estacionamientos serían continuamente supervisadas por un personal de la Municipalidad, para verificar que el auto se encuentre registrado y haya activado su estacionamiento en la aplicación en base a su número de placa de automóvil.

Se sugiere que la aplicación presente al usuario los lugares libres para estacionar en la pantalla del celular, antes de iniciar el estacionamiento. Con el objetivo de que se mejore el ordenamiento del tránsito y le facilite al conductor la búsqueda de una plaza libre. Esta alternativa permitiría reducir la emanación de gases contaminantes que suelen emitir los vehículos durante el tiempo que tarda el conductor en encontrar un espacio para estacionar y permitiría reducir el número de vehículos que estacionan en áreas no permitidas.

B. Restricción de ingreso de autos particulares en zona céntrica de Lima. Como medida para desincentivar el uso de vehículos particulares, la Municipalidad Metropolitana de Lima delimitaría las zonas en el centro de Lima, en las cuales no permitiría el ingreso de este tipo de movilidad. Para las viviendas que cuentan con estacionamiento propio o restringido en la zona delimitada, realizarían un trámite para generar un pase y permitir la circulación de su vehículo en la zona. Este trámite se puede realizar de manera virtual en la página de la Municipalidad.

Esta estrategia busca descongestionar la zona céntrica de Lima, y dar el pase libre para que lo pueda usar el peatón, ciclistas y transporte público.

4.4.2. Programa Por un Aire Más Limpio

Este programa, que estaría a cargo de la Municipalidad Metropolitana de Lima, contaría con diversas medidas concretas para lograr un aire más limpio, y serviría como un complemento y apoyo al Plan Integrado de Movilidad Sostenible del distrito de Lima.

4.4.2.1. Campaña de medición de contaminantes en los tubos de escape de vehículos. Esta medida sería ejecutada de manera interdiaria, donde representantes del municipio realizarían mediciones de contaminantes en los tubos de escape de vehículos utilizando un sistema de sensor remoto para monitoreo y el control de emisiones. Para ello, en los puntos designados por la municipalidad, se instalaría una fuente y un detector de luz al costado o encima de una vía pública, con la finalidad de que el vehículo pase a través de ella y el detector de luz atravesase la pluma de gases de escape del vehículo. Este sistema nos ayudaría a darnos una concentración aproximada de gases como: dióxido de carbono, dióxido de nitrógeno, monóxido de carbono, hidrocarburos, monóxido de nitrógeno, dióxido de azufre y amoníaco.

4.4.2.2. Creación de aplicación móvil para reporte de vehículos con grandes emisiones de humos tóxicos. El desarrollo de una app móvil, gestionada por la Municipalidad

Metropolitana de Lima, el cual sirva como herramienta de apoyo para la identificación de vehículos que emiten grandes cantidades de gases tóxicos en sus tubos de escape en tiempo real. Esta aplicación implicará la colaboración de los ciudadanos, mediante el llenado de un formulario con la información básica del vehículo como la placa vehicular, descripción del vehículo; la dirección del avistamiento del automóvil que puede ser llenado por el mismo ciudadano o por la habilitación del GPS para el llenado automático y la fotografía o vídeo del suceso donde se muestre la placa del automóvil.

4.4.2.3. Campañas de Educación Vial en Colegios. Se sugiere la programación de charlas de Educación Vial en los colegios públicos y privados con el objetivo que, desde pequeños sepan conocer las señales de tránsito, normas y reglamentos que existen en el país, para prevenir accidentes de tránsito. De igual forma, en dichas charlas dadas por personal especializado de la Municipalidad se incentivaría a los futuros ciudadanos sobre el transporte sostenible y brindarles alternativas de desplazamientos que ofrecen las redes de tránsito del distrito, y fomentar el uso de bicicletas, movilidad escolar o transporte público.

4.4.2.4. Campañas de Ciclismo Urbano. La ejecución de campañas de ciclismo urbano dirigido al público general, donde se enseñe a manejar una bicicleta desde cero, el mantenimiento básico a este tipo de transporte y los implementos básicos que debe tener el usuario, permitiría que la población se sienta más confiada al elegir esta alternativa para desplazarse. Las campañas podrían realizarse en zonas estratégicas como: parques o plazas históricas, y se difundirían en sus redes sociales para un mayor alcance. Asimismo, el municipio podría buscar el apoyo de organizaciones de ciclistas, para la enseñanza de grupos más jóvenes como niños y universitarios.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El presente estudio se centró en evaluar el impacto de la afluencia vehicular en la calidad de aire por NO₂ y SO₂ en la avenida Universitaria y Morales Duárez, por lo cual se utilizó el método de conteo observacional para cuantificar los vehículos que transitan por las avenidas en mención y se utilizó dispositivos de muestreo pasivo para estimar la cantidad de cada contaminante presente en el aire. Los hallazgos obtenidos alcanzados en esta investigación, son contrastados con estudios de otros autores:

De acuerdo a Limas (2016), que presentó su tesis de investigación, realizó el conteo vehicular durante 3 días de manera interdiaria en los horarios de 9:00 a.m. a 10:00 a.m. y 4:00 p.m. a 5:00 p.m. en cada plaza histórica. En contraste con el presente estudio, que optó por realizar la cuantificación vehicular en la tercera semana del mes de mayo y junio, teniendo un período de observación de una semana para cada mes, donde de manera diaria se midió el flujo vehicular durante 12 horas seguidas.

Por otro lado, Limas (2016), al igual que esta investigadora, utilizó el método de difusión pasiva, las muestras fueron analizadas en el laboratorio PASSAM AG, usando el método de Saltzman SP01. Con respecto a los hallazgos de medición de la calidad del aire de la investigación de Limas (2016), se encontraron que concentraciones de NO₂ en la Plaza de Dos de Mayo (50.90 µg/m³), Plaza San Martín (33.35 µg/m³), Plaza Bolognesi (35.60 µg/m³), y Parque Universitario (36.80 µg/m³) no excedieron el Estándar de Calidad Ambiental del Aire (100 µg/m³). No obstante, las concentraciones promedio encontradas en este estudio, en la avenida Universitaria (en mayo, 77.8 µg/m³; en junio, 61.4 µg/m³) y Morales Duárez (en mayo, 54.5 µg/m³; en junio, 42.7 µg/m³), fueron superiores a las encontradas por Limas (2016) en las plazas históricas. Sin embargo, los niveles de SO₂ encontradas en la Plaza de Dos de Mayo (3.95 µg/m³), Plaza San Martín (3.80 µg/m³), Parque Universitario (3.60 µg/m³) y Plaza Bolognesi (2.95 µg/m³), no excedieron el Estándar de Calidad Ambiental del Aire (24 µg/m³);

por el contrario, en esta investigación los valores de SO₂ estuvieron por debajo del límite de detección del laboratorio ($< 1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Por último, Limas (2016) encontró una relación directa entre la cantidad de NO₂ presente en el aire y el tránsito vehicular, ya que la presencia del contaminante varía según el flujo vehicular; sin embargo, se determinó una relación indirecta entre la cantidad de SO₂ presente en el aire y el tránsito vehicular. En contraste, el presente estudio si pudo determinar una relación directa entre las variables del tránsito vehicular y los niveles de NO₂ y SO₂.

Según Esteban (2021), en su tesis de investigación presentada a la Universidad Nacional Federico Villarreal, realizó un conteo de vehículos en las avenidas Las Flores y Próceres de la Independencia y utilizó el método de muestreo pasivo para la medición de la calidad del aire donde se ubicaron dispositivos de muestreo pasivo en los postes de luz en las avenidas mencionadas. El presente estudio realizó una metodología similar al investigador, sin embargo, Esteban (2021), calculó el flujo vehicular en base a la intensidad horaria, velocidad de recorrido y volumen de tránsito. Con respecto a la determinación del grado de asociación entre las dimensiones de flujo vehicular y la calidad del aire, Esteban (2021) utilizó la prueba de correlación de Pearson, donde se confirmó que la afluencia vehicular incidía en la cantidad de NO₂ y SO₂ presente en el aire, aportándonos una conclusión similar a este presente estudio, a pesar que esta investigadora optó por usar la prueba estadística de Mann-Whitney.

De acuerdo a Flores (2023), quien realizó otro estudio parecido a la investigadora, tuvo como metodología estudiar el comportamiento vehicular y el análisis de la concentración de los contaminantes mediante la instalación de muestreadores pasivos en sus 5 estaciones de estudio: la avenida Paseo Colón-Garcilaso de la Vega, la avenida Nicolás de Piérola-Cañete, la avenida Argentina-Universitaria, la avenida Morales Duárez-Universitaria y la Avenida Tingo María-Zorritos. Con respecto a la evaluación del flujo vehicular, Flores (2023) realizó la medición tres días por semana (martes, jueves y sábado) del 25 de agosto del 2020 al 19 de

septiembre del 2020 de 7:00 a.m. a 9:00 a.m. y de 5:00 a 7:00 p.m., mientras que el presente estudio realizó la medición del 15 al 21 de mayo del 2023 y del 19 al 25 de junio del 2023 durante los horarios de 7:00 a.m. a 7:00 p.m. Por otro lado, la etapa de la medición de la calidad del aire en los 5 puntos de estudio fue de 28 días, mientras que, en este estudio, se realizó una medición de dos meses.

En los resultados del flujo vehicular, Flores (2023) encontró que la mayor afluencia vehicular promedio fue el de la avenida Paseo Colón-Garcilaso de la Vega que alcanzó 3332 vehículos/hora, asimismo el promedio del flujo vehicular encontrado en la avenida Morales Duárez-Universitaria fue de 3221 vehículos/hora; en contraste, de este estudio que halló que el promedio del flujo vehicular para la avenida Universitaria y Morales Duárez, fue de 2291 vehículos/hora y 1706 vehículos/hora. Esto se pudo deber a que Flores (2023), realizó la medición solo en horas punta, sin embargo, la presente investigación midió el flujo vehicular durante las 12 horas del día, tanto en días laborales como no laborales.

En los hallazgos de niveles de NO_2 presente en el aire, la investigadora encontró que la avenida Morales Duárez-Universitaria tenía la máxima concentración con $61.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por otro lado, en este estudio, se obtuvieron concentraciones de $77.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $61.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la avenida Universitaria para mayo y junio respectivamente y concentraciones de $54.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $42.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la avenida Morales Duárez para mayo y junio respectivamente. En los resultados de concentración de SO_2 , la investigadora encontró que la avenida Morales Duárez-Universitaria tenía la máxima concentración con $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, por otro lado, en el presente estudio, se obtuvieron niveles de $<1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 el aire por encontrarse debajo del límite de detección, asimismo en un punto de medición de la avenida Morales Duárez en el mes de mayo, se obtuvo un nivel de $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ de SO_2 el aire.

Flores (2023) en base a una comparación de gráficos, encontró que el dióxido de azufre y el dióxido de nitrógeno es independiente del volumen de vehículos que recorren las avenidas

en su área de estudio, sin embargo, el presente estudio si pudo encontrar una relación entre ambas variables por la prueba estadística de Mann-Whitney.

Según Cochas (2017), en su tesis de maestría, realizó el conteo vehicular en dos avenidas y una calle céntrica de la ciudad de Riobamba, en Ecuador, cuya selección del área de estudio, fue en base a las vías de alto tráfico vehicular. Por otro lado, para la medición de calidad del aire, la investigadora utilizó tres estaciones de monitoreo pasivo distribuidas en la ciudad cuyo período de muestreo fue desde el año 2008 hasta el 2016, exceptuando los años del 2011 al 2013. La investigadora, a diferencia del presente estudio, utilizó el software AirVision de la Red Metropolitana de Monitoreo Atmosférico de Quito para evaluar la distribución de la contaminación de SO_2 y NO_2 . Para la verificación de hipótesis de Cochas (2017), utilizó la prueba de contraste de media, donde determinó que los resultados de las concentraciones de los contaminantes de dióxido de nitrógeno y dióxido de azufre no influyen en la calidad del aire, teniendo una conclusión similar al estudio de Flores (2023).

VI. CONCLUSIONES

Las conclusiones que se presentan a continuación están en relación a los objetivos de esta investigación:

- a. Se evaluó el impacto del flujo vehicular en la calidad del aire por NO₂ y SO₂ en las avenidas Morales Duárez y Universitaria realizando la contrastación de hipótesis de la investigación planteada, concluyéndose que el impacto del flujo vehicular en la calidad del aire por NO₂ y SO₂ es muy alto en las avenidas mencionadas ubicadas en el Centro de Lima.
- b. Se cuantificó volumen de tránsito de vehículos en las avenidas Morales Duárez y Universitaria a través del conteo observacional realizado en las avenidas mencionadas, obteniéndose lo siguiente: En la avenida Universitaria se registró un flujo vehicular por hora de 2194 y 2388 vehículos en el mes de mayo y junio respectivamente; mientras que en la avenida Morales Duárez, se registró un flujo vehicular por hora de 1676 y 1737 vehículos en el mes de mayo y junio respectivamente. Por lo que se concluye que existe una mayor afluencia vehicular en la avenida Universitaria (cuadra 1 – 2) que en la avenida Morales Duárez (cuadra 27 – 30).
- c. Se determinó los niveles de NO₂ y SO₂ presentes en el aire por monitoreo pasivo durante los meses de mayo y junio, concluyéndose que: Los niveles de concentración de NO₂ en la avenida Universitaria, fueron de un valor promedio de 77.8 µg/m³ para el mes de mayo y 61.4 µg/m³ para el mes de junio; por otro lado, los niveles de concentración NO₂ en la avenida Morales Duarez, fueron de un valor promedio de 54.5 µg/m³ para el mes de mayo y 42.7 µg/m³ para el mes de junio. Con respecto a los niveles de concentración de SO₂ en la avenida Universitaria y avenida Morales Duarez, se registraron valores por debajo del límite de detección, a excepción de un punto de muestreo en el mes de mayo situado en la Av. Morales Duarez que obtuvo un valor de

1.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Esta información nos permite concluir que existe mayor concentración de NO_2 que presencia del contaminante SO_2 en el área de estudio.

- d. Se comprobó una relación directa entre las variables flujo vehicular y las concentraciones de NO_2 y SO_2 en la avenida Universitaria y avenida Morales Duarez mediante la prueba de hipótesis de Mann-Whitney para datos agrupados no paramétricos, la cual afirmó estadísticamente que, si existe mayor flujo vehicular, el impacto sobre la calidad del aire será considerable respecto a las concentraciones de NO_2 y SO_2 .
- e. Se propusieron las siguientes medidas para la reducción del flujo vehicular y la promoción de un aire más limpio : Implementación del Plan Integrado de Movilidad Sostenible del distrito de Lima, dirigido y ejecutado por la Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao (ATU), orientado en las temáticas Movilidad a Pie, Ciclistas, Transporte Público, Transporte de Carga Pesada y Automóviles Particulares; y la Implementación del Programa Por Un Aire Más Limpio, dirigido por la Municipalidad Metropolitana de Lima, que se enfocaría en actividades como: campañas de medición de gases en los tubos de escape de los vehículos, creación de aplicaciones para reportar vehículos que generen grandes emisiones y campañas de sensibilización sobre transporte sostenible a la población.

VII. RECOMENDACIONES

- a. Se recomienda que, en próximas investigaciones, se amplíe la medición de gases contaminantes y se involucre la determinación de los niveles de concentración de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarburos no quemados (HC) en las avenidas mediante otro tipo de método de muestreo.
- b. Realizar la medición de dióxido de azufre (SO₂) y dióxido de nitrógeno (NO₂) en el área de estudio en las estaciones de verano, otoño, invierno y primavera para evaluar si existe una variación para conocer el comportamiento de las variables de calidad del aire y flujo vehicular.
- c. Se recomienda continuar con nuevos estudios enfocados en evaluar el impacto del flujo vehicular en la calidad del aire en nuevas áreas de estudio a lo largo del distrito de Cercado de Lima, con el propósito de encontrar nuevas medidas concretas para lograr un aire más limpio en beneficio del ambiente y la salud humana.
- d. Se recomienda la introducción de la tecnología de Euro VI en el país para que permitan regularse límites aceptables para las emisiones de gases de combustión interna en los vehículos y nos podamos proyectar a tener un mejor sistema de control de emisiones en el transporte.
- e. Se recomienda utilizar otro método de monitoreo de calidad del aire para la medición de contaminantes (SO₂ y NO₂) en un período de medición diferente al elegido en el trabajo de investigación.

VIII. REFERENCIAS

- Asociación Automotriz del Perú [AAP] (2022). Informe del sector automotor febrero 2022.
<https://aap.org.pe/informes-estadisticos/febrero-2022/Informe-Febrero-2022.pdf>
- Ayala, K. y Beteta, V. (2016). Niveles de dióxido de nitrógeno generados por el flujo vehicular en la zona urbana de Tingo María. *Investigación y Amazonía*, 6(1), pp. 12-18.
<https://revistas.unas.edu.pe/index.php/revia/article/view/44>
- Cándido (04 de octubre de 2015). Emisiones de NO y NO₂ en motores diésel. Alma de Herrero.
<https://almadeherrero.blogspot.com/2015/10/emisiones-de-no-y-no2-en-motores-diesel.html>
- Castelli, L. (2011). Mitigación de la contaminación del aire por material particulado y gases de combustión de automotores en el Centro Comercial de Riobamba. [Tesis de posgrado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/bitstream/123456789/4232/1/20T00409.pdf>
- Cocha, L. (2017). Emisión de gases y su relación en la calidad del aire de la zona urbana de la ciudad de Riobamba. [Tesis de posgrado, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio Institucional Universidad Técnica de Ambato.
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/25806>
- Comisión Nacional del Medio Ambiente [CONAMA] (2009). Guía Metodológica para la Estimación de Emisiones Atmosféricas de Fuentes Fijas y Móviles en el Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes. Departamento de Control de la Contaminación de CONAMA.
<https://www.minsal.cl/portal/url/item/80bf098d59f67083e04001011e015e8d.pdf>

Constitución Política del Perú [Const] Art. 2, 29 de diciembre de 1993 (Perú).

<https://www.web.onpe.gob.pe/modElecciones/elecciones/MarcoLegal/constitucion-politica-peru-1993.pdf>

Decreto Legislativo N.º 1013. Creación del Ministerio del Ambiente. (13 de mayo de 2008).

Normas Legales N.º 1013. Diario Oficial El Peruano. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/08/Creaci%C3%B3n-MINAM-D.Legislativo.1013.pdf>

Decreto Supremo N.º 003-2017-MINAM. (7 de junio de 2017). Diario Oficial El Peruano.

Ministerio del Ambiente.
<https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/sinia/archivos/public/docs/ds-003-2017-minam.pdf>

Decreto Supremo N.º 004-2013-MINAM. Modifican Anexo N.º 1 del Decreto Supremo N.º

047-2001-MTC, que establece límites máximos permisible de emisiones contaminantes para vehículos automotores que circulen en la red vial. (30 de mayo de 2013). Normas Legales N.º 004-2013-MINAM. Diario Oficial El Peruano. Ministerio del Ambiente.
https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/12/ds_004-2013-minam.pdf

Decreto Supremo N.º 009-2012-MINAM. Modifican Decreto Supremo N.º 047-2001-MTC, que

establece Límites Máximos Permisibles de Emisiones Contaminantes para Vehículos Automotores que circulen en la Red Vial. (18 de diciembre de 2012). Normas Legales N.º 009-2012-MINAM. Diario Oficial El Peruano. Ministerio del Ambiente.
https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/ds_009-2012-minam.pdf

Derteano, E. (11 de marzo de 2019). Parque automotor se renueva en 6% cuando debería hacerlo en 10%. Gestión, 1-5.

Encyclopaedia Britannica (5 de julio de 2011). Emission control system. Encyclopaedia Britannica. <https://www.britannica.com/technology/emission-control-system>

- Esteban, J. (2021). Incidencia del flujo vehicular en la calidad del aire por NO₂ y SO₂ en las avenidas Próceres de la Independencia y Las Flores en San Juan de Lurigancho. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional Universidad Nacional Federico Villarreal. <https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/5252>
- Fernández, L. (24 de julio de 2019). Contaminación vehicular: qué es, tipos, causas y consecuencias. Ecología verde. <https://www.ecologiaverde.com/contaminacion-vehicular-que-es-tipos-causas-y-consecuencias-2130.html>
- Fernández, R. y Malca, G. (2019). Análisis de la Contaminación del Aire generada en el parque automotor del distrito de Imaza, Chiriaco, 2018. [Tesis de pregrado, Universidad de Lambayeque]. Repositorio Institucional Universidad de Lambayeque. <https://core.ac.uk/download/335023351.pdf>
- Ferro, J. (2020). Perito en Salud Medioambiental (ebook). <https://books.google.com.pe/books?id=OirKDwAAQBAJ&pg=PA1306&lpg=PA1306&dq=Los+equipos+disponibles+se+clasifican+en:+analizadores+autom%C3%A1ticos+y+monitores+de+part%C3%ADculas.+Los+analizadores+autom%C3%A1ticos+se+usan+para+determinar+la+concentraci%C3%B>
- Flores, L. (2023). Flujo vehicular y su influencia sobre la calidad del aire por NO₂ y SO₂ en el distrito de Cercado de Lima - 2020. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional Universidad Nacional Federico Villarreal. https://repositorio.unfv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13084/6846/UNFV_FIGAE_Flores_Vela_Liliam_Susana_Titulo_profesional_2023.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Flores, L. Valero, Y., Santa María, E. y Montenegro, W. (2018). Análisis del Comportamiento del Flujo Vehicular y Nivel de Servicio de la Av. Javier Prado – Lima, Perú. Innovation in Education and Inclusion: Proceedings of the 16th LACCEI International Multi-

- Conference for Engineering, Education and Technology. (pp. 1-12). LACCEI 2018, Lima. https://www.laccei.org/LACCEI2018-Lima/full_papers/FP409.pdf
- García, A. (2019). Evaluación de la concentración de CO, NO₂ y SO₂ en el aire por tráfico vehicular en el distrito de Morales, 2018. [Tesis de pregrado, Universidad Peruana Unión]. Repositorio Institucional Universidad Peruana Unión. <https://repositorio.upeu.edu.pe/items/f95a6bc3-1991-4002-a704-d807813d0ea6>
- Hernández, R. y Mendoza, C. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill Education. https://www.google.com.pe/books/edition/METODOLOG%C3%8DA_DE_LA_INV_ESTIGACI%C3%93N/5A2QDwAAQBAJ?hl=es-419
- Heydarizadeh, A. y Kahfroushan, D. (2019). Estimation of real-world traffic emissions for CO, SO₂, and NO₂ through measurements in urban tunnels in Tehran, Iran. Environmental Science and Pollution Research, 26(1), pp. 26577-26592. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-019-05809-4>
- Kumar, R., Shukla, A., Parida, M., y Pandey, G. (2016). Urban roadside monitoring and prediction of CO, NO₂ and SO₂ dispersion from on-road vehicles in megacity Delhi. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 46(1), pp. 157-165. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.03.019>
- Lee, K. y Greenstone, M. (2021). Air Quality Life Index: 2021 Annual Update. University of Chicago. AQLI. https://aqli.epic.uchicago.edu/wp-content/uploads/2021/08/AQLI_2021-Report.EnglishGlobal.pdf
- Ley N.º 28611. Ley General del Ambiente (13 de octubre de 2005). Diario Oficial El Peruano. https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/ley_n-28611.pdf
- Limas, D. (2016). Incidencia del flujo vehicular en la calidad de aire por NO₂ y SO₂ en plazas históricas del Cercado de Lima. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Federico

- Villarreal]. Repositorio Institucional Universidad Nacional Federico Villarreal.
<https://repositorio.unfv.edu.pe/handle/20.500.13084/1484>
- Marrodán, L., Trillo, R., Fabra, J., Nogueras, J. y Alzueta, M. (2019). TRAFAIR: Análisis de los flujos de tráfico para mejorar la calidad del aire urbano. Revista “Jornada de Jóvenes Investigadores del I3A”, 7(1), pp. 1-2. <https://doi.org/10.26754/jji-i3a.003603>
- Medina, E. (2019). La contaminación del aire, un problema de todos. Revista de la Facultad de Medicina, 67(2), pp. 189-191. <https://doi.org/10.15446/revfacmed.v67n2>
- Mendoza, R. (22 de mayo de 2019). Contaminación Ambiental del Centro de Lima triplica niveles permitidos. La República. <https://larepublica.pe/sociedad/297602-contaminacion-ambiental-del-centro-de-lima-triplica-niveles-permitidos/>
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones [MTC] (2018). Manual de Carreteras: Diseño Geométrico DG-2018. Ministerio de Transportes y Comunicaciones. https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/documentos/manuales/Manual.de.Carreteras.DG-2018.pdf
- Ministerio del Ambiente (11 de junio de 2014). MINAM presenta Estrategia Nacional para tener mejores combustibles y vehículos más limpios y eficientes. <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/minam-presenta-estrategia-nacional-para-tener-mejores-combustibles-y-vehiculos-mas-limpios-y-eficientes/>
- Ministerio del Ambiente (2019). Protocolo nacional de monitoreo de la calidad ambiental de aire. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/434320/PROTOCOLO_MONITOREO_AIRE_compressed.pdf?v=1576091721
- Noticias ONU (4 de abril de 2022). El 99% de la población mundial respira aire contaminado. Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2022/04/1506592>

- Organización Mundial de la Salud [OMS] (2 de mayo de 2018). Nueve de cada diez personas de todo el mundo respiran aire contaminado. Organización Mundial de la Salud. <https://www.who.int/es/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action#:~:text=Seg%C3%BAAn%20nuevos%20datos%20de%20la,dom%C3%A9stico%3B%20es%20una%20cifra%20alarmante>
- Ortiz, W. y Serrano, B. (2020). Estudio de la calidad del aire en el centro histórico de la ciudad de Cuenca como consecuencia de los cambios a la movilidad causada por el COVID-19. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. Repositorio Institucional Universidad Politécnica Salesiana. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/19712>
- Pinedo, C., Verano, J. y Barrantes, V. (2020). Análisis del control de emisiones atmosféricas vehiculares en Lima Metropolitana. *South Sustainability*, 1(1), pp. 1-7. <https://revistas.cientifica.edu.pe/index.php/southsustainability/article/download/598/658/>
- Prieto, O. (2016). Caracterización de material particulado, plomo y arsénico para la evaluación de la calidad del aire en el distrito de Islay - Matarani. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de San Agustín]. Repositorio Institucional Universidad Nacional de San Agustín. <https://repositorio.unsa.edu.pe/server/api/core/bitstreams/e4c28760-aeca-4db8-9161-e0aefe6fb3bf/content>
- Puertas, C. (2019). Determinación de la concentración de contaminantes del aire a filo de calle en el Centro Histórico de Quito y el Valle de los Chillos. [Tesis de pregrado, Universidad Católica del Ecuador]. Repositorio Institucional Universidad Católica del Ecuador. <http://repositorio.puce.edu.ec/handle/22000/16945>
- qAIRa (s.f.). Plataforma de medición de calidad del aire y monitoreo ambiental. qAIRmap. <https://qairamap.qairadrones.com/#/mml>

Rafael, M. y Hernández, A. (2017). Caracterización de un motor de combustión interna con dos tipos de combustible. Instituto Mexicano del Transporte.

<https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt417.pdf>

Rangel, F., Anaya, M., Iannacone, J. y Romero, L. (2022). Modelos de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos: Revisión Sistemática. Universidad San Martín de Porres.

<https://www.usmp.edu.pe/campus/pdf/articulos/articulo47.pdf>

Rázuri, L. (2018). Determinación de NO₂ en el aire de las vías principales de la zona urbana del distrito de Castillo Grande, Provincia de Leoncio Prado – Huánuco - 2018. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional Universidad Nacional Agraria de la Selva.

https://web2.unas.edu.pe/sites/default/files/web/archivos/actividades_academicas/DE_TERMINACION%20DE%20NO2%20EN%20EL%20AIRE%20DE%20LAS%20VIAS%20PRINCIPALES%20DE%20LA%20ZONA%20URBANA%20DEL%20DISTRITO%20DE%20CASTILL.pdf

Resolución Ministerial N.º 139-2012-MEM/DM: Establecen prohibición de comercializar y usar Diesel B5 con un contenido de azufre mayor a 50 ppm en los departamentos de Lima, Arequipa, Cusco, Puno y Madre de Dios y en la Provincia Constitucional del Callao. (16 de marzo de 2012). Diario Oficial El Peruano. Ministerio de Energía y Minas.

<https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/establecen-prohibicion-de-comercializar-y-usar-diesel-b5-con-resolucion-ministerial-n-139-2012-memdm-765501-1/>

Resolución Ministerial N.º 181-2016-MINAM. (14 de julio de 2016). Diario Oficial El Peruano.

Ministerio del Ambiente. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2016/07/RM-N%c2%b0-181-2016-MINAM.pdf>

- Reyes, T. (2019). Evaluación de la calidad de aire en la Universidad Santiago de Cali. Medición de las partículas totales en suspensión. [Tesis de posgrado, Universidad Santiago de Cali]. Repositorio Institucional Universidad Santiago de Cali. <https://repositorio.usc.edu.co/items/8232b083-5e25-461d-9a65-c4c3261c7aa3>
- Rivera, C. (2020). Impacto del parque automotor y la calidad del aire en Lima Metropolitana durante las medidas de aislamiento social (COVID-19), 2020. [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional Universidad César Vallejo. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/660>
- Sanabria, A. (2012). Operación de la estación de calidad del aire del IDEAM para el Diagnóstico, Verificación y Determinación de la representatividad en cuanto al uso y ubicación de la misma. [Tesis de pregrado, Universidad Santo Tomás de Aquino]. Repositorio Institucional Universidad Santo Tomás de Aquino. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/2634/2012andressanabria.pdf>
- Sanambiente (s.f.). Línea aire equipos para medición de partículas. Sanambiente. <https://www.sanambiente.com.co/equipos-para-medicion-de-particulas/#categorias>
- Serio, L., Puccetti, C. y Oderigo, J. (2020). Revisión de los monitoreos de calidad del aire en la ciudad de Buenos Aires. *Agronomía & Ambiente*, 40(1), pp. 50-62. <http://agronomiayambiente.agro.uba.ar/index.php/AyA/article/view/128>
- Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología [SENAMHI] (1 de enero de 2021). Vigilancia de la calidad del aire. Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/03201SENA-92.pdf>
- Tito, B. (22 de marzo de 2021). Métodos de medición de la calidad del aire: 5 muestreos. Ingeniería Ambiental. <https://ingenieriaambiental.net/metodos-de-medicion-de-la-calidad-del-aire/>

United States Environmental Protection Agency (2011). Haul Road Workgroup
Recommendations. United States Environmental Protection Agency.

[https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/haul_road_workgroup-
final_report_package-20120302.pdf](https://www.epa.gov/sites/default/files/2020-10/documents/haul_road_workgroup-final_report_package-20120302.pdf)

Valverde, J. (2016). Evaluación de la calidad de aire en la intersección de la Av. Universitaria
con Panamericana Norte - Los Olivos, Lima. Revista del Instituto de Investigación
FIGMMG-UNMSM, 19(38) pp. 121-124.

<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/13577/11988>

Vintimilla, P. (2015). Análisis de resultados de la medición de emisiones de gases
contaminantes de fuentes móviles a partir de la implementación de la revisión técnica
vehicular en el cantón Cuenca. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana].

Repositorio Institucional Universidad Politécnica Salesiana.
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7647/1/UPS-CT004530.pdf>

IX. ANEXOS

Anexo A. Croquis de los puntos de observación en las Avenidas Morales Duárez (tramos cuadra 27-30) y Universitaria (tramos cuadra 1-2)

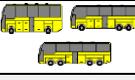
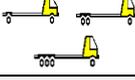
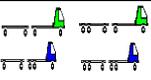
Figura 27

Avenidas Morales Duárez (tramos cuadra 27-30) y Universitaria (tramos cuadra 1-2)



Anexo B. Formato de ubicación de puntos de muestro para monitoreo de calidad del aire

Anexo C. Formato de conteo de vehículos

FORMATO DE CONTEO DE VEHÍCULOS								
INFORMACIÓN DEL LUGAR								
Avenida		Código						
Fecha		Hora						
Tipo de vehículos		Hora			N° de vehículos			
		7:00 - 7:20	7:20 - 7:40	7:40 - 8:00				
LIVIANOS	Automóvil 							
	Station wagon (taxis) 							
	Pick up 							
	Camioneta panel (carga ligera) 							
	Camioneta rural (combis) 							
	Microbus 							
	PESADOS	Bus 						
		Camión 						
		Semi Trailer 						
		Trailer 						
MENORES		Motos lineales 						
	Mototaxi 							
	Trimotos de carga 							

ANEXO D. Fotografías del conteo vehicular en la Avenida Universitaria y Morales Duárez

Figura 28

Punto de conteo vehicular (UV - 01)

**Figura 29**

Punto de conteo vehicular (UV - 02)



Figura 30

Punto de conteo vehicular (MD - 01)

**Figura 31**

Punto de conteo vehicular (MD - 02)



ANEXO E. Documento de permiso para solicitar la instalación de muestreadores pasivos



Universidad Nacional
Federico Villarreal

FACULTAD DE INGENIERIA
GEOGRAFICA, AMBIENTAL Y
ECOTURISMO

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL
"Año de la Unidad, la paz y el desarrollo"

LIMA

Nº: 2023-0073210

Remitente:
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO
VILLARREAL - RUC: 20170934289

Recibido: 28/04/2023 - 11:43

Nº de Folios: 1

Registrado RAMREZ ROMERO

Consultas: www.munilima.gob.pe
Teléfonos: (51) 1 - 632 - 1300

Nota: La recepción NO da conformidad al contenido.

Carta Virtual N° 009-2023-EPIA-FIGAE-UNFV

Señores
MUNICIPALIDAD METROPOLITANA DE LIMA
Presente. -

Es grato dirigimos a ustedes en nombre de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de la Universidad Nacional Federico Villarreal, para expresarles nuestro más cordial saludo y a la vez presentarles al Señorita:

VALERIA ANDREA VIVANCO SANDOVAL con D.N.I. 72921214

Quien es Bachiller de la Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo de esta Casa Superior de Estudios y desea que le brinden información sobre **IMPACTO DEL FLUJO VEHICULAR EN LA CALIDAD DEL AIRE POR NO2 Y SO2 EN LAS AVENIDAS MORALES DUAREZ Y UNIVERSITARIA, CERCADO DE LIMA 2023**, y así determinar la calidad del aire mediante la instalación de muestreadores pasivos en los postes de alumbrado público por el periodo de dos meses; con la finalidad de ampliar sus conocimientos y continuar con los objetivos planteados en el trabajo de investigación y elaboración de su tesis.

En tal sentido, mucho agradeceremos brindar las facilidades del caso, a fin de afianzar los conocimientos teóricos impartidos en las aulas, la cual redundará en beneficio de su formación profesional.

Agradeciendo anticipadamente la atención que brinde a la presente, quedo de usted.

Atentamente,



[Firma manuscrita]

MgSc. CESAR AUGUSTO MUÑOZ ORTEGA
DIRECTOR



Vº Bº
DR. JORGE LESCANO SANDOVAL
DECANO

Betty C.

ANEXO F. Fotografías de los muestreados pasivos en los postes de alumbrado público

Figura 32

Punto de muestreo de calidad del aire: UV – 01

**Figura 33**

Punto de muestreo de Calidad del aire: UV – 02



Figura 34

Punto de muestreo de calidad del aire: UV - 03


**Figura 35**

Punto de muestreo de calidad del aire: MD - 01

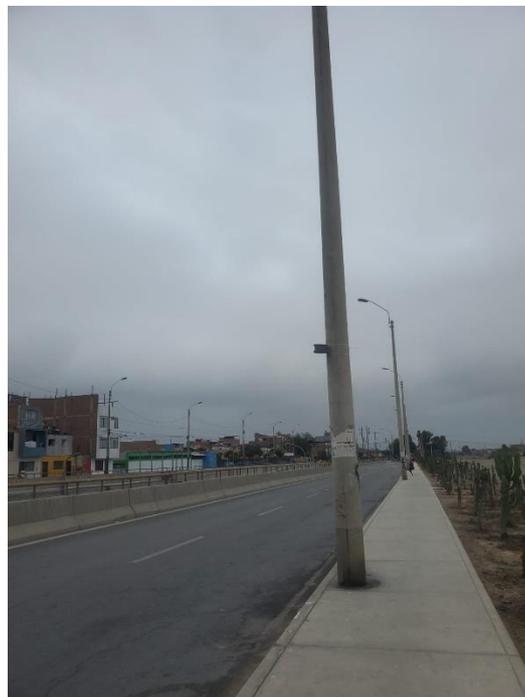


Figura 36

Punto de muestreo de calidad del aire: MD - 02

**Figura 37**

Punto de muestreo de calidad del aire: MD - 03



ANEXO G. Cadena de custodio para el NO₂ y SO₂

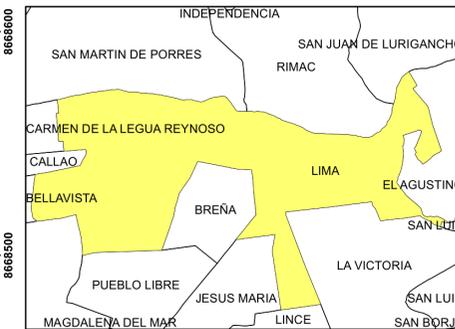
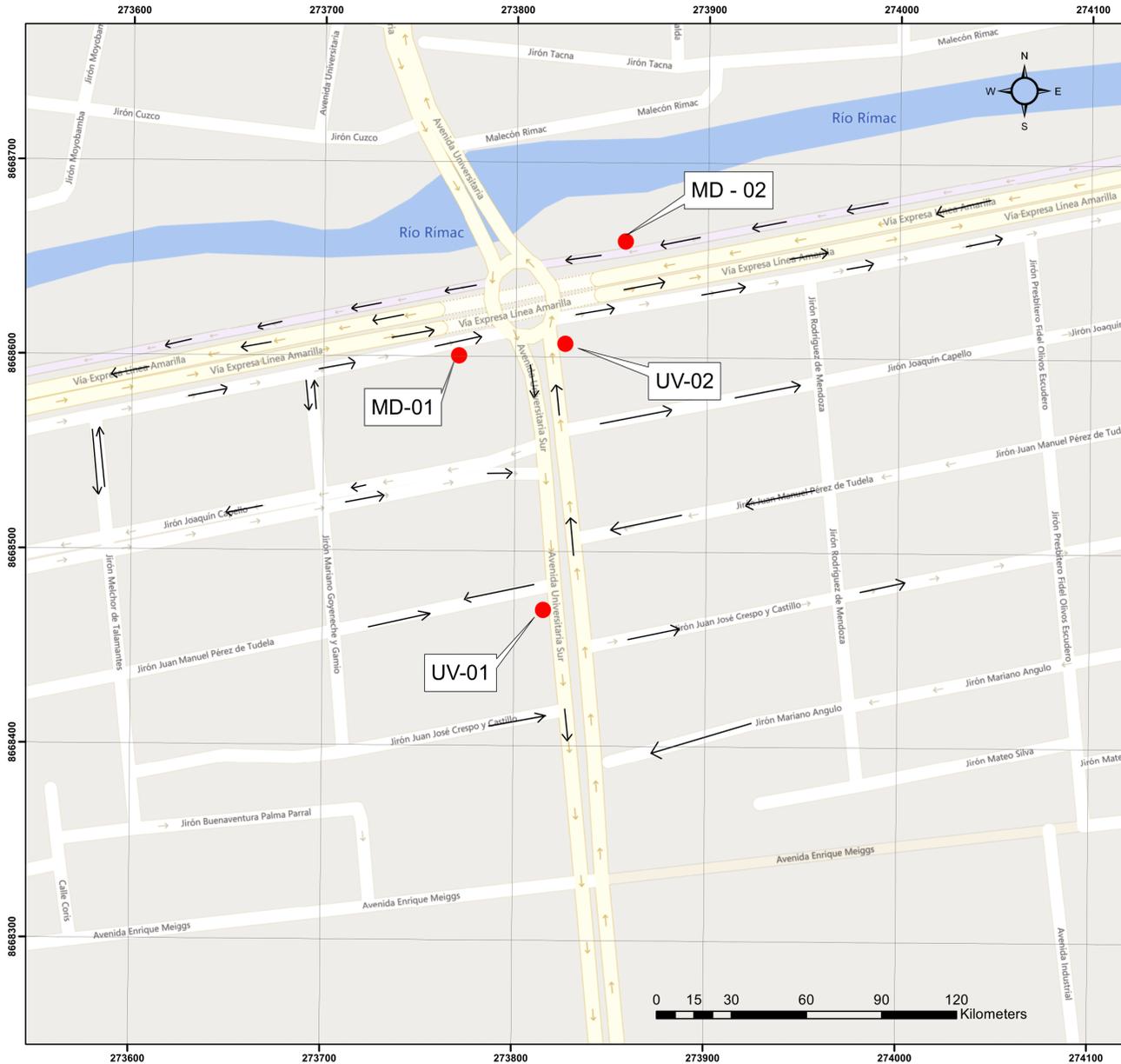
Dióxido de Nitrógeno/Azufre - (NO₂/SO₂)-Muestreadores pasivos

Proyecto: Impacto del Flujo vehicular en la calidad del aire por NO₂ y SO₂ en las Avenidas Morales Duarez y Universitaria, Cercado de Lima, 2023

Lugar de muestreo código	Lote	Código passam	Inicio			Fin			Observaciones
			Fecha	Hora	Responsable	Fecha	Hora	Responsable	
UV-02	45027-7	PEK-23	01/05/2023	7:09	Valeria Uw.	01/06/2023	6:32	Valeria Uw.	Av. Universitaria
UV-03	45027-7	PEK-20	01/05/2023	7:17	Valeria Uw.	01/06/2023	6:35	Valeria Uw.	Av. Universitaria
UV-04	45027-7	PEK-14	01/05/2023	7:34	Valeria Uw.	01/06/2023	6:26	Valeria Uw.	Av. Universitaria
MD-02	45027-7	PEK-21	01/05/2023	7:43	Valeria Uw.	01/06/2023	6:40	Valeria Uw.	Av. Morales Duarez
MD-03	45027-7	PEK-16	01/05/2023	7:52	Valeria Uw.	01/06/2023	6:44	Valeria Uw.	Av. Morales Duarez
MD-01	45027-7	PEK-15	01/05/2023	8:06	Valeria Uw.	01/06/2023	6:52	Valeria Uw.	Av. Morales Duarez
UV-01	45027-7	PEK-19	01/06/2023	6:26	Valeria Uw.	01/07/2023	11:07	Valeria Uw.	Av. Universitaria
UV-02	45027-7	PEK-22	01/06/2023	6:32	Valeria Uw.	01/07/2023	11:16	Valeria Uw.	Av. Universitaria
UV-03	45027-7	PEK-17	01/06/2023	6:35	Valeria Uw.	01/07/2023	11:25	Valeria Uw.	Av. Universitaria
MD-02	45027-7	PEK-18	01/06/2023	6:40	Valeria Uw.	01/07/2023	11:30	Valeria Uw.	Av. Morales Duarez
MD-03	45027-7	PEK-24	01/06/2023	6:45	Valeria Uw.	01/07/2023	11:38	Valeria Uw.	Av. Morales Duarez
MD-04	45027-7	PEK-13	01/06/2023	6:53	Valeria Uw.	01/07/2023	11:51	Valeria Uw.	Av. Morales Duarez

ANEXO H. Mapas

MAPA DE UBICACIÓN DE PUNTOS DE CONTEO VEHICULAR



ID	Código	X	Y	Z
1	UV-01	273817.37	8668468.82	94
2	UV-02	273829.56	8668604.97	78
3	MD-01	273791.16	8668604.89	81
4	MD-02	273871	8668660	75

Leyenda

● Puntos de conteo vehicular

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO: IMPACTO DEL FLUJO VEHICULAR EN LA CALIDAD DEL AIRE POR NO₂ Y SO₂ EN LAS AVENIDAS MORALES DUÁREZ Y UNIVERSITARIA, CERCADO DE LIMA, 2023

TEMA: MAPA DE UBICACIÓN DE PUNTOS DE CONTEO VEHICULAR

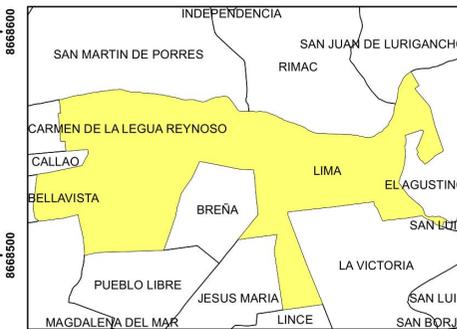
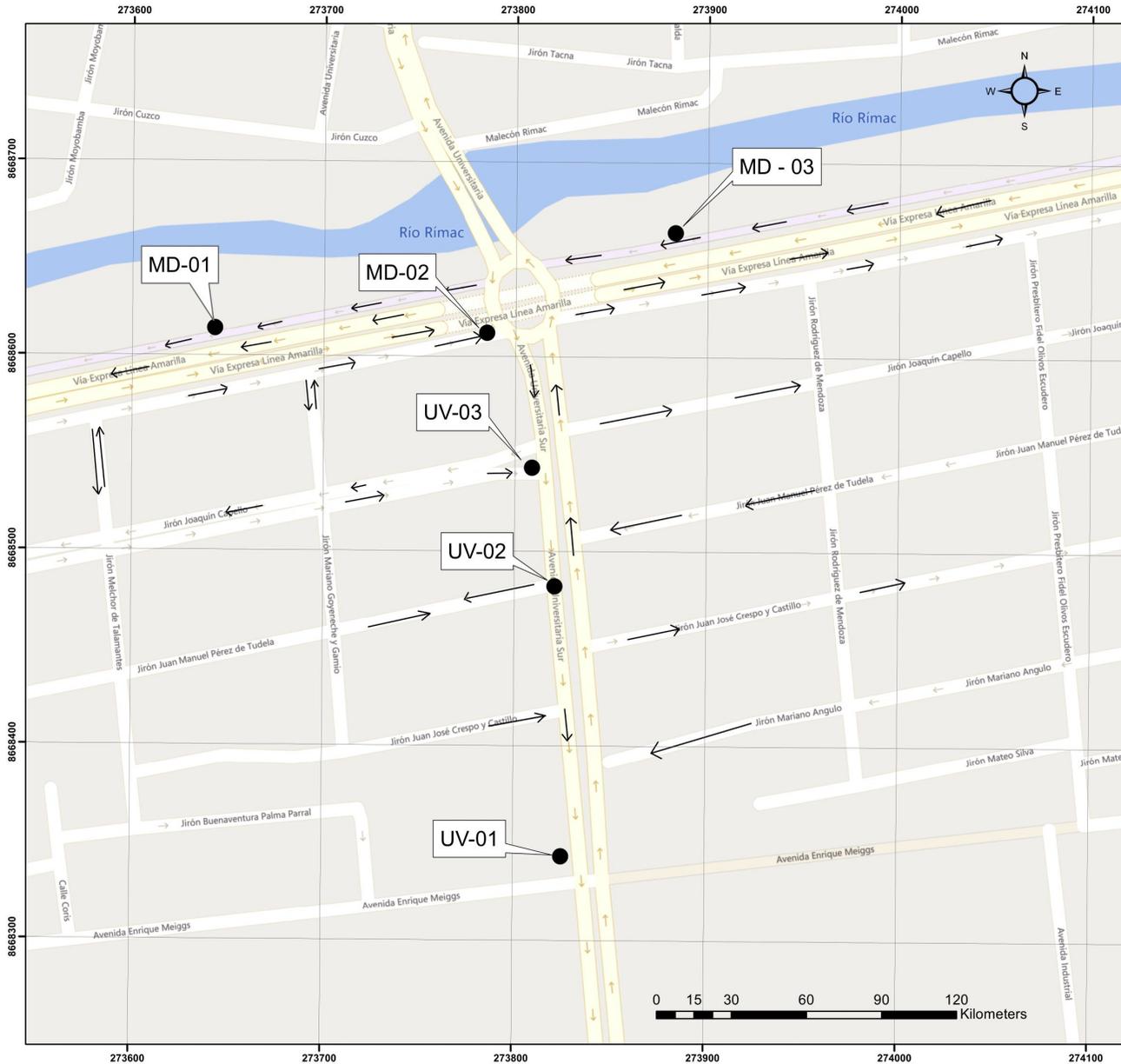
Datum Internacional: WGS84
 Sistema de Coordenadas UTM 18S

Elaborado por: Vivanco Sandoval, Valeria Andrea
 Fecha: Diciembre 2023
 Escala: 1:2,000
 Fuente: Elaboración propia

MAPA N°: 1



MAPA DE UBICACIÓN DE PUNTOS DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE



ID	Código	X	Y	Z
1	UV-01	273825	8668343	94
2	UV-02	273821	8668482	95
3	UV-03	273809	8668543	91
4	MD-01	273643	8668614	86
5	MD-02	273785	8668612	81
6	MD-03	273883	8668664	75

Leyenda

- Puntos de monitoreo de calidad del aire

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO: IMPACTO DEL FLUJO VEHICULAR EN LA CALIDAD DEL AIRE POR NO₂ Y SO₂ EN LAS AVENIDAS MORALES DIÁZ Y UNIVERSITARIA, CERCADO DE LIMA, 2023
 TEMA: MAPA DE UBICACIÓN DE PUNTOS DE MONITOREO DE CALIDAD DEL AIRE

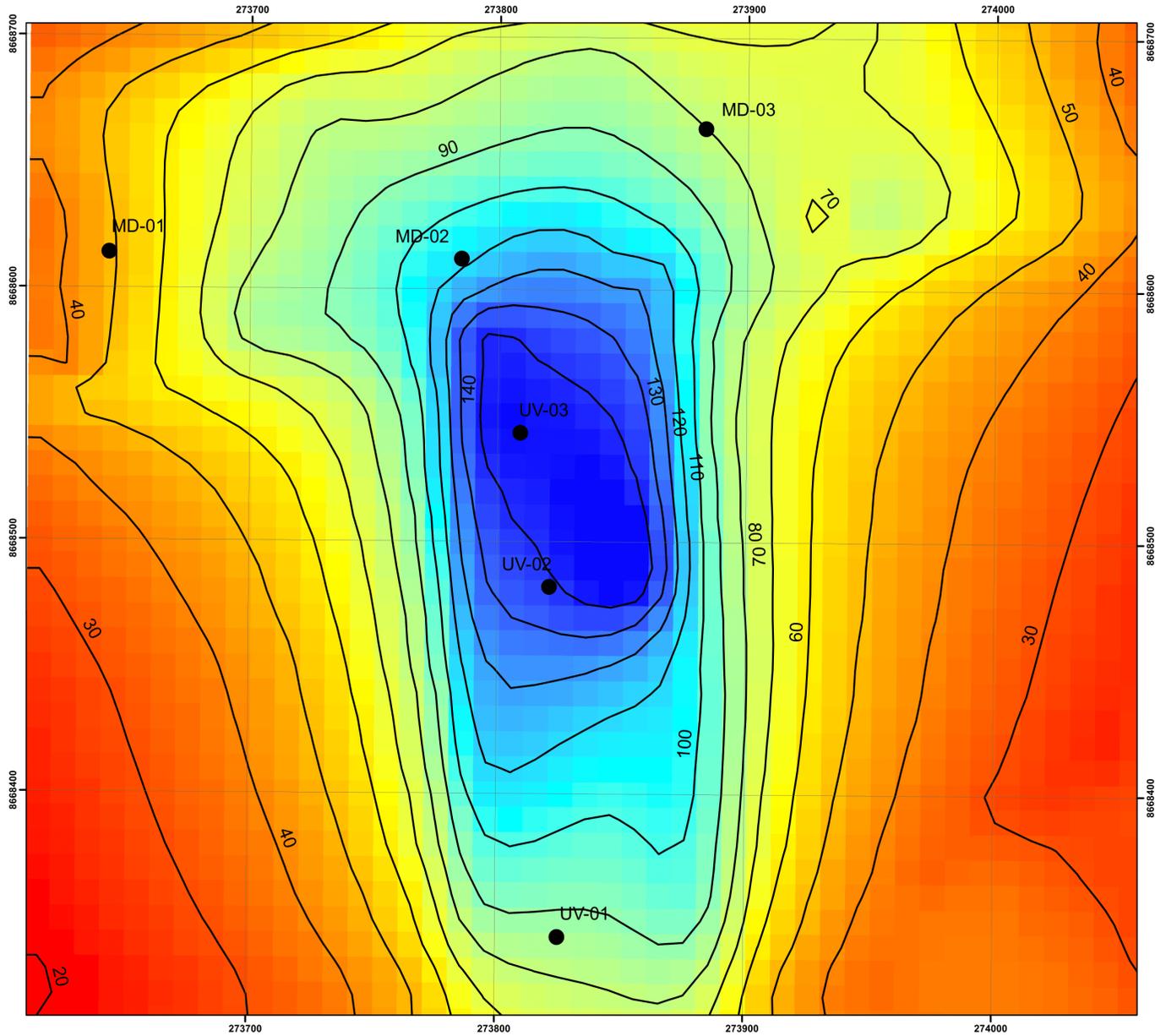
Datum Internacional: WGS84
 Sistema de Coordenadas UTM 18S

Elaborado por: Vivanco Sandoval, Valeria Andrea
 Fecha: Diciembre 2023

Escala: 1:2,000
 Fuente: Elaboración propia

MAPA N°: 2

MAPA DE ISOCONCENTRACIONES DE NO2 (g/s) (Período: 1 hora)



ID	Código	X	Y	Z
1	UV-01	273825	8668343	94
2	UV-02	273821	8668482	95
3	UV-03	273809	8668543	91
4	MD-01	273643	8668614	86
5	MD-02	273785	8668612	81
6	MD-03	273883	8668664	75



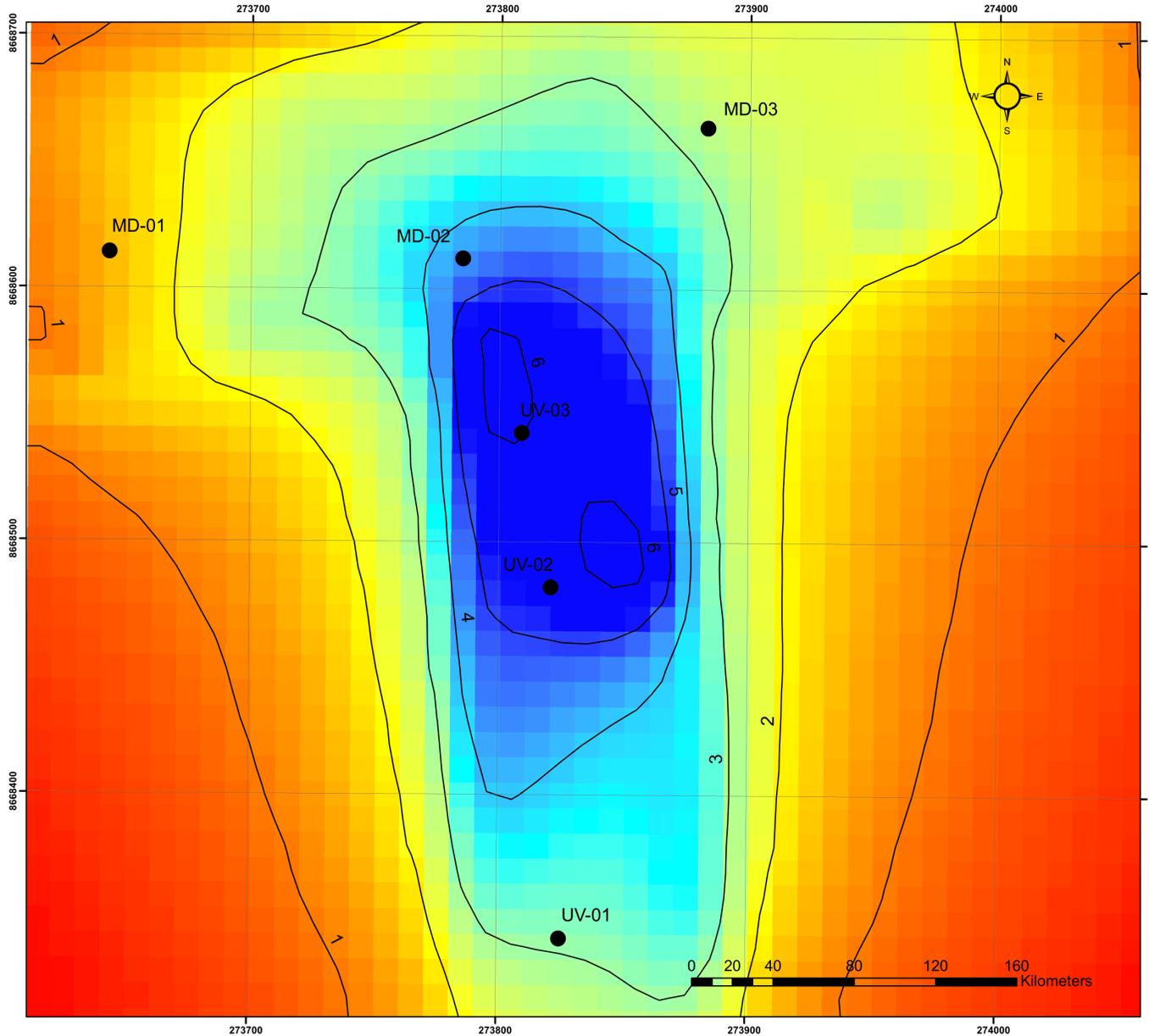
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TÍTULO: IMPACTO DEL FLEJO VEHICULAR EN LA CALIDAD DEL AIRE POR NO2 Y SO2 EN LAS AVENIDAS MORALES DE ARÉZ Y UNIVERSITARIA, CERCADO DE LIMA, 2023
 TEMA: MAPA DE ISOCONCENTRACIONES DE NO2 (g/s) (Período: 1 hora)

Datum Internacional: WGS84
 Sistema de Coordenadas UTM 18S

Elaborado por: Escala: 1:1.500 MAPA N°: 3
 Vivanco Sandoval, Valeria Andrea Fuente: Elaboración propia
 Fecha: Diciembre 2023

MAPA DE ISOCONCENTRACIONES DE NO2 (g/s) (Período: Anual)



ID	Código	X	Y	Z
1	UV-01	273825	8668343	94
2	UV-02	273821	8668482	95
3	UV-03	273809	8668543	91
4	MD-01	273643	8668614	86
5	MD-02	273785	8668612	81
6	MD-03	273883	8668664	75



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL
TÍTULO: IMPACTO DEL FLUJO VEHICULAR EN LA CALIDAD DEL AIRE POR NO2 Y SO2 EN LAS AVENIDAS MORALES DUÁREZ Y UNIVERSITARIA, CERCADO DE LIMA, 2023
TEMA: MAPA DE ISOCONCENTRACIONES DE NO2 (g/s) (Período: Anual)
 Datum Internacional: WGS84
 Sistema de Coordenadas: UTM 18S
 Elaborado por: Vivanco Sandoval, Valeria Andrea
 Fecha: Diciembre 2023
 Escala: 1:1,500
 Fuente: Elaboración propia
MAPA N°: 4