Propuesta de Estrategias para mitigar el Impacto Ambiental por el Servicio de Transporte Masivo en la Ciudad de Bogotá.

Carol del Pilar Benavides Gilón.

Laura Gineth Suarez González

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

enero de 2026

Estrategias frente al Impacto ambiental - Servicio de Transporte Masivo en Bogotá.

Propuesta de estrategias para mitigar el Impacto ambiental por el Servicio de Transporte Masivo en la Ciudad de Bogotá.

Carol del Pilar Benavides Gilón.

Laura Gineth Suarez González

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Especialista en Gerencia de Proyectos

Asesor(a)
Sergio Andrés Zabala Vargas
Doctor en Tecnología Educativa

Corporación Universitaria Minuto de Dios

Rectoría Virtual

Programa Especialización en Gerencia de Proyectos

Enero de 2026

Contenido

Lista de tablas 6
Lista de figuras 7
Resumen 8
Abstract 10
Introducción 12
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 15
1.1. Descripción del problema 15
1.2. Pregunta de investigación 17
1.3. Los objetivos de investigación 18
1.3.1. Objetivo general 18
1.3.2. Objetivos específicos 18
1.4. Justificación de la investigación 19
2. MARCO DE REFERENCIA 21
2.1. Estado del Arte 21
2.2. Marco Teórico 25
2.2.1. Transporte Masivo Y Urbanización 25
2.2.2. Teoría Del Impacto Ambiental Del Transporte 25
2.2.3. Movilidad Sostenible Y Transporte Limpio 26
2.2.4. Sistemas BRT (Bus Rapid Transit) Y Su Impacto Ambiental 26
2.2.5. Salud Ambiental Y Exposición Urbana 27
2.2.6. Gestión Ambiental Urbana 27
2.3. Marco normativo 28
2.3.1. Normativa Internacional 29
2.3.2. Normativa Nacional 29
2.3.3. Normativa Distrital 31
3. METODOLOGÍA 33
3.1. Enfoque y alcance de la investigación 33

3.1.1. Alcance 35
3.2. Población y muestra 37
3.2.1. Datos ambientales 37
3.2.2. Datos de movilidad 40
3.2.3. Ciudadanía. 40
3.2.4. Definición de la población 41
3.3. Instrumento 42
3.3.1. Bases de datos oficiales 42
3.3.2. Encuestas estructuradas. 44
3.4. Descripción de procedimientos 46
3.5. Análisis de información 49
3.5.1. Limpieza, organización y preparación de los datos 49
3.5.2. Codificación de la Información. 50
3.5.3. Análisis de la información según el instrumento 51
3.5.4. Software utilizado para el análisis 52
3.5.5. Presentación de los análisis 52
3.6. Consideraciones éticas 53
3.6.1. Análisis de consideraciones éticas 53
3.6.2. Instrumentos de aceptación y autorización 54
4. HIPÓTESIS 56
4.1. Hipótesis general 56
4.2. Hipótesis específicas 56
4.3. Las variables 57
4.3.1. Variable(s) independiente(s) 57
4.3.2. Variable(s) dependiente(s) 58
5. RESULTADOS 61
5.1. Presentación de resultados 64
5.1.1. Caracterización de la flota del sistema de transporte público por localidad (2020–2024) 64
5.1.2. Niveles de contaminación atmosférica asociados a la tecnología de flota 65
5.1.3. Comparación temporal de contaminantes (2020–2024) 67
5.1.4. Análisis de la encuesta: confiabilidad del Instrumento (alfa de Cronbach) 68
5.2. Propuesta al sector 79

5.2.1. Enfoque de la propuesta 79
5.2.2. Lineamientos estratégicos de la propuesta 80
5.2.3. Estrategias de gestión y gobernanza 81
5.2.4. Alcance de la propuesta 82
5.3. Discusión 83
6. Conclusiones 86
7. Referencias 88
Anexos 91

Lista de tablas

Tabla 1 . *fuente de información documental*. Elaboración propia. 44
Tabla 2 *Operacionalización de las Variables*. Apoyo IA Copilot. 60
Tabla 3 *Matriz de consolidación de datos*. 63
Tabla *4 Coherencia entre objetivos específicos, resultados y recomendaciones del estudio* 83

Lista de figuras

Figura 1 . *Estación Tunal y mapa de calidad del aire Bogotá* 38
Figura 2. *Estación Fontibón y mapa de calidad del aire Bogotá* 38
Figura 3 *Reporte de concentración $PM_{2.5}$. en Bogotá* 39
Figura 4 *Visor geográfico ambiental*. Niveles de $PM_{2.5}$. 39
Figura 5 *Transporte público colectivo y masivo: SITP Componente zonal, troncal y provisional*. 40
Figura 6 caracterización de la flota del sistema de Transporte público en algunas localidades 64
Figura 7 *Promedio de contaminantes por tecnologías aplicadas al sistema de transporte público en algunas localidades* 66
Figura 8 *Comparación temporal de Contaminantes y su distribución de flota* 67
Figura 9 Cálculo de coeficiente Alfa de Cronbach 70

Resumen

El sistema de transporte público masivo de Bogotá constituye el eje estructural de la movilidad urbana; sin embargo, su operación histórica basada en tecnología diésel ha generado impactos significativos sobre la calidad del aire. El presente estudio tuvo como objetivo formular una propuesta de estrategias orientadas a mitigar el impacto ambiental del transporte masivo en la ciudad, a partir del análisis cuantitativo de datos ambientales oficiales del periodo 2020–2024 y de la percepción ciudadana frente a esta problemática.

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo con alcance descriptivo–correlacional, mediante el análisis de información proveniente de entidades oficiales como la Secretaría Distrital de Ambiente, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM 2020-2024) y registros operativos del sistema de transporte público. Adicionalmente, se aplicó una encuesta estructurada a 40 usuarios frecuentes del sistema con el fin de evaluar la percepción ciudadana sobre la calidad del aire y el impacto ambiental del transporte masivo.

Los resultados evidencian que localidades con mayor presencia de flota diésel, como Kennedy y Bosa, registraron concentraciones promedio anuales de material particulado fino ($PM_{2.5}$) entre 22 y 28 $\mu g/m^3$ durante los periodos críticos evaluados, superando el valor guía anual recomendado por la Organización Mundial de la Salud (15 $\mu g/m^3$). En contraste, zonas con mayor incorporación de buses eléctricos presentaron reducciones progresivas en contaminantes atmosféricos, particularmente en emisiones de NOx y material particulado.

En relación con la percepción ciudadana, el 72 % de los encuestados manifestó percibir con frecuencia olor a diésel o humo en estaciones del sistema, el 65 % considera que el transporte público contribuye significativamente a la contaminación del aire urbano, y el 83 % expresó estar de acuerdo con la transición hacia flotas eléctricas o de bajas emisiones. Asimismo, el 70 % de los usuarios considera que durante las horas pico aumenta la exposición a contaminantes atmosféricos, lo que evidencia una percepción clara de los efectos ambientales asociados a la operación del sistema.

A partir de estos hallazgos se formuló una propuesta de estrategias orientada al sector transporte, estructurada en cuatro componentes principales: (1) aceleración de la sustitución

progresiva de flota diésel por buses eléctricos, con una meta indicativa de alcanzar al menos el 60 % de flota limpia para el año 2030; (2) fortalecimiento de los mecanismos de control y seguimiento a las emisiones vehiculares mediante sistemas de monitoreo ambiental y mantenimiento preventivo de la flota; (3) optimización operativa del sistema mediante asignación territorial de tecnologías limpias en corredores con mayores niveles de contaminación; y (4) implementación de programas de educación y sensibilización ambiental dirigidos a usuarios y operadores del sistema.

La adopción progresiva de estas estrategias permitiría reducir las emisiones del sector transporte, mejorar la calidad del aire urbano y fortalecer el proceso de transición hacia un modelo de movilidad sostenible en la ciudad de Bogotá.

Palabras clave: Transporte Masivo, Contaminación Atmosférica, Movilidad Sostenible, Gestión Ambiental, Bogotá.

Abstract

Bogotá's mass public transportation system constitutes the structural backbone of urban mobility; however, its historical operation based on diesel technology has generated significant impacts on air quality. The objective of this study was to formulate a proposal of strategies aimed at mitigating the environmental impact of mass transportation in the city, based on the quantitative analysis of official environmental data from the 2020–2024 period and citizens' perceptions of this issue.

The research was conducted under a quantitative approach with a descriptive–correlational scope, through the analysis of information obtained from official entities such as the District Secretariat of Environment, the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM), and operational records from the public transportation system. Additionally, a structured survey was applied to 40 frequent users of the system in order to evaluate public perception regarding air quality and the environmental impact of mass transportation.

The results show that localities with a greater presence of diesel fleets, such as Kennedy and Bosa, recorded average annual concentrations of fine particulate matter ($PM_{2.5}$) between 22 and 28 $\mu g/m^3$ during the evaluated critical periods, exceeding the annual guideline value recommended by the World Health Organization (15 $\mu g/m^3$). In contrast, areas with a higher incorporation of electric buses showed progressive reductions in atmospheric pollutants, particularly in NOx emissions and particulate matter.

Regarding public perception, 72% of respondents reported frequently perceiving diesel odor or smoke in system stations, 65% believe that public transportation significantly contributes to urban air pollution, and 83% expressed agreement with the transition toward electric or low-emission fleets. Likewise, 70% of users believe that exposure to atmospheric pollutants increases during peak hours, indicating a clear perception of the environmental effects associated with the operation of the system.

Based on these findings, a proposal of strategies for the transportation sector was developed, structured into four main components: (1) accelerating the progressive replacement of diesel fleets with electric buses, with an indicative target of achieving at least 60% clean fleet by

2030; (2) strengthening mechanisms for monitoring and controlling vehicle emissions through environmental monitoring systems and preventive fleet maintenance; (3) operational optimization of the system through the territorial allocation of clean technologies in corridors with higher pollution levels; and (4) implementation of environmental education and awareness programs aimed at system users and operators.

The progressive adoption of these strategies would contribute to reducing emissions from the transportation sector, improving urban air quality, and strengthening the transition toward a sustainable mobility model in the city of Bogotá.

Keywords: Mass Transit, Air Pollution, Sustainable Mobility, Environmental Management, Bogotá

Introducción

El sistema de transporte masivo se presenta como una alternativa necesaria para las grandes metrópolis, debido a la escasez y deficiencia del transporte urbano tradicional. Con ello, se busca mejorar la movilidad de manera sostenible y eficiente. No obstante, su operación se lleva a cabo mediante vehículos que, en muchos casos, utilizan combustibles fósiles, generando emisiones de carbono y otros contaminantes atmosféricos.

De acuerdo con la *Guía contra el Cambio Climático presentada por las Naciones Unidas, "el sector transporte genera una de las mayores cantidades de emisiones de carbono a nivel mundial, siendo necesaria la reducción de emisiones por persona de 6,3 toneladas en 2020 a 2,1 toneladas en 2030".* En este contexto, la ciudad de Bogotá, como una de las principales metrópolis de América Latina, enfrenta importantes desafíos ambientales derivados del crecimiento urbano acelerado y la alta demanda de movilidad.

En la capital colombiana, el servicio de transporte masivo está representado principalmente por el sistema TransMilenio, con buses articulados y biarticulados, así como por la flota zonal del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) y otros vehículos de transporte público colectivo. Si bien este sistema se ha convertido en una solución a los problemas de movilidad en la ciudad, su operación constituye una fuente significativa de contaminación atmosférica, debido al uso predominante de combustibles fósiles, especialmente diésel.

Lo anterior contribuye a la emisión de contaminantes como material particulado (PM2.5 y PM10), óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de carbono (CO_2) y compuestos orgánicos volátiles, impactando directamente la calidad del aire. Estas emisiones generan riesgos para la salud pública, particularmente enfermedades respiratorias y cardiovasculares, además del deterioro del entorno urbano.

La problemática se ve agravada por factores como el envejecimiento de parte de la flota, la congestión vehicular, deficiencias en la operación del sistema y la limitada integración con modos de transporte más sostenibles. Aunque se han implementado medidas de mitigación, como la incorporación progresiva de buses eléctricos y a gas natural, así como la creación de zonas de

bajas emisiones, los niveles de contaminación continúan siendo motivo de preocupación para autoridades, expertos y ciudadanía.

En este marco, el presente estudio se desarrolla bajo un enfoque metodológico cuantitativo, con un alcance descriptivo–correlacional. Se fundamenta en el análisis de datos provenientes de entidades oficiales como la Secretaría Distrital de Movilidad, la Secretaría Distrital de Ambiente, el IDEAM y TRANSMILENIO S.A., entre otras. El carácter descriptivo permite caracterizar los niveles de contaminación atmosférica y el nivel de percepción del impacto ambiental generado por el transporte masivo, mientras que el alcance correlacional posibilita analizar la relación entre las características del sistema de transporte y dicha percepción por parte de los usuarios.

En consecuencia, la investigación no solo se orienta a analizar los niveles de contaminación generados por el transporte masivo en Bogotá, identificando sus principales fuentes, las zonas más afectadas y los efectos ambientales y sociales de este fenómeno, sino que también tiene como propósito proponer alternativas que contribuyan a una movilidad más limpia y eficiente en la capital colombiana.

Finalmente, el documento se estructura en seis capítulos que permiten desarrollar de manera organizada el proceso de investigación. En el capítulo 1: Planteamiento del problema, se presenta la descripción de la problemática ambiental asociada al transporte público masivo en Bogotá, la pregunta de investigación, los objetivos del estudio y la justificación que sustenta la relevancia académica, ambiental y social de la investigación.

En el capítulo 2: Marco de referencia, se exponen los principales fundamentos conceptuales, antecedentes investigativos y el marco normativo relacionado con la contaminación atmosférica, la movilidad sostenible y la transición hacia tecnologías limpias en sistemas de transporte público.

Posteriormente, el capítulo 3: Metodología describe el enfoque de investigación adoptado, el alcance del estudio, la población y muestra, los instrumentos de recolección de información, el procedimiento metodológico aplicado y las consideraciones éticas que orientaron el desarrollo del estudio.

En el capítulo 4: Hipótesis, se plantea la hipótesis de investigación que orienta el análisis de la relación entre la tecnología de la flota del transporte público masivo y los niveles de contaminación atmosférica en la ciudad de Bogotá.

El capítulo 5: Resultados presenta el análisis de la información obtenida mediante la revisión documental de datos ambientales oficiales y la aplicación de encuestas a usuarios del sistema, incluyendo la caracterización de la flota, la evaluación de los niveles de contaminantes atmosféricos, el análisis de la percepción ciudadana, la formulación de la propuesta de estrategias orientadas al sector transporte y la discusión de los resultados en relación con la literatura revisada.

Finalmente, el capítulo 6: Conclusiones sintetiza los principales hallazgos del estudio y expone las implicaciones de los resultados para la gestión ambiental y la planificación de políticas de movilidad sostenible en la ciudad de Bogotá.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

A nivel internacional, la contaminación atmosférica se ha consolidado como uno de los principales problemas ambientales y de salud pública asociados al desarrollo urbano y al crecimiento de los sistemas de transporte, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación del aires es responsable de aproximadamente siete millones de muertes prematuras al año en el mundo, siendo el material particulado fino(PM2.5) uno de los contaminantes más perjudiciales para la salud humana, debido a su facilidad de penetrar profundamente en el sistema respiratorio y llegar al torrente sanguíneo (OMS,2021). En este contexto, se ha identificado que el sector transporte es uno de los principales causantes de emisiones contaminantes en las ciudades, particularmente en aquellas donde la movilidad depende en gran medida del uso de vehículos impulsados por combustibles fósiles (Banco Mundial.2020).

Las Naciones Unidas, dentro del marco de los Objetivos de desarrollo sostenible (ODS), ha indicado que la transición hacia sistemas de transporte sostenibles es una necesidad indispensable para disminuir el cambio climático y mejorar la calidad de vida en las urbes, especialmente en ciudades densamente pobladas. Sin embargo, en ciudades que se encuentran en desarrollo, los sistemas de transporte masivo continúan operando con tecnologías altamente contaminantes, generando una tensión entre la necesidad de eficiencia en el transporte y la urgencia de reducir los impactos ambientales (ONU-Habitat,2022).

En el ámbito nacional, podemos decir que Colombia también enfrenta una problemática similar, particularmente en sus principales centros urbanos, las cuales se encuentran con un crecimiento acelerado frente al parque automotor y a la dependencia de combustibles fósiles, intensificando los problemas de calidad del aire. Según el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el sector transporte es el responsable de una proporción significativa de las emisiones de contaminantes en el País, especialmente las emisiones de material particulado y óxidos de nitrógeno provenientes de fuentes móviles, especialmente los que utilizan diésel (MADS, 2021).

Dentro de este contexto nacional, Bogotá, como capital del país y además de ser una de las principales metrópolis de América Latina, enfrenta una crisis ambiental asociada a la contaminación del aire causada en su mayor parte por el transporte, según el inventario de Emisiones de Bogotá, el sector transporte es responsable de aproximadamente el 70% de las emisiones de material particulado(PM2.5) en la ciudad, el contaminante más dañino para la salud humana por su capacidad de penetral en el sistema respiratorio (Secretaria Distrital de Ambiente, 2023). Por lo que se evidencia la magnitud del impacto ambiental generado por las fuentes móviles en la ciudad y resalta la necesidad de intervenir estructuralmente el sistema de movilidad.

El sistema de transporte masivo, conformado principalmente por TransMilenio, la flota zonal del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) y otros vehículos de transporte colectivo, aunque cumple un papel esencial en la movilidad diaria de millones de ciudadanos, continúan siendo vehículos que utilizan combustibles fósiles, especialmente diésel, generando emisiones significativas de contaminantes como $PM_{2.5}$, PM_{10}, óxidos de nitrógeno (NOx), dióxido de carbono (CO_2) y compuestos orgánicos volátiles, donde, estas emisiones contribuyen de manera directa al deterioro de la calidad del aire y al incremento de gases de efecto invernadero además del agravamiento de los problemas de salud pública en la ciudad (IDEAM, 2022).

Otros factores que intervienen en la contaminación ambiental y la calidad del aire son el envejecimiento de parte del parque automotor, las deficiencias en el mantenimiento mecánico de los vehículos, la congestión vehicular en los principales corredores de la ciudad y la circulación de vehículos particulares que evaden los controles ambientales exigidos para transitar. A esto se suma la limitada integración efectiva con modos de transporte más sostenibles, como la bicicleta y los sistemas de transporte no motorizados, lo que reduce la eficiencia ambiental del sistema de movilidad en su conjunto (Secretaría Distrital de Movilidad, 2022).

Si bien las autoridades distritales han implementado diversas estrategias de mitigación, como la incorporación progresiva de buses eléctricos y a gas natural, la creación de zonas de bajas emisiones y la actualización de normativas ambientales, los niveles de contaminación atmosférica continúan siendo elevados. Estudios locales señalan que en Bogotá se registran miles de muertes prematuras al año asociadas a enfermedades cardiorrespiratorias relacionadas con la exposición prolongada a contaminantes del aire provenientes principalmente de fuentes móviles (Observatorio de Salud de Bogotá – SaluData, 2022); generando una creciente preocupación entre la ciudadanía,

las autoridades y la comunidad académica, evidenciando la necesidad de fortalecer y complementar las estrategias actuales.

Bajo estas circunstancias, el problema no radica únicamente en la existencia del transporte masivo como sistema de movilidad, sino en la forma en que este opera, se gestiona y se articula con las políticas ambientales y de salud pública de la ciudad. La persistencia de altos niveles de contaminación atmosférica indica que las medidas implementadas, aunque necesarias, resultan insuficientes si no se acompañan de un análisis integral que permita identificar con mayor precisión la contribución del transporte masivo a la problemática ambiental y sustentar la formulación de estrategias más efectivas.

Por lo anterior, se hace necesario desarrollar un análisis desde un enfoque cuantitativo que permita evaluar de manera objetiva la contribución del sistema de transporte público masivo de Bogotá a los niveles de contaminación atmosférica, así como la relación existente entre las características operativas del sistema y el impacto ambiental percibido por los usuarios, siendo este un insumo fundamental para la formulación de propuestas de estrategias orientadas a la mitigación del impacto ambiental y a la transición hacia un modelo de movilidad más sostenible, que responda tanto a las necesidades de movilidad de la ciudad como a los desafíos ambientales y de salud pública que enfrenta Bogotá.

1.2. Pregunta de investigación

¿Cómo una propuesta de estrategias orientadas a la transición hacia tecnologías limpias en el sistema de transporte público masivo de Bogotá puede contribuir a la mitigación de los niveles de contaminación atmosférica generados por su operación?

1.3. Los objetivos de investigación

1.3.1. Objetivo general

Formular una propuesta de estrategias orientadas hacia la transición a tecnologías limpias y sostenibles en el sistema de transporte masivo en Bogotá, a partir del análisis cuantitativo de las falencias técnicas, operativas y ambientales de la flota actual, así como de su relación con las principales fuentes, zonas más afectadas y consecuencias ambientales y sociales.

1.3.2. Objetivos específicos

- Identificar y caracterizar los principales problemas técnicos, operativos, y ambientales de la flota que se encuentra actualmente en el sistema de transporte público masivo de la ciudad de Bogotá.
- Analizar el comportamiento y la evolución de los niveles de contaminación atmosféricos asociados al transporte público masivo de la ciudad.
- Examinar experiencias, estrategias y metodologías que se han implementado en otras ciudades y sus sistemas de transporte masivo, respecto a la reducción de emisiones y su transición a tecnologías limpias.
- Analizar desde la perspectiva cuantitativa la percepción de los usuarios del sistema de Transporte público masivo frente a la efectividad de las estrategias de mitigación ambiental actualmente implementadas.
- Proponer recomendaciones y estrategias para la implementación de sistemas de mitigación ambiental y la transición progresiva hacia tecnologías limpias y sostenibles en el sistema de transporte público masivo, orientadas a la reducción de emisiones contaminantes y al fortalecimiento de la movilidad sostenible.

1.4. Justificación de la investigación

La contaminación atmosférica se ha consolidado como uno de los principales desafíos ambientales y de salud pública en las ciudades a nivel mundial, especialmente en aquellas con alta densidad poblacional y elevada demanda de movilidad. La Organización Mundial de la Salud advierte que la exposición prolongada a contaminantes como el material particulado fino ($PM_{2.5}$), los óxidos de nitrógeno (NOx) y el dióxido de carbono (CO_2) está directamente relacionada con el incremento de enfermedades respiratorias, cardiovasculares y muertes prematuras, siendo el sector transporte una de las fuentes más relevantes de estas emisiones en los entornos urbanos (OMS, 2021). En este sentido, la transición hacia sistemas de transporte más limpios se reconoce como una prioridad dentro de las estrategias globales de mitigación del cambio climático y protección de la salud pública.

En Bogotá, esta problemática adquiere una especial relevancia debido a la magnitud del sistema de transporte público masivo y a su dependencia de tecnologías basadas en combustibles fósiles. De acuerdo con la Secretaría Distrital de Ambiente, el transporte es responsable de aproximadamente el 70 % de las emisiones de $PM_{2.5}$ en la ciudad, uno de los contaminantes más nocivo para la salud humana por su capacidad de penetración en el sistema respiratorio (SDA, 2023). A ello se suman factores como el envejecimiento de la flota, la congestión vehicular y las limitaciones en la adopción acelerada de tecnologías limpias. Adicionalmente, el Observatorio de Salud de Bogotá estima que miles de muertes prematuras que se presentan al año se encuentran asociadas a enfermedades cardiorrespiratorias relacionadas con la exposición a contaminantes del aire, evidenciando la necesidad de implementar acciones estructurales y sostenibles (SaluData, 2022).

Desde una perspectiva académica y científica, la presente investigación se justifica por su aporte al análisis cuantitativo del impacto ambiental generado por el sistema de transporte público masivo en la ciudad de Bogotá, en donde a partir del uso de los datos oficiales provenientes de entidades como la Secretaría Distrital de Ambiente, la Secretaría Distrital de Movilidad, el IDEAM y TransMilenio S.A., permite establecer relaciones objetivas entre las características técnicas y operativas de la flota, los niveles de emisión de contaminantes y su afectación, contribuyendo al fortalecimiento de la producción de conocimiento aplicado en movilidad sostenible y gestión

ambiental urbana (CEPAL, 2022; Hernández Sampieri & Mendoza, 2018). Asimismo, el estudio aporta evidencia empírica localizada que complementa los análisis nacionales sobre transición energética y descarbonización del transporte (DNP, 2022).

Desde el punto de vista práctico y aplicado, los resultados del estudio constituyen un insumo técnico para la formulación de políticas públicas y estrategias sectoriales orientadas a la reducción de emisiones en el transporte Urbano. La literatura especializada señala que las decisiones basadas en evidencia permiten mejorar la eficacia de las intervenciones ambientales y optimizar la asignación de recursos públicos (IDEAM, 2023; Secretaría Distrital de ambiente, 2023). En este contexto, la identificación de brechas tecnológicas y territoriales dentro del sistema facilita la formulación de lineamientos orientados a acelerar la transición hacia tecnologías limpias y fortalecer la gestión ambiental del sector transporte.

Finalmente, la investigación tiene una relevancia social al abordar una problemática que impacta directamente la calidad de vida de los ciudadanos, especialmente las poblaciones más vulnerables, Diversos estudios han demostrado que la contaminación del aire afecta de manera desproporcionada a poblaciones vulnerables, profundizando desigualdades en salud y bienestar (OMS, 2021; CEPAL, 2022). En consecuencia, la formulación de estrategias orientadas a la mitigación de emisiones y al fortalecimiento de la movilidad sostenible no solo responde a criterios ambientales, sino también a principios de equidad y justicia ambiental en el contexto urbano.

2. MARCO DE REFERENCIA

El presente estudio establece los fundamentos conceptuales, empíricos y normativos que sustentan la investigación la cual se encuentra orientada a la formulación de estrategias para la mitigación del impacto ambiental y la transición hacia tecnologías limpias en el sistema de transporte público masivo de Bogotá. Para ello, se estructura en tres componentes: marco de antecedentes (estado del arte), marco teórico y marco legal.

2.1. Estado del Arte

La revisión bibliográfica se realizó mediante una estrategia de búsqueda estructurada con las palabras clave: *transporte público masivo*, *contaminación atmosférica*, *tecnologías limpias*, *movilidad sostenible* y *buses eléctricos*. Se consultaron bases de datos académicas como Scopus, ScienceDirect y Google Scholar, así como repositorios institucionales de organismos internacionales y entidades oficiales. La revisión comprende estudios publicados entre 2015 y 2024, con el propósito de garantizar actualidad científica y pertinencia contextual.

A continuación, se presentan los estudios más relevantes organizados cronológicamente:

González, Martínez y Rojas (2015) analizaron la relación entre transporte urbano y emisiones contaminantes en diversas ciudades latinoamericanas. El estudio aplicó modelos de estimación de emisiones basados en factores de emisión por tipo de combustible y tecnología vehicular, complementados con análisis comparativos entre ciudades con distintos niveles de modernización tecnológica. Los resultados evidenciaron que los sistemas de buses diésel tradicionales aportan más del 60 % del $PM_{2.5}$ urbano en ciudades con alta dependencia de transporte público convencional. Asimismo, identificaron que la falta de renovación tecnológica incrementa los costos sociales asociados a enfermedades respiratorias. El estudio concluye que la modernización progresiva de flota es una medida prioritaria para reducir impactos ambientales y sanitarios, constituyendo un antecedente metodológico relevante para el presente trabajo.

La Organización Mundial de la Salud (2016) presentó el informe *Ambient Air Pollution: A Global Assessment of Exposure and Burden of Disease*, en el cual se evaluó la exposición global a contaminantes atmosféricos y su relación con la carga de enfermedad. El documento establece que el transporte urbano basado en combustibles fósiles es una de las principales fuentes de contaminación en ciudades densamente pobladas. A partir de modelos epidemiológicos y estimaciones de riesgo relativo, la OMS determinó que millones de muertes prematuras anuales están asociadas a la exposición prolongada a material particulado fino. El informe resalta la transición hacia energías limpias como estrategia central de mitigación, fortaleciendo el sustento sanitario de investigaciones orientadas a la transformación tecnológica del transporte.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (2017) evaluó políticas de movilidad urbana sostenible en la región, identificando experiencias exitosas en la implementación de zonas de bajas emisiones y programas de renovación tecnológica. El estudio adoptó un enfoque comparativo entre países, analizando marcos normativos, esquemas de financiación y resultados ambientales obtenidos. Se concluye que, aunque existen barreras institucionales y presupuestales, los beneficios ambientales y económicos de la transición superan los costos iniciales de inversión. Este análisis resulta pertinente para evaluar la viabilidad estratégica de procesos similares en el contexto bogotano.

Miller y Façanha (2018) desarrollaron un análisis global de políticas de transporte limpio, empleando metodologías de análisis de ciclo de vida para comparar tecnologías diésel y eléctricas. El estudio determinó que los buses eléctricos pueden reducir hasta en un 90 % las emisiones locales de contaminantes criterio y disminuir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero cuando la matriz energética es baja en carbono. Además, se evaluaron escenarios regulatorios y mecanismos de incentivos económicos. Este trabajo aporta evidencia cuantitativa sólida que respalda la transición tecnológica como estrategia efectiva de mitigación ambiental.

La Secretaría Distrital de Ambiente (2019), en el Inventario de Emisiones Atmosféricas de Bogotá D.C., identificó al sector transporte como la principal fuente de emisiones de $PM_{2.5}$ y NOx

en la ciudad. El documento presenta una desagregación por tipo de vehículo, tecnología y combustible, evidenciando la alta participación de fuentes móviles en la contaminación urbana. Asimismo, incluye análisis por localidades, lo que permite identificar zonas críticas con mayores concentraciones de contaminantes. Este informe constituye un referente fundamental para contextualizar territorialmente el problema abordado en la presente investigación.

Hidalgo y Huizenga (2020) analizaron experiencias de implementación de buses eléctricos en ciudades de América Latina y China, evaluando aspectos técnicos, financieros e institucionales. El estudio concluyó que la electrificación del transporte público es viable cuando existe planificación estratégica, respaldo político y esquemas de financiación adecuados. Además, se identificaron beneficios en reducción de ruido urbano y mejora en la percepción ciudadana del servicio. Este antecedente demuestra que la transición tecnológica no solo es ambientalmente favorable, sino también factible desde el punto de vista operativo.

El IDEAM (2021), en el Informe Nacional de Calidad del Aire, evidenció que las fuentes móviles continúan siendo responsables de una proporción significativa de emisiones contaminantes en las principales ciudades colombianas. El documento incluye análisis de tendencias temporales y cumplimiento de estándares nacionales de calidad del aire. Asimismo, recomienda acelerar la incorporación de tecnologías de bajas emisiones en el sector transporte. Este informe refuerza la dimensión nacional del problema y la necesidad de intervenciones estructurales.

La Organización Mundial de la Salud (2021), en las *WHO Global Air Quality Guidelines*, actualizó los límites recomendados para contaminantes como $PM_{2.5}$ y NO_2, estableciendo estándares más estrictos basados en nueva evidencia científica. Estas directrices demuestran que incluso concentraciones previamente consideradas aceptables pueden generar efectos adversos en la salud. Este marco normativo internacional fortalece la urgencia de reducir emisiones del transporte urbano.

La Universidad Nacional de Colombia (2022), a través del Observatorio de Movilidad Sostenible, analizó la percepción ciudadana sobre la calidad del aire y el transporte público en Bogotá. El estudio aplicó encuestas estructuradas y análisis estadístico descriptivo, evidenciando alta aceptación social hacia tecnologías limpias, pero también desconfianza frente a la efectividad de las medidas actuales. Este antecedente respalda la inclusión de la variable perceptual dentro del presente estudio.

SaluData (2022) cuantificó la carga de enfermedad atribuible a la contaminación atmosférica en Bogotá, estimando miles de casos de enfermedades respiratorias y cardiovasculares asociados a exposición prolongada. El estudio utilizó modelos de atribución de riesgo y análisis epidemiológico, evidenciando la dimensión social del problema. Este informe fortalece el componente sanitario del análisis propuesto.

Finalmente, la Secretaría Distrital de Ambiente (2023), en su Informe Anual de Calidad del Aire, confirmó avances parciales derivados de la incorporación de buses eléctricos, aunque señaló que los impactos aún no son suficientes para alcanzar reducciones sostenidas en toda la ciudad. El documento destaca la necesidad de fortalecer estrategias integrales que combinen modernización tecnológica, control operativo y planificación urbana.

En síntesis, la revisión evidencia que la transición hacia tecnologías limpias en el transporte público masivo es una estrategia efectiva para reducir emisiones y mejorar la salud pública. Sin embargo, se identifica un vacío en estudios aplicados específicamente al contexto bogotano que integren simultáneamente análisis cuantitativo territorial, evolución temporal reciente, percepción ciudadana y formulación estructurada de estrategias sectoriales. Este vacío justifica la pertinencia de la presente investigación.

2.2. Marco Teórico

El sistema de transporte masivo en Bogotá es esencial para la movilidad urbana, sin embargo, su operación genera impactos ambientales significativos que deben ser gestionados mediante políticas sostenibles, tecnologías limpias y planificación integral. A medida que la ciudad avanza hacia sistemas más modernos y menos contaminantes, como el metro y buses eléctricos, se espera una disminución progresiva de estos efectos negativos asociados a la contaminación atmosférica, así como garantizar una transición equitativa y eficiente.

2.2.1. Transporte Masivo Y Urbanización

El transporte masivo es un componente central en la planificación urbana sostenible y de acuerdo con la teoría del desarrollo urbano sostenible (Newman & Kenworthy, 1999), las ciudades deben promover sistemas de transporte que minimicen las emisiones contaminantes, reduzcan la dependencia del vehículo privado y mejoren la calidad de vida urbana.

En ciudades densamente pobladas como Bogotá, el sistema de transporte masivo (principalmente TransMilenio) fue implementado para responder a la creciente demanda de movilidad, mejorar la eficiencia del transporte público y reducir el impacto ambiental generado por el parque automotor tradicional.

2.2.2. Teoría Del Impacto Ambiental Del Transporte

El impacto ambiental del transporte se refiere a los efectos negativos que la operación y expansión del sistema de transporte tienen sobre el medio ambiente. Según la Agencia Europea del Medio Ambiente (EEA, 2006), estos impactos incluyen:

- Contaminación del aire (emisión de $PM_{2.5}$, NOx, CO_2).
- Ruido urbano.
- Uso intensivo de energía fósil.
- Contribución al cambio climático.

- Fragmentación del hábitat urbano.

En Bogotá, la contaminación del aire es uno de los principales problemas ambientales y de salud pública, donde el transporte aporta más del 70 % de las emisiones de material particulado fino y gases de efecto invernadero en algunas zonas críticas (Secretaría de Ambiente, 2023).

2.2.3. Movilidad Sostenible Y Transporte Limpio

La movilidad sostenible es un enfoque teórico que busca garantizar el derecho a la movilidad sin comprometer el medio ambiente ni la salud humana. Según Litman (2003), un sistema de transporte sostenible debe ser:

- Accesible.
- Eficiente.
- De baja emisión de carbono.
- Seguro para el entorno social y ecológico.

En este contexto, Bogotá ha adoptado iniciativas como la modernización tecnológica de los buses (paso de motores Euro II/III a Euro V/VI y eléctricos), estrategias de intermodalidad, y el fortalecimiento del transporte no motorizado (bicicletas, peatones) como parte del Plan de Movilidad Sostenible e Inteligente (PMSI).

2.2.4. Sistemas BRT (Bus Rapid Transit) Y Su Impacto Ambiental

TransMilenio es un sistema BRT (Bus Rapid Transit), modelo propuesto por Wright y Hook (2007), que plantea una solución de transporte masivo más económica y adaptable que el metro o el tranvía. Desde la teoría, los BRT tienen la capacidad de:

- Reducir el consumo energético por pasajero.
- Disminuir las emisiones al usar corredores exclusivos y sistemas de carga eficiente.
- Aumentar la cobertura del transporte público a sectores excluidos.

Sin embargo, la eficiencia ambiental de un BRT depende fuertemente de la tecnología del bus, la calidad del mantenimiento y el diseño de las rutas, ya que una flota antigua o con un mal mantenimiento puede generar niveles de contaminación equivalentes o incluso superiores a los del vehículo privado.

2.2.5. Salud Ambiental Y Exposición Urbana

Desde una perspectiva de salud pública, se reconoce el vínculo directo entre el uso del transporte y la exposición a contaminantes. Según la OMS (2018), la exposición prolongada a material particulado y óxidos de nitrógeno puede causar:

- Enfermedades respiratorias crónicas.
- Enfermedades cardiovasculares.
- Mayor riesgo de mortalidad prematura.

En el caso de Bogotá, estudios de la Universidad de los Andes (2019) y la Universidad de La Salle han demostrado que los usuarios de TransMilenio están expuestos a niveles de $PM_{2.5}$ dentro de los buses y en algunas estaciones excediendo hasta 5 veces los límites recomendados por la OMS.

2.2.6. Gestión Ambiental Urbana

Finalmente, desde la teoría de la gestión ambiental urbana, se promueve la integración de políticas públicas, participación ciudadana y tecnologías limpias para reducir la huella ecológica del transporte. Esto incluye:

- Implementación de indicadores de sostenibilidad.
- Sistemas de monitoreo ambiental.
- Contratación con estándares ecológicos (filtros, revisión técnico-mecánica, etc.).

TransMilenio ha incluido estos enfoques mediante programas de mantenimiento ambiental, monitoreo de emisiones y la transición progresiva hacia tecnologías menos contaminantes (TransMilenio, 2024).

Con ello, el análisis del impacto ambiental del sistema de transporte masivo en Bogotá revela una compleja relación entre la necesidad de garantizar la movilidad urbana y la urgencia de proteger el medio ambiente. Aunque el sistema de TransMilenio y el SITP han contribuido a una mayor eficiencia en el transporte de personas, también han sido fuente importante de contaminación atmosférica, ruido y alteración del entorno urbano, debido al uso de combustibles fósiles y a la alta concentración vehicular en las principales troncales.

El presente marco teórico nos permite comprender que la sostenibilidad del transporte no depende únicamente de la capacidad de movilizar grandes cantidades de usuarios, sino también de minimizar los efectos negativos sobre la salud pública y los recursos naturales, por lo cual, la transición hacia tecnologías más limpias, como buses eléctricos y la futura operación del metro, representa una oportunidad clave para mitigar dichos impactos.

Sin embargo, para llevar a cabo estos cambios se debe contar con políticas integrales de planificación urbana, educación ambiental y control de emisiones, de manera que el transporte masivo en Bogotá evolucione hacia un modelo verdaderamente sostenible, equitativo y resiliente frente a los retos del cambio climático y el crecimiento poblacional.

2.3. Marco normativo

El impacto ambiental generado por el sistema de transporte masivo en Bogotá se enmarca en un conjunto de disposiciones normativas internacionales, nacionales y distritales, orientadas a la protección del medio ambiente, la calidad del aire y la gestión de la movilidad urbana sostenible. Estas normas establecen derechos, obligaciones y lineamientos que buscan garantizar un entorno saludable, disminuir la contaminación atmosférica y promover el uso de tecnologías limpias en el transporte público.

2.3.1. Normativa Internacional

En el ámbito internacional, varios instrumentos y acuerdos orientan las políticas públicas en materia de transporte sostenible y mitigación del cambio climático:

Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS): Particularmente el ODS 11 (*Ciudades y Comunidades Sostenibles*) y el ODS 13 (*Acción por el Clima*), que promueven el desarrollo de sistemas de transporte seguros, sostenibles y accesibles, así como la reducción de emisiones contaminantes (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2015).

Acuerdo de París sobre Cambio Climático (2015): Ratificado por Colombia, compromete a los países a implementar políticas que mitiguen las emisiones de gases de efecto invernadero, donde el sector transporte es uno de los principales focos (Naciones Unidas, 2015).

Directrices de la Organización Mundial de la Salud (OMS): Establecen límites de referencia para contaminantes atmosféricos como $PM_{2.5}$ y PM_{10}, fundamentales para evaluar el impacto del transporte urbano sobre la salud pública (OMS, 2021).

2.3.2. Normativa Nacional

A nivel nacional, el marco regulatorio colombiano establece principios, límites y lineamientos que orienta la gestión ambiental del transporte:

Constitución Política de Colombia (1991): En su Artículo 79 reconoce el derecho de todas las personas a gozar de un ambiente sano y el Artículo 80 establece que el Estado planificará el manejo de los recursos naturales para garantizar su desarrollo sostenible (Constitución Política de Colombia, 1991).

Ley 99 de 1993: Crea el Ministerio del Medio Ambiente y establece principios para la protección de la diversidad e integridad ambiental, regulando la gestión de la contaminación (Congreso de la República, 1993).

Ley 1083 de 2006: Fija lineamientos para el uso racional y eficiente de la energía en el transporte urbano y la promoción de movilidad sostenible (Congreso de la República, 2006).

Resolución 909 de 2008: Define los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes para fuentes móviles, incluyendo el transporte público (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008).

Política Nacional de Calidad del Aire (2010): Busca reducir los niveles de contaminación del aire en las ciudades colombianas mediante el control de emisiones vehiculares (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

Ley 1931 de 2018: Regula la gestión del cambio climático y obliga a implementar medidas para reducir emisiones de gases de efecto invernadero en sectores estratégicos como el transporte (Congreso de la República, 2018).

Ley 1972 de 2019: Establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano y medidas para reducir las emisiones contaminantes de fuentes móviles.

Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026: Establece metas para la transición energética y la implementación de tecnologías limpias en el transporte público (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2022).

Resolución 0762 de 2022: Por la cual se reglamentan los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamentan los artículos 2.2.5.1.6.1, 2.2.5.1.8.2 y 2.2.5.1.8.3 del Decreto 1076 de 2015 y se adoptan otras disposiciones emitidas por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Ley 2294 de 2023: Fondo de Ascenso Tecnológico: Art 253 “orientada a sistemas de transporte masivo, carga liviana y volquetas, carga pesada y taxis hacia tecnologías preferiblemente de cero emisiones a través de la generación de incentivos económicos para propietarios de vehículos”.

Adicionalmente, desde el Gobierno Nacional, se ha avanzado en estructurar un esquema de incentivos a la movilidad eléctrica y sostenible, entre los que se destaca:

- Vehículos eléctricos BEV.
- Identificación de parqueaderos especiales para vehículos eléctricos Decreto 191 de 2021.

- Vehículos híbridos – HEV. Infraestructura de repostaje
- Condiciones mínimas de estandarización y de mercado para la implementación. Resolución 40223 de 2021 de Ministerio de Minas y Energías – MME.
- Programa de modernización del parque automotor de carga de más de 10,5 toneladas.
- Estrategia Nacional de Transporte Sostenible (ENTS).
- Materialización de la movilidad eléctrica.

2.3.3. Normativa Distrital

En el contexto local, Bogotá ha adoptado políticas específicas para mitigar la contaminación generada por el transporte masivo:

Acuerdo 755 de 2019: Declara la emergencia climática en Bogotá y establece la obligación de reducir emisiones mediante la promoción de energías limpias y transporte sostenible (Concejo de Bogotá, 2019).

Plan Distrital de Desarrollo 2020-2024 “Un Nuevo Contrato Social y Ambiental”: Incluye estrategias para la modernización de la flota, la incorporación de buses eléctricos y la promoción del transporte no motorizado (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2020).

Plan de Movilidad Sostenible e Inteligente (PMSI): Propone la transición progresiva hacia vehículos de cero y bajas emisiones, la reducción de contaminantes y la integración modal (Secretaría Distrital de Movilidad, 2021).

Resolución SDA 2022: Regula la creación de zonas de baja emisión para limitar el acceso a vehículos altamente contaminantes y fomentar el uso de tecnologías limpias (Secretaría Distrital de Ambiente, 2022).

Plan Distrital de Desarrollo 2024-2027 “Bogotá camina segura”: integra la acción climática como un eje central en el cual se busca reducir las emisiones y mejorar la calidad del aire, impulsando el ascenso tecnológico de la flota de Transporte Público e incluyendo la transición

hacia tecnologías más limpias, así como promover el uso de medios de transporte no motorizado y reducir el uso del vehículo privado (Alcaldía Mayor de Bogotá, 2024).

Por lo anterior, se puede evidenciar en el marco normativo la existencia de un soporte legal robusto que respalda las acciones orientadas a disminuir el impacto ambiental del transporte masivo en Bogotá. Sin embargo, la eficacia de estas disposiciones depende de su implementación y control, así como de la articulación entre las normas internacionales, nacionales y distritales con los planes de movilidad y sostenibilidad urbana.

3. METODOLOGÍA

El presente capitulo se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, el cual se caracteriza por la medición objetiva de variables y el análisis estadístico de los datos obtenidos, permitiendo identificar patrones, relaciones y tendencias asociadas al fenómeno estudiado. Este enfoque resulta pertinente para evaluar el impacto ambiental del sistema de transporte masivo de Bogotá desde la percepción de los usuarios, a partir de información cuantificable y verificable.

El estudio es de tipo descriptivo–correlacional. Es descriptivo, en tanto busca caracterizar el nivel de percepción del impacto ambiental generado por el transporte masivo; y correlacional, debido a que analiza la relación existente entre las características del sistema de transporte masivo y la percepción del impacto ambiental por parte de los usuarios.

3.1. Enfoque y alcance de la investigación

La presente investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo, dado que se orienta a la medición objetiva, el análisis estadístico y el establecimiento de relaciones entre variables asociadas al impacto ambiental generado por el sistema de transporte público masivo en la ciudad de Bogotá. Este enfoque permite obtener resultados verificables, comparables y replicables, sustentados en datos numéricos provenientes de fuentes oficiales y de instrumentos estructurados de recolección de información.

El alcance del estudio es descriptivo–correlacional. En primer lugar, presenta un alcance descriptivo, ya que permite caracterizar las condiciones ambientales y operativas del sistema de transporte público masivo en Bogotá mediante el análisis de los niveles de contaminación atmosférica, la distribución territorial de la flota según tipo de tecnología y la percepción ciudadana frente al impacto ambiental del sistema. Esta caracterización permite identificar patrones de comportamiento y condiciones relevantes para comprender la relación entre movilidad urbana y calidad del aire.

En segundo lugar, el estudio tiene un alcance correlacional, dado que busca establecer relaciones entre variables tales como el tipo de tecnología empleada en la flota del sistema (diésel, gas y eléctrico), los niveles de emisión de contaminantes atmosféricos ($PM_{2.5}$, PM_{10}, NOx y CO_2) y la percepción ciudadana frente al impacto ambiental del transporte público. Este análisis relacional permite identificar asociaciones entre las características del sistema de transporte y las condiciones ambientales registradas en la ciudad.

Es importante precisar que, aunque el desarrollo de la investigación se realizó durante el periodo comprendido entre julio de 2025 y marzo de 2026, correspondiente a las fases de Investigación I e Investigación II, el análisis de información ambiental y operativa se basa en registros correspondientes al periodo 2020–2024, ya que estos constituyen los datos oficiales más recientes disponibles en los reportes institucionales de entidades como la Secretaría Distrital de Ambiente, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la Secretaría Distrital de Movilidad y TransMilenio S.A.

Para efectos metodológicos, la investigación presenta las siguientes delimitaciones:

Temporal:

El desarrollo del estudio se realizó entre julio de 2025 y marzo de 2026, periodo correspondiente a las fases de Investigación I e Investigación II. Sin embargo, el análisis de información ambiental y operativa se basa en registros correspondientes al periodo 2020–2024, debido a la disponibilidad de datos oficiales consolidados.

Espacial:

La investigación se desarrolla en el ámbito urbano de Bogotá D.C., priorizando localidades identificadas como zonas críticas de calidad del aire, tales como Kennedy, Bosa, Puente Aranda y Suba, según reportes institucionales.

Temática:

El estudio se centra en el análisis del impacto ambiental del transporte público masivo, particularmente en relación con las emisiones contaminantes, las características técnicas y operativas de la flota y la percepción ciudadana frente a la calidad del aire y las estrategias de mitigación ambiental.

3.1.1. Alcance

- **Enfoque metodológico**

El diseño metodológico de la investigación corresponde a un estudio cuantitativo de tipo descriptivo–correlacional, el cual permite analizar de manera sistemática la relación entre las características del sistema de transporte público masivo de Bogotá y los niveles de contaminación atmosférica asociados a su operación. Este diseño resulta pertinente para el desarrollo del estudio, ya que posibilita examinar tanto las condiciones actuales del sistema de transporte como las percepciones ciudadanas frente a su impacto ambiental, aportando evidencia empírica que sustente la formulación de estrategias de mitigación ambiental.

En el componente descriptivo, la investigación se orienta a caracterizar las condiciones ambientales y operativas del sistema de transporte público masivo en Bogotá, a partir del análisis de variables como la distribución territorial de la flota, el tipo de tecnología vehicular utilizada (diésel, gas y eléctrica), los niveles de emisiones contaminantes y la percepción ciudadana frente al impacto ambiental del sistema. Esta caracterización permite identificar patrones de comportamiento y tendencias en la relación entre movilidad urbana y calidad del aire, aportando elementos de diagnóstico necesarios para la formulación de propuestas orientadas a mejorar el desempeño ambiental del sistema.

Por su parte, el componente correlacional busca identificar posibles relaciones entre variables, tales como el tipo de tecnología de la flota vehicular y los niveles de contaminación atmosférica registrados en diferentes localidades de la ciudad, así como la relación entre estos niveles de contaminación y la percepción de los usuarios frente al impacto ambiental del transporte público. Este análisis permite comprender de manera más integral las dinámicas existentes entre las condiciones operativas del sistema de transporte y las variables ambientales asociadas, contribuyendo a fundamentar la propuesta de estrategias orientadas a la reducción de emisiones y al fortalecimiento de la movilidad sostenible.

Para el desarrollo de la investigación se emplearon técnicas de recolección de información primaria y secundaria, con el propósito de obtener una visión integral del fenómeno estudiado.

En primer lugar, se realizó un análisis de datos secundarios, mediante la revisión y sistematización de información proveniente de entidades oficiales como la Secretaría Distrital de Ambiente, la Secretaría Distrital de Movilidad, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y TransMilenio S.A. Estos datos incluyen registros relacionados con los niveles de contaminación atmosférica ($PM_{2.5}$, PM_{10}, NOx y CO_2), inventarios de emisiones, reportes de calidad del aire y características técnicas de la flota del sistema de transporte público. La información recopilada permitió identificar tendencias temporales y diferencias territoriales en los niveles de contaminación asociados al transporte público masivo.

En segundo lugar, se aplicó una encuesta estructurada dirigida a usuarios del sistema de transporte público masivo, con el propósito de analizar la percepción ciudadana frente al impacto ambiental del sistema y la efectividad de las medidas de mitigación implementadas. El instrumento fue diseñado bajo una escala tipo Likert y estuvo compuesto por preguntas relacionadas con la percepción de la calidad del aire, la exposición a contaminantes durante los trayectos de viaje, la presencia de olores o material particulado en estaciones y buses, y la aceptación de tecnologías limpias como los buses eléctricos.

La aplicación de la encuesta permitió obtener información directa de los usuarios del sistema, lo cual constituye un complemento relevante al análisis de datos ambientales y operativos, al integrar la dimensión social de la problemática estudiada.

Posteriormente, la información recolectada fue analizada mediante herramientas de estadística descriptiva, apoyadas en el uso de programas informáticos como Microsoft Excel. Este análisis permitió calcular frecuencias, porcentajes y tendencias de comportamiento en las respuestas de los encuestados, así como identificar patrones en la relación entre las variables ambientales y operativas analizadas.

Finalmente, los resultados obtenidos a partir del análisis de la información secundaria y de la encuesta aplicada fueron integrados para sustentar la formulación de una propuesta de estrategias orientadas a la mitigación del impacto ambiental del transporte público masivo en Bogotá, con énfasis en la transición hacia tecnologías limpias, la optimización operativa del sistema y el fortalecimiento de la gestión ambiental del sector transporte.

3.2. Población y muestra

La población objeto de estudio se estructura a partir de tres componentes analíticos complementarios: datos ambientales, datos de movilidad y percepción ciudadana, lo que permite un abordaje integral del impacto ambiental asociado al sistema de transporte público masivo en la ciudad de Bogotá.:

3.2.1. Datos ambientales.

El componente ambiental está conformado por registros secundarios de monitoreo de la calidad del aire en Bogotá, correspondientes a concentraciones de contaminantes atmosféricos criterio, específicamente material particulado $PM_{2.5}$ y PM_{10}, óxidos de nitrógeno (NOx) y dióxido de carbono (CO_2), para el periodo comprendido entre 2020 y 2024.

Estos datos provienen de fuentes oficiales y técnicamente validadas, tales como el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), a través de sus redes de monitoreo, informes anuales de calidad del aire, inventarios de emisiones y visores geográficos ambientales.

Las estaciones de monitoreo que se encuentran ubicadas en las localidades de Bogotá permiten analizar la variabilidad espacial de los contaminantes en zonas con diferentes características urbanas y de movilidad, tal como se evidencia en los mapas y reportes oficiales del sistema de información ambiental de Bogotá (IBOCA). Ver Figura de 1 a 4.

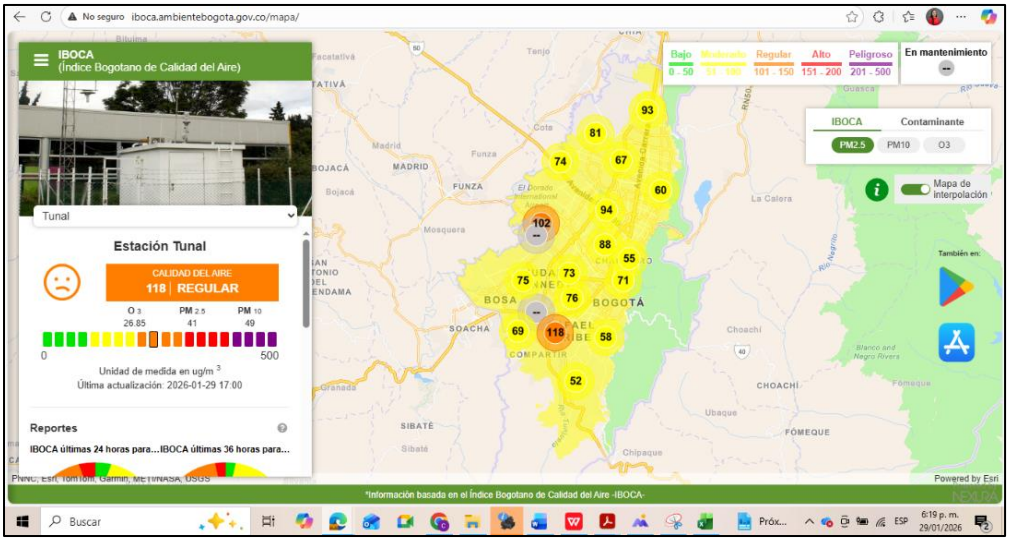


Figura 1 . *Estación Tunal y mapa de calidad del aire Bogotá*

Nota: Tomado de *Sistema de información Ambiental de Bogotá-IBOCA*, Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). http://iboca.ambientebogota.gov.co/mapa

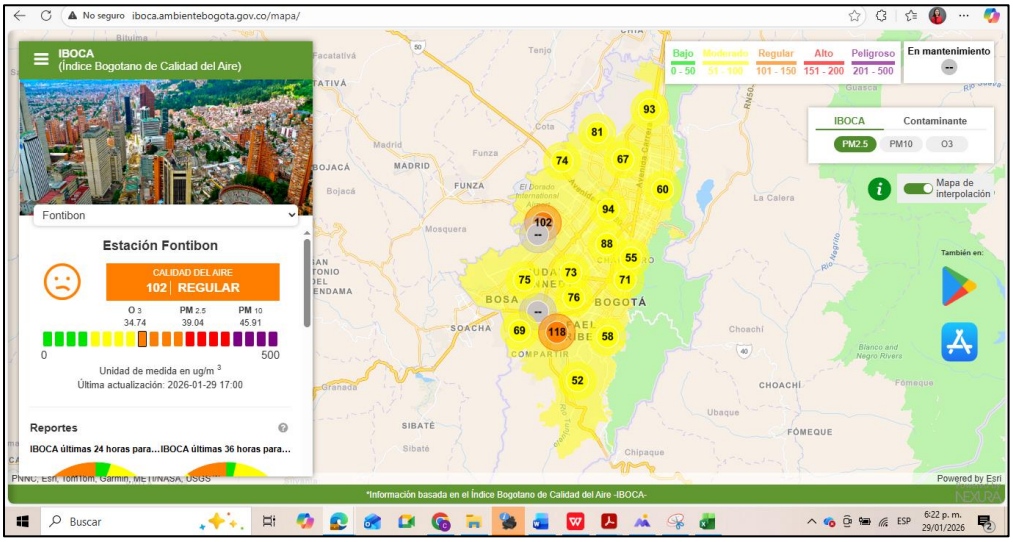
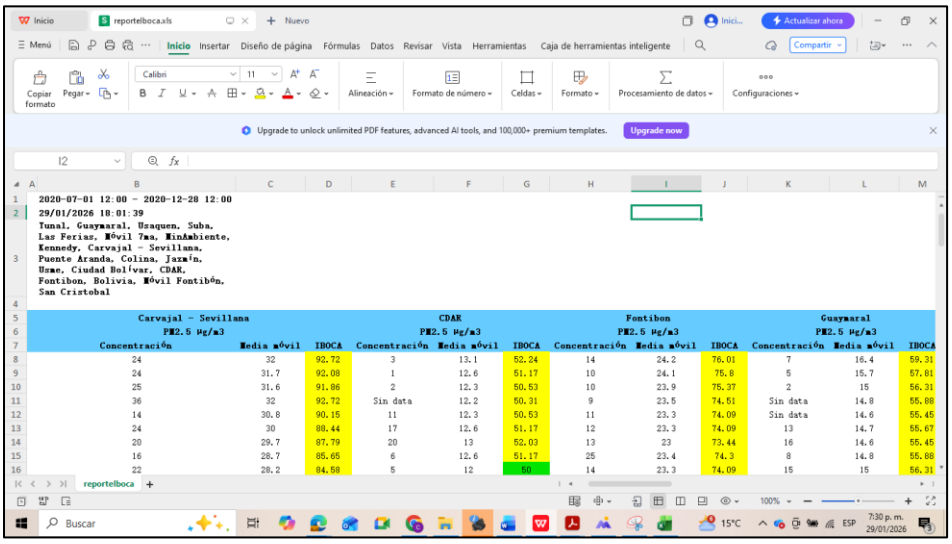


Figura 2. *Estación Fontibón y mapa de calidad del aire Bogotá*

Nota: Tomado de *Sistema de información Ambiental de Bogotá - IBOCA*, Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). http://iboca.ambientebogota.gov.co/mapa/



2020-07-01 12:00 - 2020-12-28 12:00
29/01/2026 18:01:39
Tunal, Guaymaral, Usaquen, Suba, Las Ferias, Móvil 7ma, MinAmbiente, Kennedy, Carvajal - Sevillana, Puente Aranda, Colina, Jazmín, Usme, Ciudad Bolívar, CDAR, Fontibon, Bolivia, Móvil Fontibón, San Cristobal

Carvajal - Sevillana PM2.5 µg/m3			CDAR PM2.5 µg/m3			Fontibon PM2.5 µg/m3			Guaymaral PM2.5 µg/m3		
Concentración	Media móvil	IBOCA	Concentración	Media móvil	IBOCA	Concentración	Media móvil	IBOCA	Concentración	Media móvil	IBOCA
24	32	92.72	3	13.1	52.24	14	24.2	76.01	7	16.4	59.31
24	31.7	92.08	1	12.6	51.17	10	24.1	75.8	5	15.7	57.81
25	31.6	91.86	2	12.3	50.53	10	23.9	75.37	2	15	56.31
36	32	92.72	Sin data	12.2	50.31	9	23.5	74.51	Sin data	14.8	55.88
14	30.8	90.15	11	12.3	50.53	11	23.3	74.09	Sin data	14.6	55.45
24	30	88.44	17	12.6	51.17	12	23.3	74.09	13	14.7	55.67
20	29.7	87.79	20	13	52.03	13	23	73.44	16	14.6	55.45
16	28.7	85.65	6	12.6	51.17	25	23.4	74.3	8	14.8	55.88
22	28.2	84.58	5	12	50	14	23.3	74.09	15	15	56.31

Figura 3 *Reporte de concentración $PM_{2.5}$. en Bogotá*

Nota: Tomado de *Consulta de datos de calidad del aire*, Secretaría Distrital de Ambiente (SDA). http://iboca.ambientebogota.gov.co/publicaciones/176/consulta-de-datos/

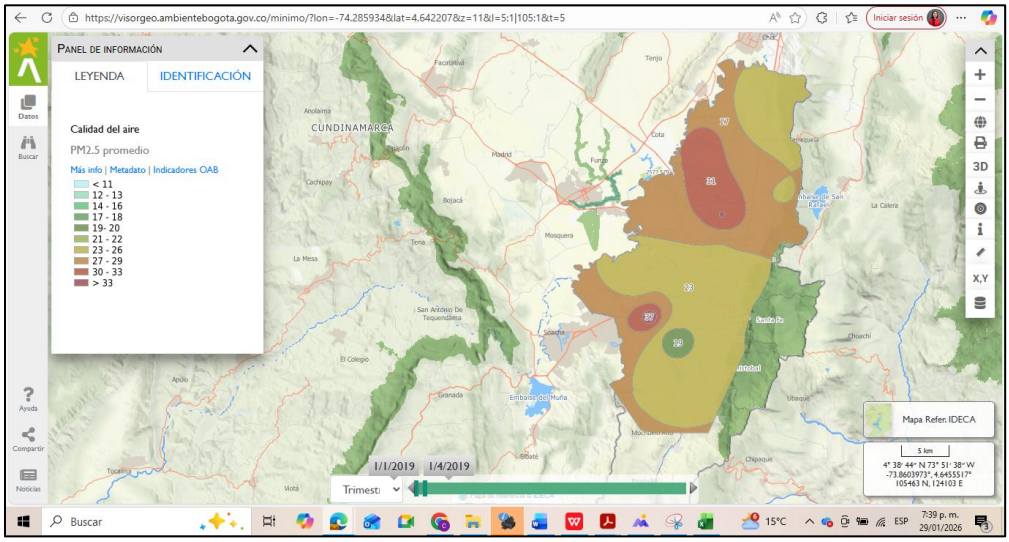


Figura 4 *Visor geográfico ambiental*. Niveles de $PM_{2.5}$.

Nota: tomado de *Visor geográfico ambiental*, Secretaría Distrital de Ambiente (SDA).

3.2.2. Datos de movilidad.

El componente de movilidad se compone de información secundaria relacionada con la flota de buses del sistema TransMilenio y del Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) durante el periodo 2020–2024. Se consideran variables como tipo de flota, tecnología vehicular, número de buses y operación por componente (troncal, zonal y provisional).

La información es suministrada por la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) y TRANSMILENIO S.A., entidades responsables de la planeación, regulación y operación del transporte público en Bogotá. Estos datos permiten establecer relaciones analíticas entre las características del sistema de transporte masivo y los niveles de contaminación atmosférica registrados, aportando un sustento técnico al análisis ambiental del estudio. Ver Imagen 5.

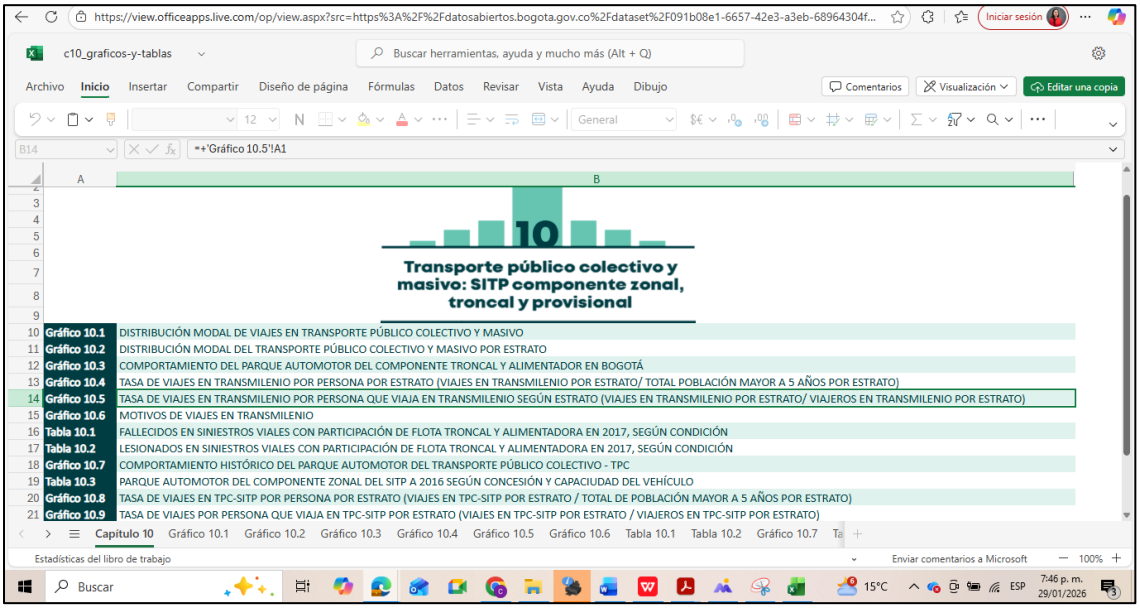


Figura 5 *Transporte público colectivo y masivo: SITP Componente zonal, troncal y provisional*.

Nota. Tomado *del Informe de la Secretaría Distrital de Movilidad* (SDM).

3.2.3. Ciudadanía.

El componente perceptual está constituido por usuarios frecuentes del sistema de transporte público de Bogotá, específicamente personas que utilizan de manera regular TransMilenio y el

SITP, incluyendo estudiantes del programa de Especialización en Gerencia de Proyectos de la Corporación Universitaria Minuto de Dios que cumplen con dicho criterio. Este grupo poblacional resulta pertinente dado su contacto continuo con el sistema de transporte y su capacidad para valorar el impacto ambiental asociado a su operación.

3.2.4. Definición de la población

Para la medición de la percepción del impacto ambiental, se seleccionó una muestra no probabilística por conveniencia, conformada por 40 usuarios frecuentes del sistema de transporte masivo. Este tipo de muestreo resulta adecuado para estudios exploratorios y descriptivos con enfoque aplicado, en los que se prioriza el acceso a participantes con experiencia directa en el fenómeno de estudio.

Previo a la aplicación definitiva del instrumento, se llevará a cabo una prueba piloto con 22 participantes, cuyo propósito será evaluar la claridad, pertinencia y coherencia de los ítems, así como estimar la confiabilidad interna del instrumento mediante el coeficiente alfa de Cronbach. Este procedimiento permitirá realizar los ajustes necesarios antes de la recolección final de datos, fortaleciendo la validez metodológica del estudio.

$$\alpha = \frac{n}{n-1}\left(1 - \frac{\sum V_i}{V_T}\right)$$

Donde:

- n es el número de ítems en la escala.
- V_i es la varianza de cada ítem.
- V_T es la varianza total de la escala.

3.3. Instrumento

Para el desarrollo de la investigación se emplearán dos instrumentos principales de recolección de información: (i) la revisión documental sistemática y (ii) una encuesta (Anexo C) estructurada aplicada a usuarios del sistema de transporte público. Ambos instrumentos se diseñan desde un enfoque cuantitativo y permiten recopilar información objetiva y perceptual que sustenta la formulación de estrategias de mitigación ambiental en el sistema de transporte masivo de Bogotá.

3.3.1. Bases de datos oficiales.

La revisión documental constituye un instrumento de carácter secundario, orientado a la recopilación, organización y análisis sistemático de información oficial relacionada con calidad del aire, emisiones atmosféricas y características operativas del sistema de transporte masivo en Bogotá. Este instrumento se basa en el análisis de documentos técnicos, informes institucionales, inventarios de emisiones y bases de datos oficiales, garantizando la validez, confiabilidad y trazabilidad de la información empleada.

Para el registro y análisis de la información se utilizará una matriz de revisión documental, diseñada específicamente para esta investigación, que permitirá estandarizar la extracción de datos y facilitar la comparación temporal y espacial de los indicadores ambientales y operativos.

Información que se espera recolectar

A partir de la aplicación de este instrumento se espera recolectar información cuantitativa relacionada con:

- Concentraciones de contaminantes atmosféricos ($PM_{2.5}$, PM_{10}, NOx y CO_2).
- Participación del sector transporte en las emisiones totales de la ciudad.
- Evolución de la flota vehicular del sistema de transporte masivo según tipo de tecnología (diésel, eléctrico, híbrido).
- Distribución espacial de los contaminantes en zonas críticas de Bogotá.

- Medidas y programas institucionales orientados a la mitigación de emisiones.

Elementos asociados al instrumento

El instrumento se materializa mediante una matriz de revisión documental, la cual incluye, entre otros, los siguientes campos:

- Entidad
- Tipo de documento
- Año de publicación
- Variable ambiental u operativa analizada
- Indicadores reportados
- Principales hallazgos
- Observaciones relevantes para la mitigación ambiental

Las fuentes documentales consideradas se presentan en la Tabla 1 y corresponden a:

.

Entidad	Tipo de información	Periodo	Enlace
Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)	Registros de calidad del aire ($PM_{2.5}$, PM_{10}, NOx, CO_2)	2020–2024	| Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
Secretaría Distrital de Ambiente (SDA)	Informes de calidad del aire e inventarios de emisiones	2020–2024	Informes Anuales de Calidad del Aire de Bogotá (2020-2023) » Observatorio Ambiental de Bogotá
Secretaría Distrital de Movilidad (SDM)	Información sobre flota, tecnología y número de buses	2020–2024	Observatorio de Movilidad. Bogotá. D.C - Conjunto de datos - Datos Abiertos Bogotá

TransMilenio S.A.	Datos operativos del sistema de transporte masivo	2020–2024	TransMilenio - Gestión ambiental de TransMilenio

Tabla 1 . *fuente de información documental*. Elaboración propia.

Nota. La Matriz de información consolidada se presenta en el Anexo A.

3.3.2. Encuestas estructuradas.

La encuesta estructurada constituye un instrumento de recolección de información primaria, diseñado bajo un enfoque cuantitativo, con el propósito de identificar la percepción de los usuarios del sistema de transporte público masivo de Bogotá frente al impacto ambiental generado por su operación, así como su nivel de aceptación y disposición frente a estrategias de mitigación ambiental y transición hacia tecnologías limpias.

El instrumento fue implementado mediante la plataforma Google Forms, lo que facilita la estandarización de las respuestas, la recolección eficiente de datos y su posterior procesamiento estadístico. La encuesta (Anexo C) está compuesta principalmente por preguntas cerradas, utilizando una escala tipo Likert de cinco niveles, según corresponda a cada dimensión (por ejemplo: 1 = Nada / Totalmente en desacuerdo y 5 = Mucho / Totalmente de acuerdo).

El tiempo estimado de respuesta es de 8 a 10 minutos, y está dirigida a usuarios mayores de 18 años del sistema TransMilenio y SITP en Bogotá D.C. La participación es voluntaria, anónima y precedida por un consentimiento informado, garantizando el cumplimiento de principios éticos de la investigación.

Previo a su aplicación definitiva, la encuesta será sometida a una prueba piloto, con el fin de evaluar la claridad de las preguntas, la coherencia interna del instrumento y su confiabilidad.

Información que se espera recolectar

A través de la aplicación de la encuesta (Anexo C) se espera recolectar información cuantificable relacionada con:

- La percepción de los usuarios sobre la contribución del transporte masivo a la contaminación atmosférica.
- El nivel de exposición percibida a contaminantes durante el uso del sistema (olor a diésel, material particulado, ventilación).
- La percepción de la calidad del aire en estaciones, paraderos y zonas de residencia.
- El impacto percibido en la salud y la calidad de vida asociado al uso del transporte masivo.
- El grado de conocimiento y aceptación de tecnologías limpias, como los buses eléctricos.
- La opinión frente a políticas y estrategias de mitigación ambiental.
- La disposición de los usuarios a apoyar cambios en hábitos de movilidad sostenible.

Elementos asociados al instrumento

El instrumento está conformado por un total de 21 preguntas, organizadas en seis (6) dimensiones, las cuales permiten un análisis estructurado de la información recolectada:

- Consentimiento informado

Aceptación voluntaria de participación en la investigación (1 pregunta).

- Caracterización del encuestado y patrones de movilidad

Edad, género, localidad de residencia, frecuencia de uso del sistema, tiempo promedio de viaje y corredores utilizados (6 preguntas).

- Exposición percibida a contaminantes

Presencia de olores, material particulado y condiciones de ventilación en buses y estaciones (5 preguntas).

- Percepción de la calidad del aire

Evaluación de la calidad del aire en zonas de residencia, estaciones y paraderos (2 preguntas).

- Impacto en salud percibido

Síntomas respiratorios y consultas médicas asociadas al uso del transporte masivo (2 preguntas).

- Medidas, políticas y disposición al cambio

Opinión sobre buses eléctricos, controles a emisiones, renovación de flota y disposición a prácticas de movilidad sostenible (5 preguntas).

El cuestionario completo, con el texto literal de cada pregunta y sus opciones de respuesta, se presenta en los Anexos, garantizando la transparencia metodológica y la replicabilidad del estudio.

3.4. Descripción de procedimientos

El desarrollo de la investigación se llevará a cabo mediante un diseño metodológico estructurado en fases secuenciales, que permiten garantizar la coherencia entre los objetivos planteados, los instrumentos de recolección de información y las técnicas de análisis de datos. A continuación, se describen de manera precisa los procedimientos que se seguirán para el levantamiento de la información.

Fase 1. Planeación y delimitación del estudio

En esta fase se realizará la definición operativa del problema de investigación, la delimitación temporal y espacial del estudio (Bogotá D.C., periodo 2020–2024) y la identificación de las variables ambientales, de movilidad y de percepción ciudadana. Asimismo, se establecerá la correspondencia entre los objetivos específicos y los indicadores a medir, asegurando la consistencia metodológica del estudio.

Como resultado de esta fase, se consolidará el diseño del instrumento de recolección de información y el plan de análisis estadístico.

Fase 2. Recolección de información secundaria

La información secundaria será recolectada a partir de bases de datos oficiales suministradas por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) y TRANSMILENIO S.A.

Esta actividad se desarrollará de manera documental, mediante la consulta de informes técnicos, inventarios de emisiones, registros históricos de calidad del aire y reportes operativos del sistema de transporte público. No se requerirán autorizaciones especiales, dado que los datos son de carácter público y de acceso abierto. El tiempo estimado para esta fase es de dos semanas, durante las cuales se realizará la descarga, depuración y organización de la información en matrices de análisis.

Fase 3. Diseño del instrumento de recolección primaria

En esta fase se diseñará una encuesta estructurada con escala tipo Likert de cinco niveles, orientada a medir la percepción de los usuarios sobre el impacto ambiental del sistema de transporte masivo. Los ítems serán formulados a partir de los objetivos específicos y de los principales componentes del impacto ambiental identificados en la revisión teórica y normativa.

El instrumento será revisado en términos de claridad semántica, pertinencia conceptual y coherencia interna, con el fin de garantizar su validez de contenido. El tiempo estimado para esta fase es de una semana.

Fase 4. Prueba piloto y validación del instrumento

Previo a la aplicación definitiva, se llevará a cabo una prueba piloto con un grupo de 22 participantes, seleccionados bajo los mismos criterios de la muestra final. Esta prueba tendrá como finalidad evaluar la comprensión de los ítems, el tiempo de diligenciamiento del instrumento y la consistencia interna de la escala.

Con los datos obtenidos se calculará el coeficiente alfa de Cronbach, utilizando Microsoft Excel, lo que permitirá determinar el nivel de confiabilidad del instrumento. En caso de identificarse ítems con baja correlación, se realizarán los ajustes necesarios antes de la aplicación final. Esta fase tendrá una duración aproximada de una semana.

Fase 5. Aplicación del instrumento a la muestra definitiva

Una vez validado el instrumento, se procederá a la aplicación de la encuesta a la muestra definitiva de 30 usuarios frecuentes del sistema de transporte masivo. La recolección de la información se realizará de manera virtual o presencial, según la disponibilidad de los participantes, en espacios asociados al uso del transporte público o en entornos académicos.

Antes de la aplicación, se informará a los participantes sobre el propósito del estudio y se garantizará su consentimiento informado, sin requerir autorizaciones institucionales adicionales, dado el carácter académico y voluntario del estudio. El tiempo estimado de diligenciamiento por participante será de 8 a 10 minutos, y la fase tendrá una duración aproximada de dos semanas.

Fase 6. Sistematización y procesamiento de la información

Los datos recolectados, tanto secundarios como primarios, serán organizados y sistematizados en matrices de análisis en Microsoft Excel. Se realizará la codificación de las variables, la verificación de consistencia de los datos y la depuración de posibles errores, garantizando la calidad y confiabilidad de la información.

Esta fase se desarrollará en un periodo estimado de una semana.

Fase 7. Análisis estadístico e interpretación de resultados

Finalmente, se llevará a cabo el análisis estadístico de la información mediante técnicas de estadística descriptiva, análisis de confiabilidad, correlación de variables y análisis comparativo entre zonas con diferentes niveles de contaminación. Los resultados serán interpretados de manera crítica, relacionándolos con los objetivos del estudio y con los hallazgos de investigaciones previas.

Como producto de esta fase se elaborarán tablas y representaciones gráficas que faciliten la interpretación de los resultados y sustenten las conclusiones del estudio. El tiempo estimado para esta fase es de dos semanas.

3.5. Análisis de información

El análisis de la información se desarrollará bajo un enfoque cuantitativo, diferenciando los procedimientos según el tipo de instrumento de recolección de información utilizado: revisión documental (información secundaria) y encuesta estructurada (información primaria). El proceso analítico se llevará a cabo de manera secuencial, garantizando la limpieza, organización, codificación y análisis de los datos, en coherencia con los objetivos específicos de la investigación y orientado a la formulación de una propuesta de estrategias de mitigación ambiental para el sistema de transporte masivo de Bogotá.

3.5.1. Limpieza, organización y preparación de los datos

a. Información secundaria - revisión documental

Los datos ambientales y operativos obtenidos de fuentes oficiales (IDEAM, SDA, SDM y TransMilenio S.A.) serán sometidos a un proceso de depuración y estandarización, el cual incluirá:

Verificación de consistencia temporal (periodo 2020–2024).

Homologación de unidades de medida (µg/m³, toneladas/año, número de vehículos).

Eliminación de registros incompletos o duplicados.

Organización de la información en matrices de revisión documental, estructuradas por fuente, variable, año, zona geográfica y objetivo específico asociado.

Este proceso permitirá garantizar la comparabilidad de la información y su adecuada preparación para el análisis estadístico.

b. Información primaria - encuesta estructurada

Los datos provenientes de la encuesta serán revisados para identificar:

Encuestas incompletas o inconsistentes.

Valores atípicos o errores de digitación.

Coherencia interna de las respuestas.

Posteriormente, las respuestas serán organizadas en una base de datos estructurada en Microsoft Excel.

3.5.2. Codificación de la Información.

a. Codificación de datos secundarios

Los datos documentales, aunque de naturaleza cuantitativa, serán clasificados y categorizados según:

Tipo de contaminante ($PM_{2.5}$, PM_{10}, NOx, CO_2).

Tipo de flota (diésel, gas, eléctrica).

Zona de operación (localidades priorizadas).

Año de registro.

Esta codificación permitirá cruzar la información ambiental y operativa con los objetivos específicos, facilitando el análisis comparativo y la identificación de tendencias relevantes para la formulación de estrategias de mitigación.

b. Codificación de datos de la encuesta

Las respuestas de la encuesta estructurada serán codificadas numéricamente de acuerdo con la escala tipo Likert establecida:

1 = Totalmente en desacuerdo

2 = En desacuerdo

3 = Ni de acuerdo ni en desacuerdo

4 = De acuerdo

5 = Totalmente de acuerdo

Las variables se agruparán en dimensiones analíticas, tales como percepción de la calidad del aire, impacto ambiental del transporte, conocimiento sobre tecnologías limpias y aceptación de estrategias de mitigación. Esta codificación permitirá operar estadísticamente los datos y relacionarlos con los objetivos del estudio.

3.5.3. Análisis de la información según el instrumento

a. Análisis de la información secundaria

Para la información secundaria se realizará:

- Análisis descriptivo de los niveles de contaminación atmosférica en el periodo 2020–2024.
- Análisis comparativo entre zonas de la ciudad con diferentes niveles de calidad del aire.
- Análisis de tendencias asociadas a la incorporación de tecnologías limpias en la flota del sistema de transporte masivo.

Este análisis permitirá identificar patrones ambientales y operativos que sirvan como base para la formulación de propuestas de mitigación ambiental, en coherencia con los objetivos específicos.

3.5.3.1. Análisis de la información primaria

Los datos obtenidos de la encuesta serán analizados mediante:

- Estadística descriptiva (frecuencias, promedios y desviación estándar).
- Análisis de confiabilidad del instrumento mediante el coeficiente alfa de Cronbach.
- Análisis correlacional entre variables de percepción ambiental, conocimiento sobre tecnologías limpias y aceptación de estrategias de mitigación.

Este análisis permitirá comprender la percepción y disposición de los usuarios frente a las estrategias de mitigación ambiental, información clave para sustentar la propuesta del estudio.

3.5.4. Software utilizado para el análisis

El procesamiento y análisis de la información se realizará utilizando el software **Microsoft Excel**, el cual permitirá:

- La organización y sistematización de bases de datos.
- La codificación de variables.
- El cálculo de estadísticos descriptivos y coeficientes de confiabilidad.
- La elaboración de tablas y gráficos para la presentación de los análisis.

3.5.5. Presentación de los análisis

Los resultados del análisis de la información se presentarán mediante:

- **Tablas estadísticas** (frecuencias, promedios, comparaciones temporales).
- **Gráficos** (barras, líneas y columnas) para la visualización de tendencias y relaciones.
- **Mapas y esquemas** provenientes de fuentes oficiales para ilustrar la distribución espacial de la contaminación atmosférica.

3.6. Consideraciones éticas

3.6.1. Análisis de consideraciones éticas

El desarrollo del presente proyecto de investigación se rige por los principios éticos establecidos por la Corporación Universitaria Minuto de Dios (UNIMINUTO), así como por los estándares éticos generalmente aceptados en la investigación científica, en especial aquellos aplicables a estudios de enfoque cuantitativo con participación de personas y uso de información institucional.

Dado que la investigación contempla la recolección de información primaria mediante la aplicación de encuestas a usuarios del sistema de transporte masivo, así como el análisis de información secundaria proveniente de entidades oficiales, se adoptan los siguientes principios éticos fundamentales:

- **Respeto por las personas y participación voluntaria**

La participación de los encuestados será completamente voluntaria, sin ningún tipo de presión o incentivo que pueda condicionar su decisión. Antes de diligenciar el instrumento, los participantes serán informados de manera clara sobre los objetivos del estudio, el uso académico de la información y su derecho a abstenerse o retirarse en cualquier momento sin consecuencias.

- **Consentimiento informado**

Se garantizará que todos los participantes otorguen su consentimiento informado, libre y consciente, previo a la aplicación de la encuesta. Este consentimiento se obtendrá mediante un formato explícito de aceptación de participación, en el cual se detallan las condiciones del estudio y el tratamiento de la información.

- **Confidencialidad y anonimato**

La información recolectada será tratada bajo criterios estrictos de confidencialidad. No se solicitarán datos personales sensibles ni información que permita la identificación directa de los participantes. Los resultados se presentarán de forma agregada, evitando cualquier referencia

individual, en cumplimiento de los principios de protección de datos personales y ética investigativa.

- **Uso responsable de la información**

Los datos obtenidos, tanto primarios como secundarios, serán utilizados exclusivamente con fines académicos e investigativos, en el marco del presente proyecto. En ningún caso la información recolectada será empleada para evaluaciones individuales, fines comerciales, administrativos o de control. La información secundaria proveniente de entidades públicas será utilizada respetando los lineamientos de datos abiertos, citando adecuadamente las fuentes y reconociendo la propiedad institucional de los datos.

- **Consideraciones éticas frente a las organizaciones**

En relación con las entidades involucradas (IDEAM, Secretaría Distrital de Ambiente, Secretaría Distrital de Movilidad y TRANSMILENIO S.A.), el estudio se fundamenta únicamente en información de acceso público, informes técnicos y bases de datos oficiales, sin acceder a información reservada o confidencial. El análisis se realizará de manera objetiva, técnica y respetuosa, evitando juicios de valor institucionales y garantizando un tratamiento ético y responsable de la información organizacional.

- **Clasificación del riesgo de la investigación**

De acuerdo con la naturaleza del estudio y los procedimientos metodológicos empleados, el proyecto se clasifica como una investigación de riesgo mínimo, dado que no implica intervenciones, manipulaciones experimentales ni afectaciones físicas, psicológicas o sociales sobre la población participante, limitándose a la recolección de percepciones mediante un instrumento estructurado.

3.6.2. Instrumentos de aceptación y autorización

Para la recolección de información primaria se utilizará un formato de consentimiento informado, el cual será presentado a los participantes antes de la aplicación de la encuesta. Este formato hace parte integral del instrumento y se encuentra incorporado al inicio del cuestionario.

El instrumento de encuesta está conformado por preguntas cerradas con escala tipo Likert de cinco niveles (1 = totalmente en desacuerdo, 5 = totalmente de acuerdo) y se estructura en las siguientes dimensiones:

- Caracterización general del encuestado (frecuencia de uso del transporte público).
- Percepción de la calidad del aire en Bogotá.
- Percepción del impacto ambiental del transporte masivo.
- Conocimiento y aceptación de tecnologías limpias en el transporte público.
- Opinión frente a estrategias de mitigación ambiental (buses eléctricos, zonas de bajas emisiones, renovación de flota).

El contenido completo del instrumento, así como el formato de consentimiento informado (Anexo B), se presentan de manera textual en los Anexos del informe final.

4. HIPÓTESIS

En coherencia con el enfoque cuantitativo de la investigación y con el objetivo central de formular una propuesta de estrategias de mitigación ambiental y transición hacia tecnologías limpias en el sistema de transporte masivo de Bogotá, se plantean las siguientes hipótesis, orientadas a evaluar la viabilidad, pertinencia y aceptación de dichas estrategias, a partir del análisis de información objetiva y perceptual.

4.1. Hipótesis general

H_1: La formulación de una propuesta de estrategias orientadas a la transición hacia tecnologías limpias y a la mitigación ambiental en el sistema de transporte masivo de Bogotá se sustenta de manera significativa en la identificación cuantitativa de las falencias de la flota actual y en la percepción favorable de los usuarios frente a dichas estrategias.

H_0 (Hipótesis nula): La formulación de una propuesta de estrategias de mitigación ambiental y transición hacia tecnologías limpias en el sistema de transporte masivo de Bogotá no presenta sustento significativo en la información cuantitativa analizada ni en la percepción de los usuarios.

4.2. Hipótesis específicas

H_{11}: La identificación de falencias operativas y tecnológicas de la flota actual del transporte masivo permite sustentar la pertinencia de estrategias de mitigación ambiental y transición hacia tecnologías limpias.

H_{12}: La información cuantitativa sobre emisiones y calidad del aire constituye un insumo significativo para la formulación de estrategias de mitigación ambiental en el sistema de transporte masivo.

H_{13}: Existe una relación significativa entre el nivel de conocimiento de los usuarios sobre tecnologías limpias y su aceptación de las estrategias de mitigación ambiental propuestas.

H_{14}: La percepción de los usuarios sobre los efectos ambientales del transporte masivo influye significativamente en su disposición a apoyar la implementación de estrategias de movilidad sostenible.

H_{01} (Hipótesis nula específica): La información cuantitativa y la percepción de los usuarios no influyen de manera significativa en la formulación y aceptación de estrategias de mitigación ambiental y transición tecnológica en el sistema de transporte masivo.

Se aclara que las hipótesis aquí formuladas no buscan explicar de manera causal los impactos ambientales del transporte masivo, sino evaluar el sustento técnico y social de una propuesta de mitigación, utilizando análisis estadístico descriptivo y correlacional aplicado a datos secundarios oficiales y a la información primaria recolectada mediante encuesta estructurada.

4.3. Las variables

Las variables del estudio se definen en coherencia con los objetivos específicos y las hipótesis planteadas. Se identifican variables independientes y dependientes, entendidas como atributos medibles que pueden variar y ser analizados estadísticamente.

4.3.1. Variable(s) independiente(s)

Las variables independientes corresponden a los factores técnicos, ambientales y operativos que constituyen el contexto objetivo sobre el cual se formula la propuesta de mitigación, y que influyen en la percepción y aceptación de estrategias sostenibles.

- **Características del sistema de transporte público masivo**

Hace referencia a los atributos estructurales y operativos del sistema TransMilenio y SITP durante el periodo de estudio. Esta variable se operacionaliza a través de los siguientes indicadores:

- Tipo de flota (diésel, gas, eléctrica, híbrida).
- Tecnología vehicular.
- Número de buses en operación.

- Componente del sistema (troncal, zonal y provisional).
- Zona de operación.

Esta información será obtenida a partir de registros oficiales de la Secretaría Distrital de Movilidad y TRANSMILENIO S.A.

- **Niveles de contaminación atmosférica**

Corresponde a las concentraciones de contaminantes criterio registrados en la ciudad de Bogotá durante el periodo 2020–2024, los cuales permiten caracterizar el contexto ambiental asociado al sistema de transporte masivo y sustentar técnicamente la necesidad de estrategias de mitigación ambiental, tales como:

- Concentración de $PM_{2.5}$.
- Concentración de PM_{10}.
- Concentración de NOx.
- Concentración de CO_2.

Estos datos provienen de los sistemas de monitoreo del IDEAM y la Secretaría Distrital de Ambiente, y se consideran variables independientes en el análisis correlacional respecto a la percepción ciudadana.

4.3.2. Variable(s) dependiente(s)

Las variables dependientes representan los resultados asociados a la valoración social y aceptación de las estrategias de mitigación ambiental y transición tecnológica, las cuales dependen de las condiciones técnicas y ambientales previamente descritas.

- Percepción del impacto ambiental del sistema de transporte masivo y aceptación de estrategias de mitigación

Esta variable hace referencia a la valoración que realizan los usuarios del sistema de transporte público frente a los efectos ambientales del transporte masivo y su disposición a aceptar e impulsar estrategias de mitigación y tecnologías limpias.

Se medirá mediante una encuesta estructurada con escala tipo Likert de cinco niveles y se operacionaliza a través de las siguientes dimensiones:

Percepción de la contribución del transporte público a la contaminación del aire.

Percepción de los efectos del transporte sobre la calidad ambiental urbana y la salud.

Valoración de la tecnología de la flota en relación con el cuidado ambiental.

Nivel de conocimiento sobre tecnologías limpias en el transporte público.

Aceptación y apoyo a estrategias de mitigación ambiental y movilidad sostenible.

La información será recolectada directamente de los usuarios del sistema de transporte masivo y analizada mediante estadística descriptiva y correlacional.

Con el fin de garantizar la coherencia entre los objetivos específicos, las hipótesis, los instrumentos de recolección de información y las técnicas de análisis, a continuación, se presenta la tabla de operacionalización de las variables del estudio.

Variable	Tipo de variable	Dimensión	Indicador	Instrumento	Técnica de análisis	Objetivo específico asociado
Características del sistema de transporte público masivo	Independiente	Tecnología de la flota	Tipo de flota (diésel, gas, eléctrica, híbrida)	Revisión documental (matriz de revisión)	Estadística descriptiva	Identificar las falencias y necesidades de la flota actual del sistema de transporte masivo
		Operación del sistema	Número de buses en operación	Revisión documental	Análisis descriptivo	Identificar las falencias y necesidades de la flota actual
		Componentes del sistema	Componente (troncal, zonal, provisional)	Revisión documental	Análisis descriptivo y comparativo	Identificar falencias estructurales del sistema
		Distribución territorial	Zona de operación	Revisión documental y análisis espacial	Análisis espacial y descriptivo	Identificar zonas prioritarias para estrategias de mitigación
Niveles de contaminación atmosférica	Independiente	Contaminación por material particulado	Concentración de $PM_{2.5}$	Registros IDEAM y SDA	Estadística descriptiva y comparativa	Sustentar técnicamente la necesidad de estrategias de mitigación ambiental
			Concentración de PM_{10}	Registros IDEAM y SDA	Estadística descriptiva	Sustentar la formulación de estrategias de mitigación
		Contaminantes gaseosos	Concentración de NOx	Registros IDEAM y SDA	Análisis descriptivo y correlacional	Relacionar condiciones ambientales con percepción ciudadana
			Concentración de CO_2	Registros IDEAM y SDA	Análisis descriptivo	Fundamentar la transición hacia tecnologías limpias

Percepción del impacto ambiental del transporte masivo	Dependiente	Calidad del aire percibida	Percepción de la contribución del transporte a la contaminación	Encuesta estructurada (Likert)	Estadística descriptiva	Analizar la percepción ciudadana frente al impacto ambiental
		Impacto en la salud y calidad de vida	Percepción de afectación a la salud	Encuesta estructurada	Estadística descriptiva	Analizar consecuencias sociales del transporte masivo
		Valoración tecnológica	Percepción de la tecnología de la flota	Encuesta estructurada	Estadística descriptiva	Analizar aceptación de tecnologías limpias
Aceptación de estrategias de mitigación ambiental	Dependiente	Conocimiento ambiental	Nivel de conocimiento sobre tecnologías limpias	Encuesta estructurada	Estadística descriptiva	Analizar la viabilidad social de estrategias de mitigación
		Aceptación social	Aceptación de buses eléctricos y zonas de bajas emisiones	Encuesta estructurada	Estadística descriptiva y correlacional	Formular recomendaciones para la transición a tecnologías limpias
		Disposición ciudadana	Apoyo a políticas de movilidad sostenible	Encuesta estructurada	Análisis correlacional	Elaborar recomendaciones de implementación de estrategias

Tabla 2 *Operacionalización de las Variables*. Apoyo IA Copilot.

5. RESULTADOS

El presente capítulo expone los resultados obtenidos a partir del análisis de la información secundaria y primaria recolectada durante el desarrollo de la investigación. Los resultados se presentan de manera descriptiva y correlacional, en coherencia con el enfoque cuantitativo del estudio y con el objetivo de sustentar la formulación de estrategias de mitigación ambiental y transición hacia tecnologías limpias en el sistema de transporte público masivo de Bogotá.

Año	Localidad	Tipo flota	Tecnología	PM25	PM10	NOx	CO2	# Buses
2020	Antonio Nariño	Diésel	Euro V	33,9	61,8	50	411	440
2021		Gas	Euro VI	29,6	54,7	41,8	438,9	410
2022		Gas	Euro VI	28,2	52,2	39,9	419	410
2023		Gas	Euro VI	27,4	50,7	38,8	407	410
2024		Gas	Euro VI	26,9	49,7	38	399	410
2020	Barrios Unidos	Diésel	Euro V	35,6	65	54	415	500
2021		Gas	Euro VI	31	58,4	46,2	442,2	480
2022		Gas	Euro VI	29,6	55,8	44,1	422,1	480
2023		Gas	Euro VI	28,8	54,2	42,8	410	480
2024		Gas	Euro VI	28,2	53,1	42	402	480
2020	Bosa	Diésel	Euro V	41,2	75,6	64	423	1200
2021		Diésel	Euro V	39,8	76,8	63,8	457,6	1180
2022		Diésel	Euro V	38	73,3	60,9	436,8	1180
2023		Diésel	Euro V	36,9	71,2	59,2	424,3	1180
2024		Diésel	Euro V	36,2	69,8	58	416	1180
2020	Chapinero	Diésel	Euro V	35,8	65,4	54	414	560
2021		Diésel	Euro V	35,3	66,3	53,9	449,9	540
2022		Diésel	Euro V	33,7	63,3	51,5	429,5	540
2023		Diésel	Euro V	32,7	61,5	50	417,2	540
2024		Diésel	Euro V	32,1	60,3	49	409	540
2020	Ciudad Bolívar	Diésel	Euro V	38,9	71,4	60	419	720
2021		Diésel	Euro V	38,4	71,8	59,4	455,4	700
2022		Diésel	Euro V	36,6	68,6	56,7	434,7	700
2023		Diésel	Euro V	35,6	66,6	55,1	422,3	700
2024		Diésel	Euro V	34,9	65,3	54	414	700
2020	Engativá	Diésel	Euro V	35,2	64,3	53	414	530
2021		Gas	Euro VI	30,6	56,8	44	441,1	510
2022		Gas	Euro VI	29,2	54,2	42	421,1	510

2023		Gas	Euro VI	28,4	52,6	40,8	409	510
2024		Gas	Euro VI	27,8	51,6	40	401	510
2020	Fontibón	Diésel	Euro V	36,4	66,1	55	415	540
2021		Gas	Euro VI	32	59,4	47,3	443,3	520
2022		Gas	Euro VI	30,6	56,7	45,1	423,2	520
2023		Gas	Euro VI	29,7	55,1	43,9	411,1	520
2024		Gas	Euro VI	29,1	54	43	403	520
2020	Kennedy	Diésel	Euro V	43,5	78,9	67	425	1270
2021		Diésel	Euro V	42,4	79,6	67,1	459,8	1250
2022		Diésel	Euro V	40,4	76	64	438,9	1250
2023		Diésel	Euro V	39,3	73,8	62,2	426,4	1250
2024		Diésel	Euro V	38,5	72,4	61	418	1250
2020	La Candelaria	Diésel	Euro V	36,7	67,2	56	416	380
2021		Diésel	Euro V	37	69,1	56,1	452,1	360
2022		Diésel	Euro V	35,3	65,9	53,6	431,6	360
2023		Diésel	Euro V	34,3	64,1	52	419,2	360
2024		Diésel	Euro V	33,6	62,8	51	411	360
2020	Los Mártires	Diésel	Euro V	40,8	74,2	63	422	840
2021		Diésel	Euro V	41,1	77,1	66	458,7	820
2022		Diésel	Euro V	39,3	73,6	63	437,9	820
2023		Diésel	Euro V	38,1	71,5	61,2	425,3	820
2024		Diésel	Euro V	37,4	70,1	60	417	820
2020	Puente Aranda	Diésel	Euro V	37,5	68,9	57	417	650
2021		Gas	Euro VI	32,3	60,6	48,4	445,5	620
2022		Gas	Euro VI	30,9	57,9	46,2	425,2	620
2023		Gas	Euro VI	30	56,2	44,9	413,1	620
2024		Gas	Euro VI	29,4	55,1	44	405	620
2020	Rafael Uribe	Diésel	Euro V	34,4	62,9	51	412	470
2021		Gas	Euro VI	30	55,2	42,9	440	450
2022		Gas	Euro VI	28,7	52,7	41	420	450
2023		Gas	Euro VI	27,8	51,2	39,8	408	450
2024		Gas	Euro VI	27,3	50,2	39	400	450
2020	San Cristóbal	Diésel	Euro V	38,4	70,1	59	418	700
2021		Diésel	Euro V	38,1	71,4	58,3	453,3	680
2022		Diésel	Euro V	36,3	68,1	55,7	433,7	680
2023		Diésel	Euro V	35,3	66,2	54,1	421,3	680
2024		Diésel	Euro V	34,6	64,9	53	413	680
2020	Santa Fe	Diésel	Euro V	39,6	72,3	61	420	730

2021		Diésel	Euro V	39,4	73,4	60,5	455,4	710
2022		Diésel	Euro V	37,6	70	57,8	434,7	710
2023		Diésel	Euro V	36,5	68	56,1	422,3	710
2024		Diésel	Euro V	35,8	66,7	55	414	710
2020	Suba	Diésel	Euro V	34,8	63,7	52	413	580
2021		Eléctrica	Cero emisiones	21,9	42,5	28,6	434,5	610
2022		Eléctrica	Cero emisiones	20,9	40,5	27,3	414,8	610
2023		Eléctrica	Cero emisiones	20,3	39,4	26,5	402,9	610
2024		Eléctrica	Cero emisiones	19,9	38,6	26	395	610
2020	Sumapaz	Baja	Mixta	18,6	32,1	21	395	50
2021		Baja	Mixta	16,7	31,2	19,8	431,2	45
2022		Baja	Mixta	16	29,8	18,9	411,6	45
2023		Baja	Mixta	15,5	29	18,4	399,8	45
2024		Baja circulación	Mixta	15,2	28,4	18	392	45
2020	Teusaquillo	Diésel	Euro V	34,1	62,5	51	412	460
2021		Gas	Euro VI	30,3	56	42,9	440	430
2022		Gas	Euro VI	28,9	53,4	41	420	430
2023		Gas	Euro VI	28,1	51,9	39,8	408	430
2024		Gas	Euro VI	27,5	50,9	39	400	430
2020	Tunjuelito	Diésel	Euro V	33,7	61,2	50	410	480
2021		Gas	Euro VI	31,4	57,6	45,1	442,2	460
2022		Gas	Euro VI	29,9	55	43,1	422,1	460
2023		Gas	Euro VI	29,1	53,4	41,8	410	460
2024		Gas	Euro VI	28,5	52,4	41	402	460
2020	Usaquén	Diésel	Euro V	34,2	62,1	52	412	640
2021		Diésel	Euro V	33,4	62,5	51,7	447,7	620
2022		Diésel	Euro V	31,9	59,6	49,4	427,4	620
2023		Diésel	Euro V	31	57,9	47,9	415,1	620
2024		Diésel	Euro V	30,4	56,8	47	407	620
2020	Usme	Diésel	Euro V	35,1	64	53	413	610
2021		Diésel	Euro V	34,9	64	52,8	448,8	590
2022		Diésel	Euro V	33,3	61,1	50,4	428,4	590
2023		Diésel	Euro V	32,3	59,4	49	416,2	590
2024		Diésel	Euro V	31,7	58,2	48	408	590

Tabla 3 *Matriz de consolidación de datos*.

Fuente: Elaboración propia con base en documentación revisada de tabla 1.

5.1. Presentación de resultados

5.1.1. Caracterización de la flota del sistema de transporte público por localidad (2020–2024)

La caracterización de la flota del sistema de transporte público masivo en Bogotá se realizó a partir del análisis de los registros oficiales correspondientes al periodo 2020–2024, considerando el número de buses, el tipo de flota, la tecnología vehicular y su distribución por localidad.

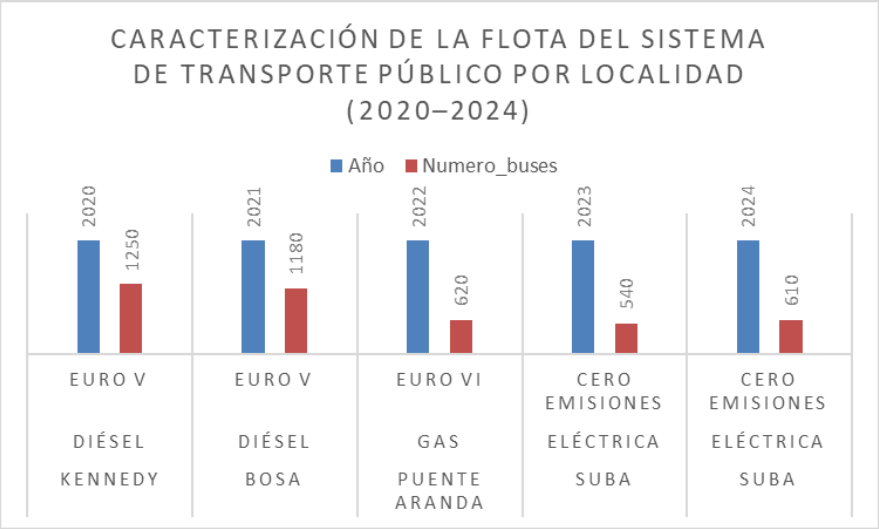


Figura 6 caracterización de la flota del sistema de Transporte público en algunas localidades

Nota: *Elaboración propia a partir de la información consolidada de reportes oficiales de la Secretaría Distrital de Movilidad y TransMilenio S.A. (2020–2024).*

De acuerdo con los resultados presentados en la Figura 6, se evidencia una distribución heterogénea de la flota entre las diferentes localidades de la ciudad. Localidades como Kennedy y Bosa concentran un mayor número de buses con tecnología diésel, mientras que en zonas como Puente Aranda se observa una participación relevante de flota a gas, y en la localidad de Suba se registra una mayor incorporación de buses eléctricos, especialmente a partir del año 2023.

Desde una perspectiva técnica, esta distribución desigual refleja que el proceso de transición energética no ha sido homogéneo en el territorio distrital. Las localidades con mayor concentración de flota diésel coinciden con corredores de alta demanda operacional y densidad

poblacional, lo cual implica una mayor exposición de la población a emisiones contaminantes. En contraste, la incorporación de flota eléctrica en Suba evidencia una apuesta progresiva por tecnologías de cero emisiones, aunque aún limitada en comparación con el total de la flota en operación.

Durante el periodo 2020–2024 se identifican tres tecnologías predominantes:

- Flota diésel Euro V, concentrada principalmente en Kennedy y Bosa, con el mayor número de buses en operación.
- Flota a gas Euro VI, presente en localidades como Puente Aranda, con una reducción progresiva en comparación con años anteriores.
- Flota eléctrica de cero emisiones, con mayor presencia en Suba, especialmente desde 2023.

El análisis comparativo permite inferir que la permanencia de flota diésel en determinadas zonas constituye un factor estructural que incide en los niveles de contaminación atmosférica, particularmente en material particulado fino ($PM_{2.5}$) y óxidos de nitrógeno (NOx).

5.1.2. Niveles de contaminación atmosférica asociados a la tecnología de flota

Con el fin de establecer la relación entre la tecnología de la flota y los niveles de contaminación atmosférica, se calcularon los valores promedio de los principales contaminantes criterio registrados en Bogotá durante el periodo de estudio, discriminados por tipo de flota y tecnología vehicular.

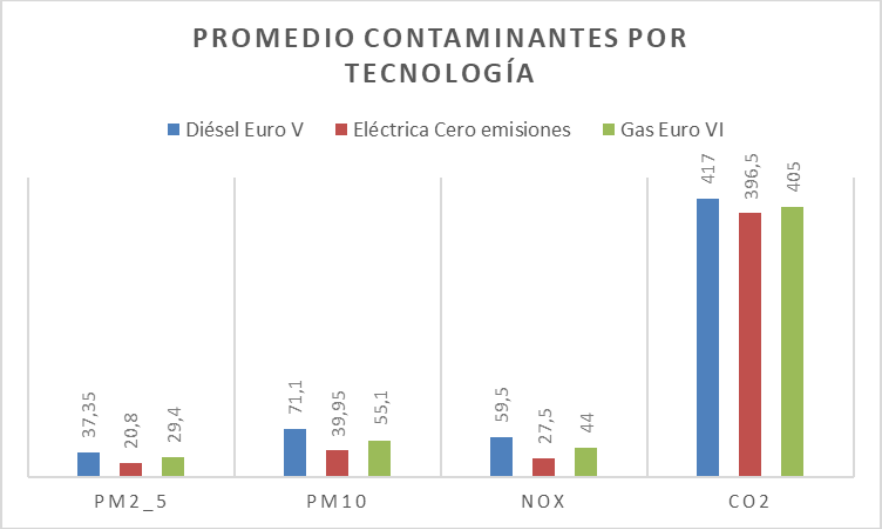


Figura 7 *Promedio de contaminantes por tecnologías aplicadas al sistema de transporte público en algunas localidades*

Nota: *Los datos corresponden a información consolidada a partir de reportes oficiales de la Secretaría Distrital de Movilidad y TransMilenio S.A. (2020–2024).* elaboración Propia.

Los resultados evidencian diferencias significativas en las concentraciones promedio de contaminantes según la tecnología utilizada:

En localidades con predominancia de flota diésel, los valores de $PM_{2.5}$ se mantienen por encima de 35 µg/m³, con concentraciones elevadas de PM_{10} y NOx.

En zonas con flota a gas, se observa una reducción moderada en $PM_{2.5}$ y NOx, lo que indica un mejor desempeño ambiental frente al diésel, aunque aún con emisiones considerables.

En localidades con flota eléctrica, se registran los valores más bajos de contaminantes, con concentraciones de $PM_{2.5}$ inferiores a 22 µg/m³ y reducciones sustanciales en NOx y CO_2.

Desde el análisis técnico, la diferencia entre flota diésel y eléctrica supera los 13 µg/m³ en $PM_{2.5}$, lo cual resulta ambientalmente significativo considerando que el valor guía anual recomendado por organismos internacionales es inferior a los niveles observados en zonas con predominancia diésel. Esto sugiere que la tecnología vehicular constituye un determinante directo de la calidad del aire urbano.

Asimismo, la flota a gas, aunque representa una mejora frente al diésel, no alcanza los niveles de eficiencia ambiental de la tecnología eléctrica, lo cual evidencia que las estrategias de transición energética deben priorizar soluciones de cero emisiones si se pretende lograr una reducción sustancial de contaminantes criterio.

En conjunto, los resultados permiten establecer una relación directa entre la tecnología vehicular y los niveles de contaminación atmosférica. Esta relación no solo es estadísticamente observable, sino que también posee implicaciones en términos de salud pública, planificación urbana y política ambiental, constituyéndose en un insumo clave para la formulación de estrategias de mitigación ambiental y renovación progresiva de la flota.

5.1.3. Comparación temporal de contaminantes (2020–2024)

El análisis temporal de los contaminantes atmosféricos se realizó con el propósito de identificar variaciones en los niveles de contaminación a lo largo del periodo 2020–2024, considerando las localidades y el tipo de flota predominante en cada una.

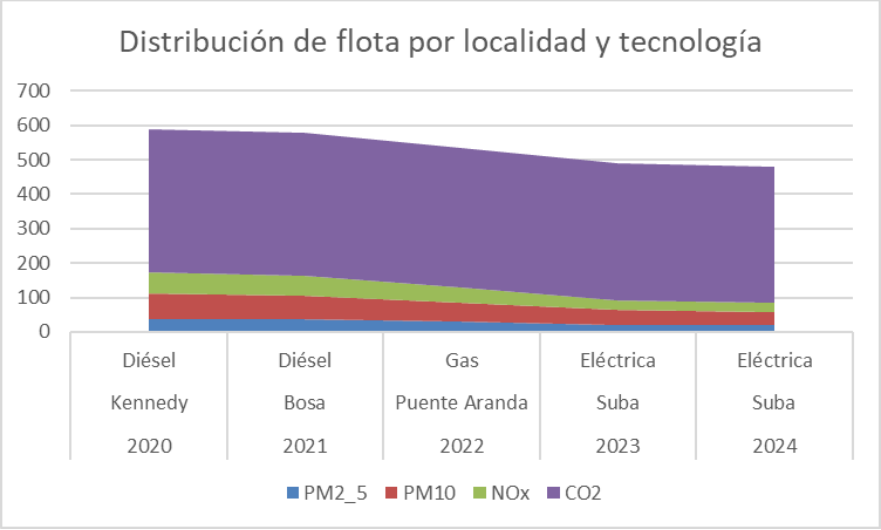


Figura 8 *Comparación temporal de Contaminantes y su distribución de flota*

Nota: *Los datos corresponden a información consolidada a partir de reportes oficiales de la Secretaría Distrital de Movilidad y TransMilenio S.A. (2020–2024).* elaboración Propia.

Como se observa en la figura 8, las localidades donde predomina la flota diésel presentan niveles de contaminantes relativamente constantes a lo largo del periodo analizado, con variaciones moderadas entre años, a diferencia de aquellas localidades donde se ha incorporado progresivamente flota a **gas** y **eléctrica**, se evidencia una disminución gradual en los valores promedio de $PM_{2.5}$, PM_{10} y NOx.

Particularmente en la localidad de Suba, entre los años 2023 y 2024 se observa:

Disminución de $PM_{2.5}$ cercana al 8 %

Reducción sostenida de NOx

Menores emisiones de CO_2 asociadas a la operación del sistema

En contraste, las localidades con predominio de flota diésel muestran reducciones marginales o estancamiento en los niveles de contaminación.

5.1.4. Análisis de la encuesta: confiabilidad del Instrumento (alfa de Cronbach)

Previo al análisis de los resultados derivados de la encuesta estructurada aplicada a los usuarios del sistema de transporte público masivo, se realizó la evaluación de la confiabilidad interna del instrumento, con el fin de verificar la consistencia de los ítems que lo componen y garantizar la calidad de la información recolectada.

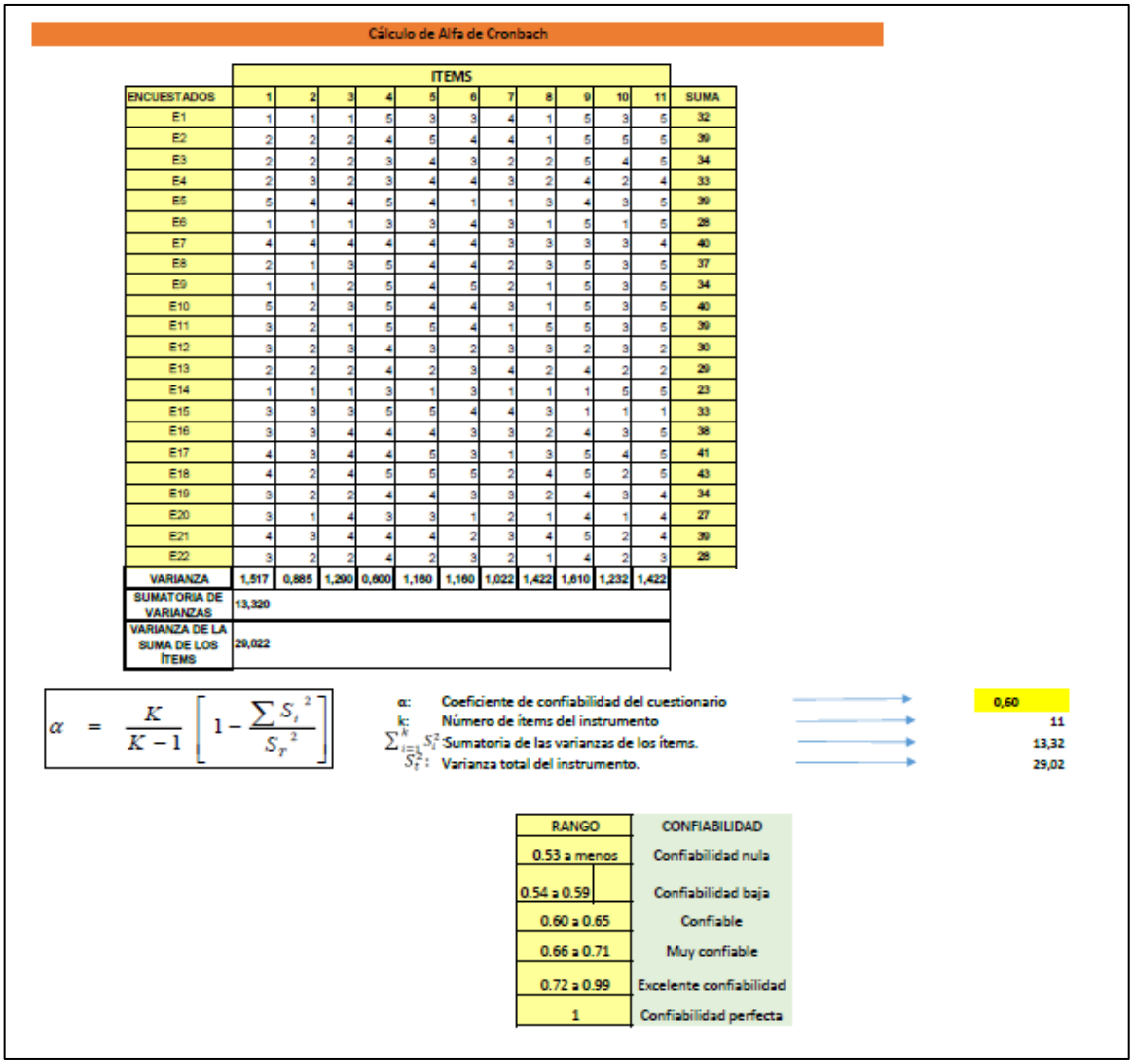
La confiabilidad del instrumento se evaluó mediante el coeficiente alfa de Cronbach, estadístico ampliamente utilizado en estudios cuantitativos para determinar el grado de coherencia interna entre los ítems de una escala tipo Likert. Este coeficiente permite establecer si los ítems miden de manera consistente los constructos definidos en las dimensiones del instrumento.

El cálculo del alfa de Cronbach se realizó a partir de los datos obtenidos en la prueba piloto, utilizando el software Microsoft Excel, mediante la estimación de la varianza total de la escala y la varianza individual de cada ítem. El instrumento estuvo conformado por ítems organizados en las siguientes dimensiones: percepción de la calidad del aire, impacto ambiental del transporte masivo, conocimiento y aceptación de tecnologías limpias y opinión frente a estrategias de mitigación ambiental.

El valor obtenido del coeficiente alfa de Cronbach fue de $\alpha = 0.60$, lo cual indica un nivel de consistencia interna aceptable para el estudio de carácter exploratorio. Según la literatura metodológica, valores de alfa entre 0.60 y 0.69 pueden considerarse adecuados cuando el instrumento evalúa un fenómeno multidimensional y se utiliza como apoyo para el análisis descriptivo y correlaciones.

En el contexto de la presente investigación, el valor obtenido se explica por la diversidad de dimensiones abordadas en el instrumento, las cuales incluyen la percepción de la calidad del aire, los efectos del transporte masivo en la salud, el conocimiento sobre tecnologías limpias y la aceptación de estrategias de mitigación ambiental. Esta heterogeneidad temática puede influir en la homogeneidad de las respuestas y, en consecuencia, en el valor del coeficiente.

Por tanto, los resultados derivados de la encuesta se consideran metodológicamente válidos para los fines del estudio y se emplean como un insumo complementario al análisis de información secundaria, contribuyendo a sustentar la formulación de la propuesta de estrategias de mitigación y transición hacia tecnologías limpias en el sistema de transporte masivo de Bogotá, objetivo central de la investigación.



Cálculo de Alfa de Cronbach

	ITEMS											
ENCUESTADOS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	SUMA
E1	1	1	1	5	3	3	4	1	5	3	5	32
E2	2	2	2	4	5	4	4	1	5	5	5	39
E3	2	2	2	3	4	3	2	2	5	4	5	34
E4	2	3	2	3	4	4	3	2	4	2	4	33
E5	5	4	4	5	4	1	1	3	4	3	5	39
E6	1	1	1	3	3	4	3	1	5	1	5	28
E7	4	4	4	4	4	4	3	3	3	3	4	40
E8	2	1	3	5	4	4	2	3	5	3	5	37
E9	1	1	2	5	4	5	2	1	5	3	5	34
E10	5	2	3	5	4	4	3	1	5	3	5	40
E11	3	2	1	5	5	4	1	5	5	3	5	39
E12	3	2	3	4	3	2	3	3	2	3	2	30
E13	2	2	2	4	2	3	4	2	4	2	2	29
E14	1	1	1	3	1	3	1	1	1	5	5	23
E15	3	3	3	5	5	4	4	3	1	1	1	33
E16	3	3	4	4	4	3	3	2	4	3	5	38
E17	4	3	4	4	5	3	1	3	5	4	5	41
E18	4	2	4	5	5	5	2	4	5	2	5	43
E19	3	2	2	4	4	3	3	2	4	3	4	34
E20	3	1	4	3	3	1	2	1	4	1	4	27
E21	4	3	4	4	4	2	3	4	5	2	4	39
E22	3	2	2	4	2	3	2	1	4	2	3	28
VARIANZA	1,517	0,885	1,290	0,600	1,160	1,160	1,022	1,422	1,610	1,232	1,422	
SUMATORIA DE VARIANZAS	13,320											
VARIANZA DE LA SUMA DE LOS ÍTEMS	29,022											

$$\alpha = \frac{K}{K-1}\left[1 - \frac{\sum S_i^{\,2}}{S_T^{\,2}}\right]$$

α: Coeficiente de confiabilidad del cuestionario → 0,60

k: Número de ítems del instrumento → 11

$\sum_{i=1}^{k} S_i^2$: Sumatoria de las varianzas de los ítems. → 13,32

S_t^2: Varianza total del instrumento. → 29,02

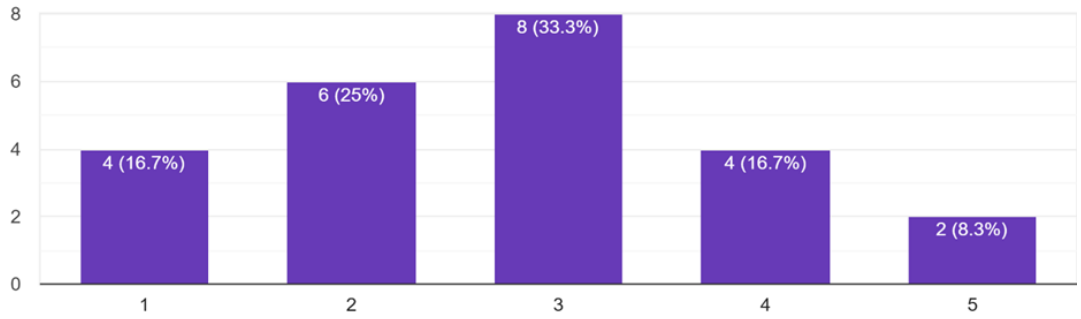
RANGO	CONFIABILIDAD
0.53 a menos	Confiabilidad nula
0.54 a 0.59	Confiabilidad baja
0.60 a 0.65	Confiable
0.66 a 0.71	Muy confiable
0.72 a 0.99	Excelente confiabilidad
1	Confiabilidad perfecta

Figura 9 Cálculo de coeficiente Alfa de Cronbach

Nota: Formato Google.

Una vez verificada la confiabilidad del instrumento (α = 0,60), se procedió al análisis de las once preguntas aplicadas que permitió estructurar los resultados en cuatro dimensiones: exposición percibida, afectaciones en salud, percepción de calidad del aire y aceptación de transición tecnológica.

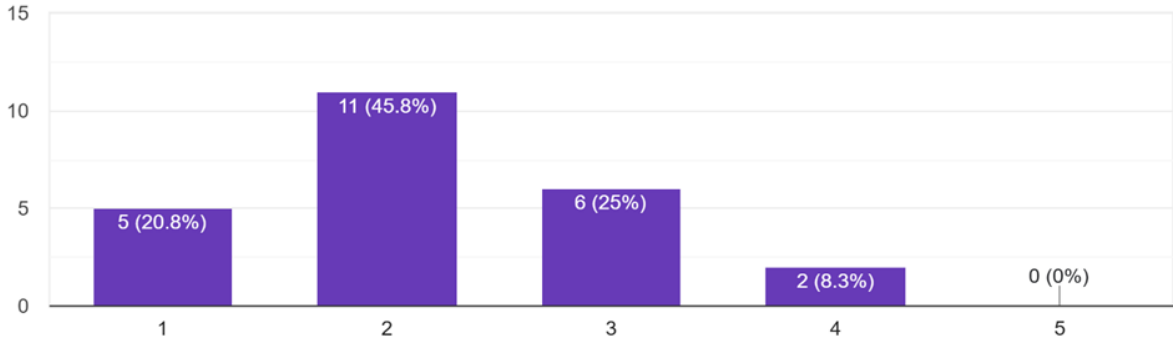
Pregunta 1 ¿En las estaciones siente olor a diésel o humo?



El 58,3 % de los encuestados seleccionó valores 3 y 4 en la escala Likert, mientras que el 8,3 % indicó el nivel máximo (5). Solo el 16,7 % manifestó baja percepción (nivel 1).

Este resultado evidencia que una proporción significativa de usuarios percibe la presencia de emisiones provenientes de la combustión diésel en los entornos operativos del sistema. Desde una perspectiva ambiental, esta percepción puede asociarse con la concentración de material particulado fino y gases contaminantes generados por los vehículos de combustión interna. La presencia recurrente de olores a combustión también sugiere que las condiciones de ventilación en estaciones y zonas de embarque pueden favorecer la acumulación de contaminantes, particularmente en horarios de alta demanda. En términos de gestión ambiental, este resultado refuerza la necesidad de fortalecer los procesos de renovación de flota y mejorar las condiciones operativas del sistema para reducir la exposición de los usuarios a contaminantes atmosféricos.

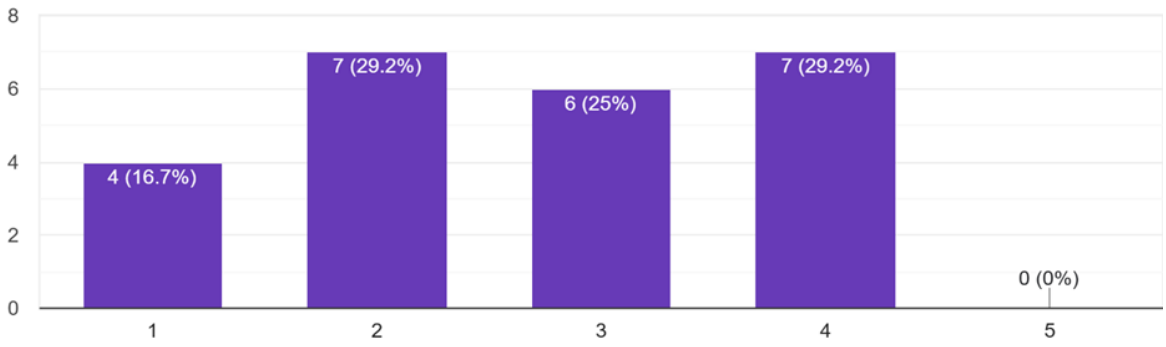
Pregunta 2 ¿En los buses percibe concentración visible de material particulado?



El 45,8 % seleccionó nivel 2 y el 25 % nivel 3, lo que indica percepción moderada de presencia de material particulado. Sin embargo, un 20,8 % manifestó percepción alta (nivel 1 en escala invertida según el gráfico).

La percepción de material particulado visible dentro o alrededor de los vehículos refleja una posible presencia de emisiones asociadas principalmente a buses con tecnologías de combustión diésel. Este fenómeno puede estar relacionado con factores como el envejecimiento de la flota, deficiencias en el mantenimiento de los motores o condiciones de congestión vehicular que incrementan las emisiones. Desde el punto de vista ambiental, la presencia de partículas visibles puede estar vinculada a concentraciones elevadas de PM_{10} y $PM_{2.5}$, contaminantes que representan un riesgo significativo para la salud pública. En este sentido, los resultados evidencian la importancia de fortalecer los controles técnicos a las emisiones vehiculares y acelerar la transición hacia tecnologías de cero o bajas emisiones.

Pregunta 3 ¿ha presentado irritación ocular o respiratoria durante o después de finalizar su trayecto de viaje?

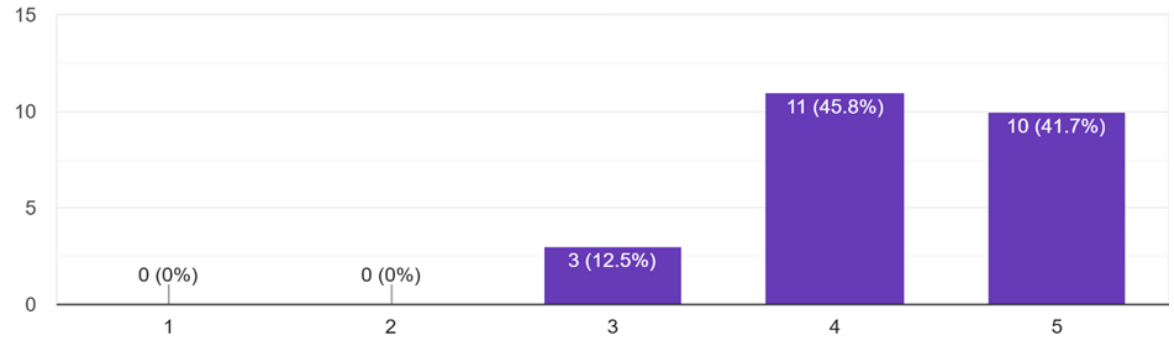


El 54,2 % seleccionó niveles 3 y 4, mientras que el 29,2 % indicó nivel 2. Aunque el instrumento no tiene alcance clínico, más de la mitad reporta síntomas en intensidad media a alta.

La presencia de síntomas respiratorios o irritación ocular reportada por los usuarios puede estar relacionada con la exposición a contaminantes atmosféricos presentes en el entorno del transporte público, especialmente material particulado fino y gases derivados de la combustión. Aunque esta información corresponde a una percepción subjetiva de los usuarios, resulta relevante

en el contexto de la investigación, ya que coincide con estudios que señalan que la exposición prolongada a contaminantes del transporte urbano puede generar efectos adversos en la salud respiratoria. Estos resultados evidencian la necesidad de fortalecer las estrategias de mitigación ambiental en el sistema de transporte masivo, con el fin de reducir los niveles de exposición de los usuarios.

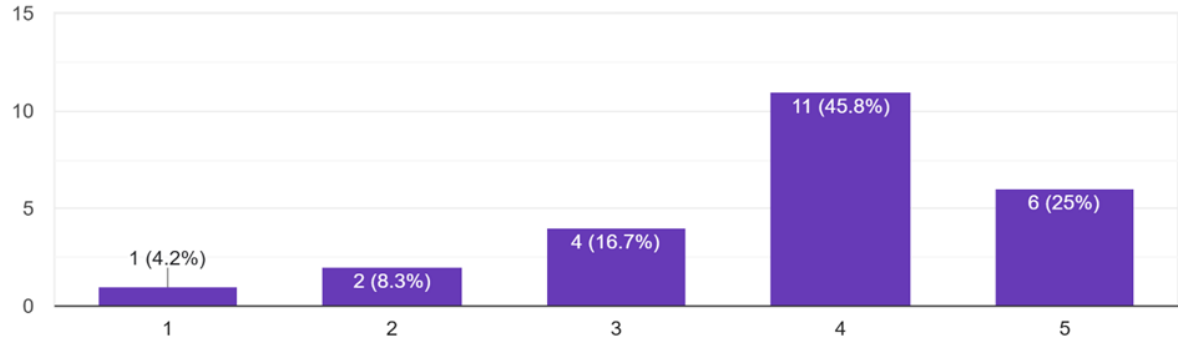
Pregunta 4 ¿considera que a la hora pico su exposición a contaminantes aumenta?



El 87,5 % de los encuestados seleccionó niveles 4 y 5, indicando que considera que la exposición a contaminantes aumenta significativamente en hora pico. Siendo este es uno de los resultados más contundentes del instrumento.

Este resultado refleja una percepción clara por parte de los usuarios sobre la relación entre la congestión del sistema y el aumento en la exposición a contaminantes. Durante los periodos de mayor demanda operativa, el incremento en la frecuencia de buses y la acumulación de vehículos en estaciones y corredores troncales puede generar mayores concentraciones de emisiones contaminantes. Desde una perspectiva operativa, este hallazgo sugiere que las estrategias de mitigación ambiental deben priorizar intervenciones en los horarios de mayor demanda, mediante la incorporación de tecnologías limpias y la optimización de la operación del sistema.

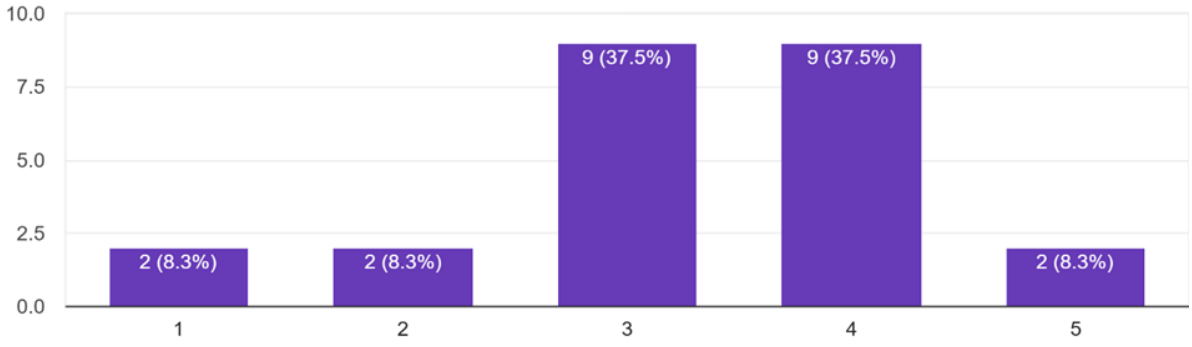
Pregunta 5 ¿considera que la ventilación dentro de los uses es insuficiente?



El 70,8 % seleccionó niveles 4 y 5, lo cual evidencia percepción mayoritaria de deficiencia en ventilación interna de los buses.

La percepción de ventilación insuficiente puede influir en la sensación de exposición a contaminantes dentro del sistema de transporte, especialmente en vehículos con alta ocupación o en trayectos prolongados. Desde el punto de vista ambiental y operativo, este resultado sugiere la necesidad de evaluar las condiciones de ventilación y circulación de aire dentro de los vehículos, así como de fortalecer las condiciones de confort ambiental para los usuarios del sistema.

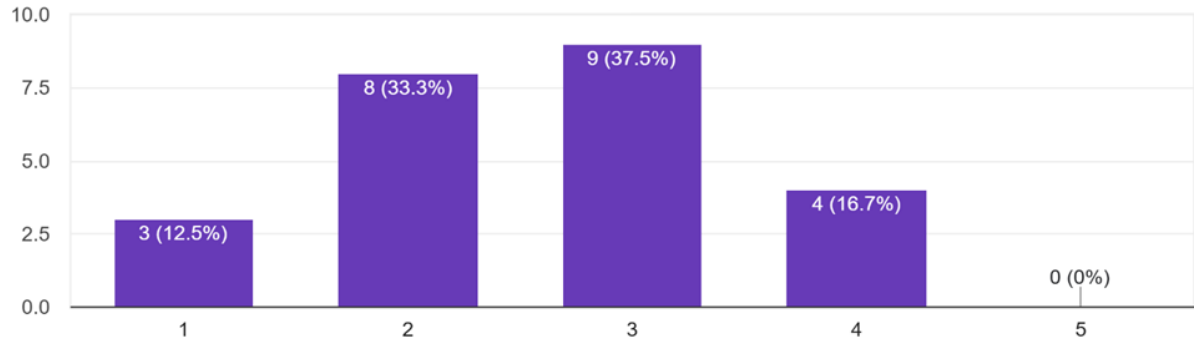
Pregunta 6 ¿Como consideras la calidad del aire en tu zona?



El 75 % de los encuestados calificó la calidad del aire entre nivel 3 y 4, evidenciando percepción regular a moderadamente negativa.

Este resultado refleja una percepción moderadamente crítica de los ciudadanos frente a la calidad del aire en la ciudad. La percepción de una calidad del aire deficiente puede estar asociada a múltiples fuentes de contaminación urbana, entre las cuales el transporte público y el tráfico vehicular representan una de las principales. Este resultado coincide con diversos estudios que identifican al sector transporte como uno de los principales responsables de las emisiones contaminantes en las ciudades latinoamericanas.

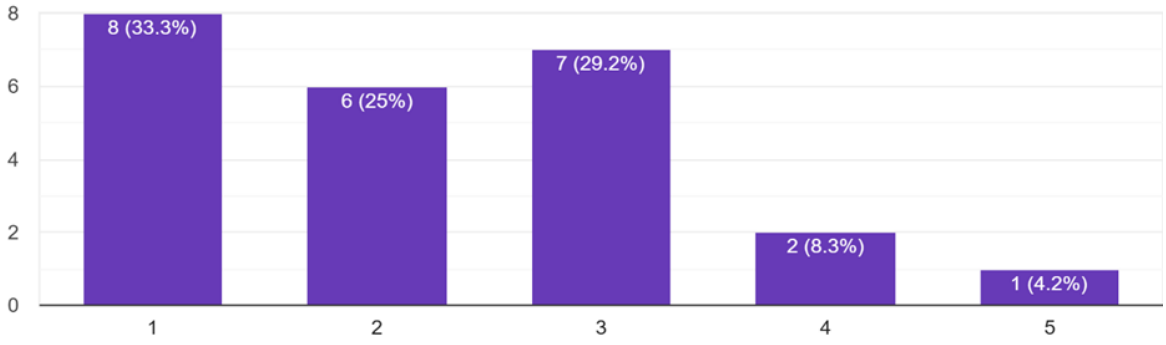
Pregunta 7 ¿Como consideras la calidad del aire en estaciones y paraderos?



El 70,8 % calificó entre niveles 2 y 3, lo que indica percepción menos favorable en entornos asociados directamente al sistema de transporte.

Esto coincide con el análisis técnico donde corredores con alta operación diésel presentan mayores concentraciones de $PM_{2.5}$. por lo tanto, la percepción de una calidad del aire deficiente en estaciones y paraderos puede estar asociada a la acumulación de emisiones vehiculares en estos espacios, especialmente en corredores troncales con alta frecuencia de buses. Este resultado evidencia la necesidad de implementar estrategias de mejora ambiental en estos entornos, tales como la incorporación de tecnologías limpias en los corredores con mayor demanda y la mejora de las condiciones de ventilación en estaciones.

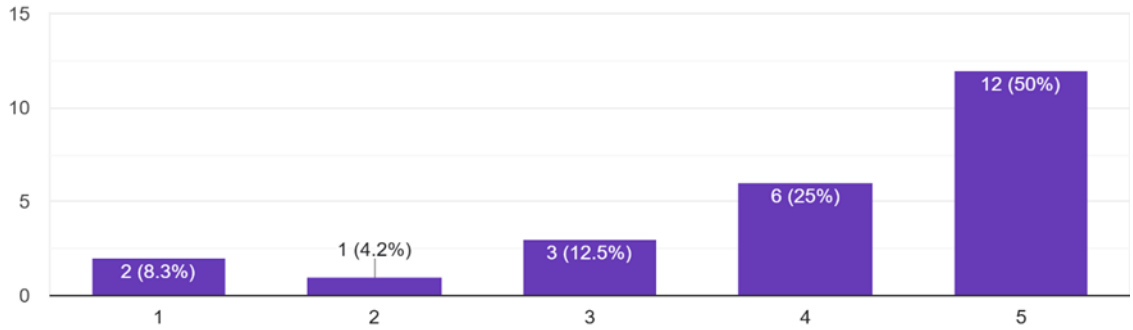
Pregunta 8 ¿En el último mes, ha tenido tos/irritación/ahogo asociado a los trayectos?



El 33,3 % seleccionó nivel 1, el 29,2 % nivel 3 y el 25 % nivel 2. Solo el 12,5 % reportó niveles altos (4 y 5); lo que sugiere presencia de molestias ocasionales más que síntomas persistentes generalizados.

Este resultado sugiere que una proporción importante de usuarios percibe efectos físicos asociados a la exposición a contaminantes durante sus desplazamientos. Aunque estos síntomas no pueden atribuirse exclusivamente al transporte público, su frecuencia dentro del contexto de movilidad urbana evidencia la importancia de fortalecer las estrategias de reducción de emisiones en el sistema.

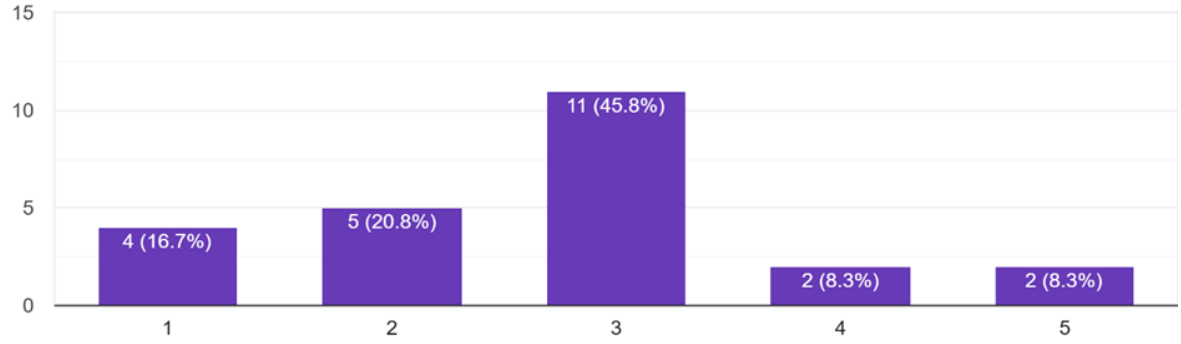
Pregunta 9 ¿Considera que la introducción de buses eléctricos reduce la contaminación en los corredores principales?



El 75 % seleccionó niveles 4 y 5 (50 % nivel 5 y 25 % nivel 4), por lo cual, existe respaldo mayoritario a la electrificación del sistema.

Este resultado evidencia una percepción positiva por parte de los usuarios frente a la transición hacia tecnologías limpias en el transporte público. La aceptación social de los buses eléctricos constituye un factor relevante para el éxito de las políticas de movilidad sostenible, ya que facilita la implementación de procesos de renovación tecnológica en el sistema.

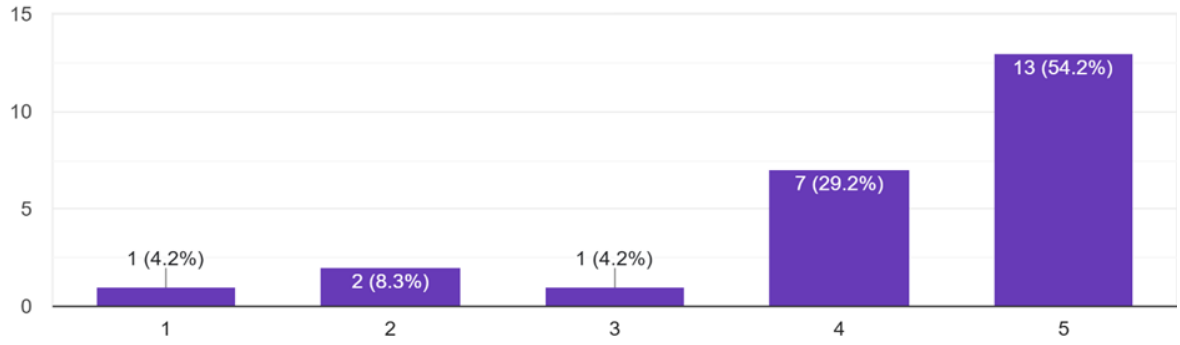
Pregunta 10 ¿Considera que los controles a emisiones vehiculares se aplican de forma efectiva?



El 45,8 % seleccionó nivel 3 y el 37,5 % niveles 1 y 2. Solo el 16,6 % considera que los controles son altamente efectivos.

Este resultado refleja una percepción de debilidad institucional en la aplicación de controles ambientales asociados al transporte urbano. Desde la perspectiva de política pública, este hallazgo sugiere la necesidad de fortalecer los mecanismos de monitoreo y control de emisiones, así como mejorar la comunicación institucional sobre las acciones que se implementan en materia de gestión ambiental.

Pregunta 11 ¿Se requiere renovación acelerada de flota Diesel a tecnologías limpias?



El 83,4 % seleccionó niveles 4 y 5 (54,2 % nivel 5), siendo este el resultado con mayor consenso del instrumento.

Este resultado evidencia un alto nivel de aceptación social frente a las estrategias de transición energética en el transporte público. La percepción favorable hacia tecnologías limpias refuerza la viabilidad social de implementar políticas orientadas a la electrificación del sistema y la reducción progresiva de las emisiones contaminantes asociadas al transporte masivo.

Por lo anterior, se muestra:

- Alta percepción de exposición en hora pico (87,5 %).
- Mayoría percibe ventilación insuficiente (70,8 %).
- Respaldo contundente a renovación tecnológica (83,4 %).
- Fuerte aceptación de buses eléctricos (75 %).
- Baja confianza en controles regulatorios.

Los anteriores hallazgos refuerzan la evidencia técnica presentada previamente, donde las localidades con mayor presencia de flota diésel registran concentraciones superiores de $PM_{2.5}$ y NOx, mientras que las zonas con flota eléctrica presentan reducciones sostenidas.

En consecuencia, la percepción ciudadana se encuentra alineada con los datos ambientales, lo cual fortalece la validez integral del estudio y sustenta la pertinencia de acelerar la transición hacia tecnologías limpias en el sistema de transporte público masivo de Bogotá.

5.2. Propuesta al sector

A partir de los resultados obtenidos en la caracterización de la flota (2020–2024), el análisis de los niveles de contaminación atmosférica y la percepción ciudadana, se formula una propuesta sectorial orientada a fortalecer la política pública de movilidad sostenible del Distrito Capital.

La evidencia técnica demostró que las localidades con mayor concentración de flota diésel (Kennedy y Bosa) registran concentraciones superiores de $PM_{2.5}$ ($\geq$35 µg/m³), mientras que zonas con mayor incorporación de flota eléctrica (Suba) presentan niveles inferiores a 22 µg/m³ y reducciones sostenidas de NOx durante el periodo 2023-2024. Estos resultados coinciden con lo señalado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), que identifica el transporte urbano como una de las principales fuentes de exposición a material particulado fino en ciudades latinoamericanas.

Paralelamente, los resultados de la encuesta evidencian que el 87,5 % de los usuarios considera que la exposición a contaminantes aumenta en hora pico y el 70,8 % percibe insuficiencia en la ventilación interna de los buses. Asimismo, el 83,4 % respalda una renovación acelerada de la flota diésel hacia tecnologías limpias y el 75 % considera que la introducción de buses eléctricos reduce la contaminación en los corredores principales. Estos hallazgos son coherentes con lo planteado por la CEPAL (2022) y Naciones Unidas (2015), quienes destacan la electrificación del transporte público como estrategia clave para la mitigación de emisiones urbanas.

5.2.1. Enfoque de la propuesta

La propuesta se fundamenta en un enfoque de movilidad sostenible y transición energética progresiva, orientado a reducir las emisiones contaminantes del transporte público masivo ($PM_{2.5}$, PM_{10}, NOx y CO_2), mejorar la calidad del aire urbano y fortalecer la percepción ciudadana frente

a las políticas ambientales del sector. Se prioriza una implementación progresiva, territorialmente focalizada y articulada con los instrumentos de planificación distrital vigentes, el cual se alinea con los lineamientos del Plan de Acción Climática de Bogotá y con las recomendaciones del IDEAM (2023) sobre reducción sectorial de emisiones en el transporte urbano.

5.2.2. Lineamientos estratégicos de la propuesta

Priorización territorial de la renovación de flota

Con base en la caracterización de la flota por localidad, se propone priorizar la sustitución progresiva de buses diésel en aquellas zonas que concentran mayor número de vehículos de tecnologías convencionales y mayores niveles de contaminación atmosférica, como Kennedy y Bosa. Esta priorización permitirá maximizar los beneficios ambientales en sectores con mayor exposición poblacional.

Fortalecimiento de la incorporación de tecnologías limpias

Dado que el 83,4 % de los encuestados considera necesaria una renovación acelerada, se propone acelerar la incorporación de flota eléctrica y a gas de bajas emisiones, tomando como referencia las experiencias de localidades como Suba y Puente Aranda, donde se evidencia una mayor participación de tecnologías más limpias. La expansión de estas tecnologías deberá considerar criterios de capacidad operativa, infraestructura de recarga y sostenibilidad financiera del sistema.

Articulación con zonas de bajas emisiones

El 87,5 % de los usuarios percibe mayor exposición en hora pico, lo cual sugiere concentración crítica en corredores de alta demanda.

Por ello, se propone fortalecer la implementación de zonas de bajas emisiones mediante la asignación preferente de flota eléctrica en:

Corredores troncales estratégicos.

Áreas de alta densidad poblacional.

Entornos hospitalarios y educativos.

Esta estrategia se alinea con experiencias internacionales recomendadas por Naciones Unidas (2015) y CEPAL (2022), donde la implementación de ZBE ha demostrado reducciones localizadas de contaminantes criterio.

Mejora de condiciones operativas internas

El 70,8 % de los usuarios considera insuficiente la ventilación dentro de los buses y más del 50 % reporta síntomas de irritación ocular o respiratoria en intensidad media.

En consecuencia, se recomienda:

Evaluar mejoras en sistemas de ventilación y filtración interna.

Implementar monitoreo piloto de calidad del aire en buses.

Ajustar frecuencias operativas en hora pico para reducir concentración.

Estas medidas se fundamentan en lo señalado por la OMS (2021), que destaca la importancia de reducir exposición directa en microambientes de transporte.

5.2.3. Estrategias de gestión y gobernanza

Planeación basada en evidencia

Solo el 16,6 % de los encuestados considera altamente efectivos los controles a emisiones vehiculares, lo cual evidencia percepción de debilidad regulatoria.

Se propone:

Reforzar inspecciones ambientales periódicas.

Publicar reportes de desempeño ambiental por concesionario.

Integrar indicadores de emisiones en sistemas de seguimiento contractual.

El fortalecimiento institucional es recomendado por el DNP (2022) como mecanismo clave para garantizar cumplimiento de metas ambientales sectoriales.

Fortalecimiento de la aceptación social

Dado que el 55 % no percibe mejoras claras en la calidad del aire, se identifica la necesidad de fortalecer los procesos de comunicación y sensibilización dirigidos a los usuarios, orientados a aumentar el conocimiento sobre tecnologías limpias y los beneficios ambientales asociados al transporte público sostenible. Esto contribuirá a una mayor aceptación social de las medidas implementadas.

Articulación interinstitucional

La implementación de la propuesta requiere una articulación efectiva entre la Secretaría Distrital de Movilidad, la Secretaría Distrital de Ambiente, TransMilenio S.A., operadores concesionarios y demás entidades competentes, garantizando coherencia entre las políticas de movilidad, ambiente y salud pública.

5.2.4. Alcance de la propuesta

La propuesta formulada constituye un marco de acción orientado a la mejora ambiental del sistema de transporte público masivo, reduciendo emisiones tipo ($PM_{2.5}$, PM_{10}, NOx y CO_2), mejorar condiciones de exposición en entornos de alta demanda, consolidar la transición energética del transporte masivo y aumentar la legitimidad social de las medidas ambientales. Su implementación progresiva permitirá avanzar hacia un sistema de transporte más sostenible, eficiente y socialmente aceptado, en concordancia con los objetivos de la investigación y los lineamientos de movilidad sostenible del Distrito Capital.

Objetivo específico	Resultado asociado (Cap. 5.1)	Evidencia empírica	Recomendación / Lineamiento propuesto (Cap. 5.2)	Soporte bibliográfico

Caracterizar la flota del sistema de transporte público masivo de Bogotá según tipo de tecnología y distribución territorial durante el periodo 2020–2024.	Se identificó una distribución heterogénea de la flota por localidad, con predominio de flota diésel en Kennedy y Bosa, mayor presencia de flota a gas en Puente Aranda y aumento de flota eléctrica en Suba a partir de 2023.	Tabla 5. Caracterización de la flota por localidad y tecnología (2020–2024).	Priorizar territorialmente la renovación tecnológica de la flota, enfocándose en localidades con mayor concentración de tecnologías altamente contaminantes.	Secretaría Distrital de Ambiente (2023); CEPAL (2022); Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (2010).
Analizar la relación entre el tipo de tecnología de la flota del transporte público y los niveles de contaminantes atmosféricos en Bogotá.	Las zonas con mayor participación de flota eléctrica y a gas presentan menores concentraciones promedio de $PM_{2.5}$, PM_{10} y NOx en comparación con aquellas dominadas por flota diésel.	Tabla 6. Promedios de contaminantes por tipo de tecnología.	Fortalecer la transición hacia tecnologías de cero y bajas emisiones como eje central de la política de movilidad sostenible del Distrito.	OMS (2021); Naciones Unidas (2015); IDEAM (2023).
Evaluar la evolución temporal de los contaminantes atmosféricos asociados al transporte público durante el periodo 2020–2024.	Se evidencia una tendencia de reducción progresiva de contaminantes en los años donde aumenta la incorporación de flota limpia.	Tabla 7. Evolución temporal de contaminantes (2020–2024).	Integrar la renovación de flota con estrategias como las zonas de bajas emisiones para consolidar reducciones sostenidas en la calidad del aire.	Secretaría Distrital de Ambiente (2023); Alcaldía Mayor de Bogotá (2020).
Analizar la percepción de los usuarios del sistema de transporte público frente al impacto ambiental del transporte masivo.	La percepción ciudadana es moderada respecto a los beneficios ambientales del sistema, con un nivel de confiabilidad aceptable del instrumento ($\alpha = 0{,}60$).	Resultados de la encuesta estructurada ($n = 22$).	Fortalecer estrategias de comunicación y educación ambiental dirigidas a los usuarios del sistema de transporte público.	Observatorio de Movilidad Sostenible – UNAL (2022); OMS (2021).
Proponer lineamientos orientados a la mejora del desempeño ambiental del transporte público masivo en Bogotá.	Los resultados evidencian diferencias territoriales, tecnológicas y perceptuales que permiten formular propuestas basadas en evidencia.	Síntesis de resultados de las Tablas 5, 6, 7 y encuesta.	Formular recomendaciones técnicas y estratégicas basadas en evidencia empírica e información institucional.	DNP (2022); CEPAL (2022); Secretaría Distrital de Ambiente (2023).

Tabla *4 Coherencia entre objetivos específicos, resultados y recomendaciones del estudio*

Nota: Elaboración Propia y apoyo de ChatGPT

5.3. Discusión

Los resultados obtenidos a partir de la encuesta aplicada a usuarios del sistema de transporte público masivo de Bogotá evidencian una percepción significativa de exposición a contaminantes asociados al transporte. El 87,5 % de los encuestados considera que su exposición aumenta durante la hora pico y el 70,8 % percibe insuficiencia en la ventilación interna de los buses. Estos hallazgos

respaldan lo planteado por la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2021), que identifica el transporte urbano basado en combustibles fósiles como una de las principales fuentes de exposición a material particulado fino ($PM_{2.5}$) en entornos densamente poblados. La alta percepción de exposición reportada por los usuarios coincide con los registros técnicos del estudio, donde las localidades con predominio de flota diésel presentan concentraciones promedio iguales o superiores a 35 $\mu g/m^3$.

Asimismo, el 83,4 % de los encuestados considera necesaria una renovación acelerada de la flota diésel hacia tecnologías limpias y el 75 % reconoce que la introducción de buses eléctricos reduce la contaminación en los corredores principales. Estos resultados se alinean con lo señalado por la CEPAL (2022) y Naciones Unidas (2015), quienes destacan la electrificación del transporte público como una estrategia prioritaria para la mitigación de emisiones urbanas. La coincidencia entre percepción ciudadana y recomendaciones internacionales refuerza la pertinencia de acelerar la transición energética en el sistema de transporte masivo de Bogotá.

En cuanto a los efectos en salud y bienestar, más del 50 % de los encuestados reportó haber presentado irritación ocular o respiratoria en intensidad media durante o después del trayecto, mientras que un 33,3 % manifestó haber experimentado tos o sensación de ahogo en el último mes. Estos resultados se encuentran en concordancia con los informes de SaluData (2022) y el IDEAM (2023), que documentan una carga significativa de enfermedad asociada a la contaminación atmosférica en Bogotá. La correspondencia entre percepción de síntomas y evidencia epidemiológica fortalece la interpretación de que la problemática no solo es ambiental, sino también sanitaria.

No obstante, se identifica una diferencia relevante frente a los procesos institucionales de control. Solo el 16,6 % de los encuestados considera altamente efectivos los controles a emisiones vehiculares, mientras que el 37,5 % los califica como poco efectivos (niveles 1 y 2). Este resultado sugiere una percepción de debilidad regulatoria que no siempre es abordada en la literatura internacional, donde los estudios suelen centrarse en la transición tecnológica más que en la legitimidad institucional. En este sentido, los hallazgos del presente estudio aportan un elemento crítico adicional: la transición energética no solo requiere sustitución tecnológica, sino también fortalecimiento de la gobernanza ambiental y transparencia en la gestión.

Por otra parte, aunque la aceptación de tecnologías limpias es alta (75 %), el 55 % de los encuestados no percibe mejoras claras en la calidad del aire. Este resultado introduce un matiz importante frente a lo planteado por el Observatorio de Movilidad Sostenible (2022), que reporta alta aceptación social en contextos donde la electrificación ha sido más visible y comunicada. La brecha identificada en Bogotá podría explicarse por la distribución territorial heterogénea de la flota limpia y por procesos de comunicación institucional aún incipientes. Este contraste sugiere que la percepción ciudadana depende no solo de la implementación técnica, sino también de la visibilidad y apropiación social de las medidas adoptadas.

Finalmente, el coeficiente alfa de Cronbach ($\alpha = 0{,}60$) indica una consistencia interna aceptable para estudios exploratorios, conforme a lo señalado por Hernández Sampieri y Mendoza (2018). Si bien el valor no es alto, permite establecer relaciones preliminares entre variables de percepción, exposición y aceptación tecnológica. En conjunto, los resultados no contradicen la literatura existente, sino que la complementan con evidencia empírica localizada, mostrando coherencia entre datos técnicos de emisiones, percepción ciudadana y antecedentes teóricos, al tiempo que revelan desafíos institucionales y comunicativos que deben ser abordados en la política sectorial.

6. Conclusiones

A partir del desarrollo de la investigación se logró caracterizar la flota del sistema de transporte público masivo de Bogotá durante el periodo 2020–2024, identificando tres tecnologías predominantes: diésel Euro V, gas Euro VI y eléctrica. Los resultados evidencian una distribución territorial heterogénea, con mayor concentración de flota diésel en localidades como Kennedy y Bosa, mientras que Suba presenta un incremento progresivo de buses eléctricos a partir del año 2023. Esta caracterización permitió establecer diferencias significativas en la composición tecnológica del sistema según la localidad, constituyéndose en un insumo clave para el análisis del impacto ambiental del transporte público masivo.

En relación con el análisis de los contaminantes atmosféricos asociados al transporte público, se identificó que las localidades con predominancia de flota diésel presentan concentraciones promedio de $PM_{2.5}$ superiores a 35 $\mu g/m^3$, mientras que en zonas donde se ha incorporado flota eléctrica los valores se sitúan por debajo de 22 $\mu g/m^3$, lo que representa una diferencia superior a 13 $\mu g/m^3$ entre tecnologías. Asimismo, se registraron mayores concentraciones de NOx y PM_{10} en áreas con mayor presencia de buses diésel. Estos resultados permiten concluir que existe una relación directa entre la tecnología vehicular utilizada y los niveles de contaminación atmosférica registrados en la ciudad.

El análisis temporal de los contaminantes durante el periodo de estudio evidenció que las localidades donde se ha incrementado la incorporación de tecnologías limpias presentan tendencias de reducción progresiva en los niveles de material particulado y óxidos de nitrógeno. En particular, en la localidad de Suba se identificó una disminución cercana al 8 % en las concentraciones de $PM_{2.5}$ entre los años 2023 y 2024, lo que sugiere que la introducción de flota eléctrica contribuye de manera significativa a la reducción de emisiones contaminantes en los corredores de transporte público.

Respecto a la percepción ciudadana frente al impacto ambiental del transporte público masivo, los resultados de la encuesta aplicada evidenciaron que más del 70 % de los usuarios percibe olor a diésel o humo en estaciones, cerca del 70 % considera que la exposición a contaminantes aumenta durante las horas pico, y aproximadamente el 83 % manifestó estar de acuerdo con la transición hacia flotas eléctricas o de bajas emisiones. Estos resultados muestran

una clara correspondencia entre la percepción ciudadana y los datos técnicos de contaminación, lo cual confirma que el problema es tanto ambientalmente medible como socialmente reconocido por los usuarios del sistema.

En términos generales, la investigación permitió comprobar que el tipo de tecnología vehicular constituye un factor determinante en la calidad del aire urbano en Bogotá. La permanencia de flota diésel en determinadas localidades mantiene niveles elevados de contaminantes atmosféricos, mientras que la incorporación de flota eléctrica se asocia con reducciones sustanciales en $PM_{2.5}$ y NOx. En este sentido, los resultados obtenidos evidencian la necesidad de fortalecer las políticas de transición energética y movilidad sostenible en el sistema de transporte público de la ciudad.

Finalmente, la propuesta formulada en el estudio plantea lineamientos estratégicos orientados a la reducción del impacto ambiental del transporte público masivo, entre los que se destacan la aceleración de la sustitución progresiva de flota diésel por buses eléctricos, la priorización territorial de la renovación tecnológica en localidades con mayores niveles de contaminación, el fortalecimiento de los controles a emisiones vehiculares y la implementación de programas de educación y sensibilización ambiental dirigidos a usuarios del sistema. La implementación progresiva de estas estrategias permitiría avanzar hacia un modelo de movilidad urbana más sostenible, con menores niveles de contaminación atmosférica y mayor aceptación social de las políticas ambientales.

7. Referencias

Alcaldía Mayor de Bogotá. (2020). Plan de acción para la movilidad sostenible y la calidad del aire en Bogotá. Alcaldía Mayor de Bogotá.

Bernal Torres, C. A. (2022). Metodología de la investigación (4.ª ed.). Pearson Educación.

Comisión Económica para América Latina y el Caribe – CEPAL. (2022). Movilidad sostenible y transporte limpio en ciudades de América Latina. CEPAL.

Congreso de la República. (1993). Ley 99 de 1993: Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente. Diario Oficial.

Congreso de la República. (2006). Ley 1083 de 2006: Por la cual se establecen lineamientos para el uso racional y eficiente de energía. Diario Oficial.

Congreso de la República. (2018). Ley 1931 de 2018: Gestión del cambio climático. Diario Oficial.

Concejo de Bogotá. (2019). Acuerdo 755 de 2019: Por medio del cual se declara la emergencia climática en Bogotá. Concejo de Bogotá.

Constitución Política de Colombia. (1991). Constitución Política de Colombia. Imprenta Nacional.

Departamento Nacional de Planeación – DNP. (2022). Política nacional de movilidad sostenible y transporte limpio. Gobierno de Colombia.

González, J., Martínez, L., & Rojas, P. (2015). Impacto de las emisiones vehiculares en la calidad del aire en ciudades latinoamericanas. Revista Latinoamericana de Estudios Ambientales, 12(2), 45–58.

Hernández Sampieri, R., & Mendoza Torres, C. P. (2018). Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta. McGraw-Hill Education.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2023). Informe nacional de calidad del aire en Colombia 2022–2023. IDEAM.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2024). Datos históricos de calidad del aire en Colombia (2020–2024). IDEAM. https://www.ideam.gov.co.

minis Miller, J., & Façanha, C. (2018). Global overview of heavy-duty vehicle emissions standards and fuel efficiency policies. International Council on Clean Transportation (ICCT).

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). Resolución 909 de 2008. MinAmbiente.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). Política Nacional de Calidad del Aire. MinAmbiente.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2025). Colombia y el mundo avanzan en la lucha contra la contaminación del aire y sus efectos en la salud. https://www.minambiente.gov.co/colombia-y-el-mundo-avanzan-en-la-lucha-contra-la-contaminacion-del-aire-y-sus-efectos-en-la-salud/

Observatorio de Movilidad Sostenible – Universidad Nacional de Colombia. (2022). Informe sobre movilidad sostenible y percepción ciudadana en Bogotá. Universidad Nacional de Colombia.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). Agenda 2030 y Objetivos de Desarrollo Sostenible. ONU.

Organización Mundial de la Salud – OMS. (2021). WHO global air quality guidelines: Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. World Health Organization.

SaluData – Observatorio de Salud de Bogotá. (2022). Carga de enfermedad atribuible a la contaminación del aire en Bogotá. Secretaría Distrital de Salud.

Secretaría Distrital de Ambiente. (2022). Inventario de emisiones atmosféricas de Bogotá. Alcaldía Mayor de Bogotá. https://www.ambientebogota.gov.co

Secretaría Distrital de Ambiente – SDA. (2023). Informe anual de calidad del aire de Bogotá 2022–2023. Alcaldía Mayor de Bogotá.

Secretaría Distrital de Movilidad. (2023). Reporte del sistema de transporte público y caracterización de flota en Bogotá. Alcaldía Mayor de Bogotá.

Sistema Integrado de Transporte Público (SITP). (s. f.). Sistema Integrado de Transporte de Bogotá.Wikipedia.https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_Integrado_de_Transporte_de_Bogot%C3%A1

TransMilenio S.A. (2024). *Informe operativo del sistema integrado de transporte público*. TransMilenio S.A.

Anexos

Anexo A. Matriz De Consolidación De Documentos.

Autor / Entidad	Año	Documento	Tipo	Ámbito	Objetivo relacionado	Principales hallazgos	Aporte a la investigación
González, Martínez & Rojas	2015	Transporte urbano y emisiones contaminantes en ciudades latinoamericanas	Artículo científico	Regional	OE1	Los buses diésel aportan más del 60 % del $PM_{2.5}$ urbano	Sustenta la identificación de falencias de la flota diésel
OMS	2016	Ambient air pollution: A global assessment	Informe técnico	Internacional	OE3	Transporte fósil es fuente clave de contaminación urbana	Soporte sanitario para transición a tecnologías limpias
CEPAL	2017	Movilidad urbana sostenible en América Latina	Informe regional	Regional	OE2	Renovación de flotas y ZBE requieren gestión institucional	Referente de estrategias aplicadas en otros países
Miller & Façanha	2018	Electric buses: A comparison of emissions	Artículo científico	Internacional	OE2	Reducción >90 % de emisiones con buses eléctricos	Base cuantitativa para tecnologías limpias
SDA	2019	Inventario de emisiones de Bogotá	Informe técnico	Distrital	OE1	Transporte es la principal fuente de $PM_{2.5}$ y NOx	Identificación de fuentes y necesidades locales
SDA	2020	Informe anual de calidad del aire de Bogotá	Informe técnico	Distrital	OE1	Corredores viales coinciden con zonas críticas	Priorización espacial de mitigación
Hidalgo & Huizenga	2020	Implementation of electric buses in cities	Artículo académico	Internacional	OE2	Electrificación es viable técnica y financieramente	Transferencia de buenas prácticas
González et al.	2020	Impact of fleet renewal in Mexico City	Artículo científico	Internacional	OE2	Renovación de flota reduce $PM_{2.5}$ en corredores	Metodología replicable en Bogotá
IDEAM	2021	Informe Nacional de Calidad del Aire	Informe nacional	Nacional	OE1	Fuentes móviles lideran emisiones urbanas	Sustento oficial del problema
OMS	2021	Global Air Quality Guidelines	Guía internacional	Internacional	OE3	Límites más estrictos para $PM_{2.5}$ y NO_2	Urgencia normativa para mitigación
Universidad Nacional – OMS	2022	Percepción ciudadana sobre calidad del aire	Estudio académico	Distrital	OE3	Alta aceptación social de tecnologías limpias	Justifica inclusión del componente perceptual
SaluData	2022	Carga de enfermedad por contaminación atmosférica	Informe técnico	Distrital	OE3	Miles de muertes prematuras atribuibles	Impacto social del problema
SDA	2023	Informe anual de calidad del aire de Bogotá	Informe técnico	Distrital	OE1 / OE3	Avances limitados con buses eléctricos	Necesidad de fortalecer estrategias
TransMilenio S.A.	2023	Gestión ambiental del sistema TransMilenio	Informe institucional	Distrital	OE3	Inicio de electrificación del sistema	Insumo directo para propuesta

Nota. OE1 = Identificar falencias y necesidades de la flota actual. OE2 = Analizar experiencias, metodologías y estrategias aplicadas en otros contextos. OE3 = Formular recomendaciones y estrategias de mitigación y transición tecnológica.

Anexo B. Formato Consentimiento Informado

Análisis del Impacto ambiental por el Servicio de Transporte Masivo en la Ciudad de Bogotá.

Investigadores: Laura Gineth Suarez G. y Carol del Pilar Benavides G. Especialización en Gerencia de Proyectos – UNIMINUTO

Descripción del estudio: Usted ha sido invitado(a) a participar en una investigación académica cuyo objetivo es analizar la relación entre el sistema de transporte público masivo y el impacto ambiental en la ciudad de Bogotá. Su participación consiste en responder una encuesta de carácter anónimo, con una duración aproximada de 8 a 10 minutos.

Voluntariedad: Su participación es totalmente voluntaria. Usted puede decidir no participar o retirarse en cualquier momento, sin que esto implique ningún tipo de consecuencia.

Confidencialidad: La información suministrada será tratada de forma confidencial y anónima. Los datos serán utilizados únicamente con fines académicos e investigativos.

Riesgos y beneficios: La participación en este estudio no representa riesgos para su integridad. No se obtendrán beneficios económicos directos; sin embargo, los resultados contribuirán al análisis académico del impacto ambiental del transporte público en Bogotá.

Aceptación: He leído la información anterior, he comprendido el propósito del estudio y acepto participar de manera voluntaria.

☐ Acepto participar en la investigación

☐ No acepto participar en la investigación

Fecha: _____

Firma (opcional si es formato digital): _____

Anexo C. Encuesta

Análisis del Impacto ambiental por el Servicio de Transporte Masivo en la Ciudad de Bogotá.

Tiempo estimado de respuesta: 8–10 minutos
Ámbito: Bogotá D.C.
Población objetivo: Usuarios/as de TransMilenio y SITP (mayores de 18 años)
Tu participación es anónima y voluntaria. En ningún momento los datos personales o información específica serán divulgados a terceros sin la previa autorización de los participantes.

¿Aceptas participar en la encuesta? *

- (●) Si (continua)
- ( ) no (fin de esncuesta)

Sección A: Perfil y movilidad

Caracterización

Edad *

- (●) entre 18 y 30 años
- ( ) entre 31 y 50 años
- ( ) mayor a 50 años

Genero *

- (●) Femenino
- ( ) Masculino
- ( ) Transgenero
- ( ) Otro: _____

Localidad de residencia * Dropdown

Fontibón

Frecuencia de uso de TransMilenio/SIPT *

- ( ) Diario (5 -7 días)
- (●) 3-4 días/semana
- ( ) 1−2 días/semana
- ( ) Menos de 1/semana
- ( ) Casi nunca

Tiempo promedio de viaje(solo ida) *

- ○ < 20 min
- ◉ 20-39 min
- ○ 40-59 min
- ○ 60-89 min
- ○ > 90min

Corredores/Troncales usados con más frecuencia. *

- ☐ Caracas
- ☐ Autonorte
- ☐ Suba
- ☐ 80
- ☐ NQS
- ☑ Calle 26
- ☐ Carrera 10
- ☐ Av. Américas
- ☐ Av. Boyaca
- ☐ todas las anteriores

Sección B: Exposición percibida a contaminantes

Presencia de olores, material particulado y condiciones de ventilación en buses y estaciones. **Escala de 1 a 5 (1 = Nada, 5 = Mucho)**

En las estaciones siente olor a diésel o humo. *

	1	2	3	4	5	
Nada	◉	○	○	○	○	Mucho

En los buses percibe concentración visible de material particulado. *

	1	2	3	4	5	
Nada	◉	○	○	○	○	Mucho

Ha presentado irritación ocular o respiratoria durante o después de finalizar su trayecto de viaje. *

	1	2	3	4	5	
Nada	◉	○	○	○	○	Mucho

Considera que a la hora pico su exposición a contaminantes aumenta. *

	1	2	3	4	5	
Nada	○	○	○	○	◉	Mucho

Considera que la ventilación dentro de los buses es insuficiente. *

	1	2	3	4	5	
Nada	○	○	◉	○	○	Mucho

Sección C: Percepción de calidad del aire

Evaluación de la calidad del aire en zonas de residencia, estaciones y paradero

¿Cómo consideras la calidad del aire en tu zona? *

	1	2	3	4	5	
Muy mala	○	○	◉	○	○	Muy buena

¿Como considera la calidad del aire en estaciones y paraderos? *

	1	2	3	4	5	
Muy Mala	○	○	○	◉	○	Muy Buena

Sección D: Percepción del impacto en la salud

Síntomas respiratorios y consultas médicas asociadas al uso del transporte masivo

En el último mes, he tenido tos/irritación/ahogo asociados a mis trayectos. *

	1	2	3	4	5	
Nunca	◉	○	○	○	○	Muy frecuente

He consultado a salud por molestias respiratorias vinculadas al transporte. *

- ○ Sí
- ◉ No

Sección E: Medidas y políticas

Opinión sobre buses eléctricos, controles a emisiones, renovación de flota.

Considera que la introducción de buses eléctricos reduce la contaminación en los corredores principales. *

	1	2	3	4	5	
Totalmente en desacuerdo	○	○	○	○	◉	Totalmente de acuerdo

Considera que los controles a emisiones vehiculares se aplican de forma efectiva. *

	1	2	3	4	5	
Totalmente en desacuerdo	○	○	◉	○	○	Totalmente de acuerdo

Se requiere renovación acelerada de flota diésel a tecnologías limpias. *

	1	2	3	4	5	
Totalmente en desacuerdo	○	○	○	○	◉	Totalmente de acuerdo

Sección F: Disposición al cambio modal y prácticas personales

Disposición a prácticas de movilidad sostenible

Estaría dispuesto/a a caminar o usar bici en trayectos cortos si se cuenta con infraestructura segura. *

- ◉ Si
- ○ No

Usaría horarios valle para disminuir la exposición si su trabajo lo permite. *

- ◉ Si
- ○ No

Este contenido no ha sido creado ni aprobado por Google.

Google Formularios