



Evaluación de las emisiones vehiculares en condiciones reales de circulación en Bogotá, Colombia

Autores: Mallery Crowe, Michelle Meyer, Helmer Acevedo, Yoann Bernard

JUNIO DE 2026



AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Indra Colombia por su colaboración en la selección de los sitios de prueba y en la gestión de los permisos correspondientes. Asimismo, agradecen a la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá por facilitar el acceso a los datos del registro vehicular de la ciudad, a la Secretaría Distrital de Movilidad de Bogotá por su orientación en la selección de los sitios, y a TransMilenio por su papel en la coordinación de las pruebas de los buses que operan dentro de la red de transporte público de tránsito rápido por autobús (BRT). También agradecen a la Coalición Clima y Aire Limpio. Finalmente, extienden su gratitud a Kaylin Lee y Alexander Tankou, del Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT), por su revisión técnica y sus valiosos comentarios para este informe. Este estudio contó con el financiamiento y generoso apoyo de la Fundación FIA.

La Fundación FIA y el ICCT crearon la Iniciativa The Real Urban Emissions (TRUE). El objetivo de TRUE es suministrar a las ciudades datos precisos sobre las emisiones en condiciones reales de circulación de sus flotas vehiculares y proporcionarles información técnica que sirva de base para la toma de decisiones estratégicas.

RESUMEN EJECUTIVO

La contaminación atmosférica derivada del transporte representa uno de los mayores desafíos para Bogotá, la capital de Colombia. Las concentraciones anuales de material particulado (MP) en la ciudad superan en más de tres veces el límite de 5 mg/m³ establecido por la Organización Mundial de la Salud. Siendo el sector transporte responsable de una proporción significativa del material particulado (PM) de la ciudad.

Para mitigar este impacto, Bogotá implementa diversas estrategias: normas nacionales de emisión, la electrificación progresiva de su amplia red de transporte público, políticas de restricción del tráfico y la creación de áreas prioritarias específicas para la reducción de la contaminación atmosférica. Si bien Colombia adoptó estándares de emisión equivalentes a Euro VI/6 en 2023 para vehículos pesados y vehículos ligeros propulsados por diésel o gas natural comprimido (GNC), los vehículos ligeros a gasolina aún se rigen por la norma Euro 4, que es menos estricta. A nivel local, Bogotá cuenta con una de las redes de autobuses de tránsito rápido (BRT) más extensas del mundo. Este sistema opera con una flota de más de 14.000 autobuses eléctricos, con esfuerzos continuos para sustituir las unidades diésel por alternativas de bajas o cero emisiones, con miras a lograr una flota totalmente eléctrica para el año 2036. La política de pico y placa restringe la circulación vehicular según el último dígito de la placa durante los días hábiles para mitigar la congestión en la ciudad. Por su parte, la iniciativa Zonas Urbanas por un Mejor Aire (ZUMA) identifica sectores prioritarios de la ciudad para implementar acciones interdisciplinarias que reduzcan la contaminación atmosférica.

Este estudio, elaborado por la Iniciativa The Real Urban Emissions (TRUE), analiza las emisiones de gases de escape en condiciones reales de circulación de óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO) y material particulado (MP) de la flota de Bogotá, con datos recolectados en septiembre y octubre de 2023. El informe evalúa la distribución, características y niveles de emisión de los vehículos monitoreados, proponiendo rutas de política pública para reducir la contaminación vehicular en la capital.

El análisis demuestra que la adopción gradual de estándares de emisión ha disminuido los niveles contaminantes en Bogotá; sin embargo, ciertos segmentos vehiculares aún registran emisiones elevadas que exigen intervenciones específicas. Los

hallazgos sustentan las siguientes conclusiones y recomendaciones:

Los vehículos diésel registraron emisiones de NO_x y MP superiores a sus límites de certificación, lo que subraya la necesidad de priorizar estos segmentos en programas de inspección y mantenimiento, así como en la vigilancia de emisiones en condiciones reales.

En general, los vehículos diésel evaluados mostraron una mejora mínima en sus emisiones de NO_x a pesar del aumento en la rigurosidad de los estándares. Los microbuses y camiones ligeros diésel presentaron emisiones de NO_x que superan en más de cuatro veces el límite establecido por los vehículos homologados bajo el estándar Euro IV. Los autobuses y los vehículos pesados diésel registraron emisiones de MP 7 y 15 veces superiores a los límites establecidos por vehículos homologados bajo el estándar Euro IV, respectivamente. La detección remota en vía pública permitiría identificar vehículos diésel con altas emisiones y actuar como una herramienta de vigilancia del mercado para verificar que los vehículos cumplan con las normas de emisiones en condiciones reales de operación. Estos resultados también destacan la importancia de la eliminación acelerada de los autobuses diésel en Bogotá, priorizando su reemplazo por tecnologías eléctricas o de bajas emisiones.

Las emisiones de los automóviles de pasajeros a gasolina en Colombia han disminuido gracias a la implementación progresiva de normas de emisiones vehiculares, y podrían reducirse aún más con la adopción de los requisitos Euro 6.

Los vehículos de pasajeros a gasolina fabricados desde 2023 emitieron entre un 88% y un 96% menos contaminantes NO_x, MP, HC y CO en promedio que los vehículos anteriores a 1998, que fueron fabricados antes de que se establecieran los estándares de emisiones en Colombia. La evidencia de otras ciudades muestra que la transición a estándares Euro 6, con límites más estrictos de emisiones de NO_x y pruebas en condiciones reales de conducción, contribuye a reducir las emisiones en el mundo real.

Los automóviles de pasajeros a gasolina anteriores a 2010 contribuyen de manera desproporcionada a las emisiones de todos los contaminantes estudiados, lo que indica que restringir su circulación podría reducir eficazmente las emisiones. Los vehículos de pasajeros a gasolina fabricados antes de 2010 (previos a las normas de emisiones Euro 2 en Colombia), que representaron solo el 24% de la flota monitoreada, aportaron entre el 43% y el 58% de las emisiones acumuladas de NO_x,

MP, HC y CO por distancia recorrida. Instrumentos como el pico y placa y la iniciativa ZUMA podrían limitar gradualmente su operación, complementándose con incentivos económicos para facilitar la transición hacia modelos más recientes y limpios.

Los vehículos ligeros a GNC emitieron más del doble de NO_x que sus equivalentes a gasolina. Se observó que los automóviles de pasajeros y camiones ligeros a GNC emiten más del doble de NO_x en condiciones reales en comparación con vehículos similares a gasolina. Estos niveles elevados podrían deberse a que se trata de vehículos adaptados al GNC en lugar de modelos fabricados originalmente para este combustible, ya que estos grupos no fueron distinguibles en este estudio. Actualmente, los propietarios de ciertos vehículos a GNC reciben múltiples beneficios, como la exención del pico y placa y descuentos en el impuesto y seguro vehicular anual. Se lograrían mayores reducciones de emisiones priorizando incentivos para vehículos eléctricos ligeros frente a los de combustión interna.

Las políticas dirigidas a los taxis con mayores emisiones, mediante mantenimiento y chatarrización, ayudarían a reducir sus elevadas emisiones en condiciones reales. En Bogotá, los taxis registraron emisiones promedio en condiciones reales de NO_x, CO, HC y MP entre tres y cinco veces superiores a las de vehículos particulares del mismo año-modelo, lo que sugiere una conversión masiva a GNC y un deterioro acelerado de los sistemas de control de emisiones. Añadir un límite de NO_x en las pruebas periódicas obligatorias permitiría identificar y controlar los taxis altamente contaminantes. Asimismo, un programa de incentivos económicos para propietarios de taxis podría fomentar el desguace de vehículos más antiguos y su reemplazo por modelos Euro 4 o superiores. Priorizar el desguace del 25% de los taxis con mayor antigüedad —aquellos con 13 años o más— facilitaría el retiro progresivo de los vehículos más contaminantes.

ÍNDICE

Resumen ejecutivo	i
Introducción	2
Contexto de la política	3
Detección remota	6
Recopilación de datos	6
Resumen de la muestra	6
Características de la flota	9
Análisis de emisiones vehiculares	11
Emisiones por clase de vehículo	12
Tendencias de emisiones en automóviles de pasajeros.....	12
Tendencias de emisiones en taxis	13
Tendencias de las emisiones en vehículos diésel	18
Estudio de caso de emisiones: Bogotá frente a Ciudad de México	22
Tendencias de vehículos y emisiones	22
Diferencias regionales	23
Importancia de monitorear las emisiones en condiciones reales.....	26
Conclusiones y recomendaciones de políticas.....	27
Apéndice	30

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica representa un desafío crítico para Bogotá, la capital y ciudad más grande de Colombia, la cual alberga una población superior a los siete millones de habitantes.¹ En los últimos 10 años, las concentraciones ambientales anuales de material particulado fino (MP_{2.5}) han superado sistemáticamente los 16 mg/m³, cifra que triplica el estándar de 5 mg/m³ establecido por la Organización Mundial de la Salud.² Estimaciones del Departamento Nacional de Planeación de Colombia estimaron que 100 muertes por cada 100.000 habitantes estaban asociadas con la contaminación del aire urbano en Bogotá en 2015, con un costo económico calculado en 3,3 mil millones de pesos colombianos.³ Los niños y los adultos mayores son grupos especialmente vulnerables: se ha comprobado que el incremento en las concentraciones diarias de contaminantes en el aire de Bogotá, incluidos el MP_{2.5}, el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el monóxido de carbono (CO), eleva las visitas a urgencias por enfermedades respiratorias en estas poblaciones.⁴ Asimismo, la exposición a la contaminación no es equitativa en la ciudad: la región suroccidental, donde reside más del 30% de la población y se concentran hogares de bajos ingresos, es la zona más afectada por los altos niveles de contaminación ambiental.⁵

El sector transporte es un importante contribuyente a la contaminación atmosférica en la ciudad. Las investigaciones estiman que las emisiones del transporte contribuyen entre un 17% y un 31% del total de emisiones

de MP.⁶ Los vehículos diésel son los que más contribuyen a las emisiones en ruta de óxidos de nitrógeno (NO_x; 56%) y de MP_{2.5} (82%) en Bogotá.⁷ A pesar de contar con una extensa red de transporte público, la congestión vehicular sigue siendo un reto mayúsculo.⁸ En 2020, Bogotá fue clasificada como la ciudad más congestionada del mundo, con conductores que pasaban un promedio de 133 horas anuales en el tráfico, con velocidades medias de apenas 18 km/h en horas pico.⁹

Abordar la contaminación del sector de transporte y sus impactos en la salud es una prioridad institucional en Bogotá. La ciudad se ha unido a la iniciativa Breathe Cities con la meta de reducir la contaminación del aire en un 30% para 2030.¹⁰ También existe un apoyo generalizado entre la población: el 98% de los residentes de Bogotá desean que los líderes tomen medidas para reducir la contaminación del aire.¹¹ Para ello, se han implementado varias políticas orientadas a reducir la contaminación vehicular, como la electrificación de autobuses, la reducción de la congestión mediante restricciones al tráfico y la creación de zonas designadas para la reducción de la contaminación atmosférica. A nivel nacional, Colombia ha adoptado estándares de emisiones equivalentes a Euro VI/6 para vehículos pesados así como para vehículos ligeros diésel y gas natural comprimido (GNC)¹²; no obstante, las normas

1 Departamento Administrativo Nacional de Estadística, "Censo Nacional de Población y Vivienda: 2018 - Colombia", última modificación el 30 de agosto de 2019, https://sitios.dane.gov.co/cnpv/-/!.

2 Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., "Concentración de Material Particulado Inferior a 2.5 Micrómetros {PM2.5} Promedio Anual - PM2.5PA", Ambiente Bogotá, 2024, <https://oab.ambientebogota.gov.co/concentracion-de-material-particulado-inferior-a-2-5-micrometros-pm2-5-promedio-anual/>; Aidan Farrow, *Evaluation of Air Pollution Monitoring in Bogotá, Colombia* (Greenpeace, abril de 2021), <https://www.greenpeace.to/greenpeace/?p=3933>.

3 Ana María Vargas Rodríguez et al., *Valoración Económica de la Degradación Ambiental en Colombia 2015* (Departamento Nacional de Planeación, 2018), <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Valoraci%C3%B3n%20econ%C3%B3mica%20de%20la%20degradaci%C3%B3n%20ambiental.pdf>.

4 Laura Andrea Rodríguez-Villamizar et al., "Short-Term Joint Effects of Ambient Air Pollutants on Emergency Department Visits for Respiratory and Circulatory Diseases in Colombia, 2011-2014", *Environmental Pollution* 248 (mayo de 2019): 380-387, <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.028>.

5 Luis A. Guzman et al., "Inequality in Personal Exposure to Air Pollution in Transport Microenvironments for Commuters in Bogotá", *Case Studies in Transport Policy* 11 (marzo de 2023): 100963, <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2023.100963>; Ivan Mura et al., "A Decade of Air Quality in Bogotá: A Descriptive Analysis," *Frontiers in Environmental Science* 8 (2020), <https://www.frontiersin.org/journals/environmental-science/articles/10.3389/fenvs.2020.00065>.

6 Secretaría de Ambiente SDA, *Inventario de Emisiones de Bogotá: Contaminantes criterio y carbono negro 2022 [Bogotá emissions inventory: Criteria pollutants and Black Carbon 2022]* (2024), https://www.ambientebogota.gov.co/todas-las-investigaciones/-/asset_publisher/pibvwzUnZiNr/document/id/6881078; Secretaría de Ambiente SDA, *Inventario de Emisiones de Bogotá: Contaminantes criterio y carbono negro 2023 [Bogotá emissions inventory: Criteria pollutants and Black Carbon 2023]* (2025), https://ambientebogota.gov.co/documents/10184/397082/INVENTARIO+EMISIONES_2023_w_apnds.pdf; David Jaime and Sonia Mangones, "Benefits of Transportation Strategies to Reduce On-Road Traffic Pollution Emissions: Evidence from Bogotá, Colombia," *Case Studies on Transport Policy* 21 (September 2025): 101527, <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101527>.

7 Jaime and Mangones, "Benefits of Transportation Strategies to Reduce On-Road Traffic Pollution Emissions."

8 Ricardo Alirio Gonzalez et al., "Government and Governance in Intelligent Cities, Smart Transportation Study Case in Bogotá, Colombia", *Ain Shams Engineering Journal* 11, no. 1 (marzo de 2020): 25-34, <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.05.002>.

9 Bob Pishue, *2020 Global Traffic Scorecard* (INRIX Research, 2020), https://www.valoranalitik.com/wp-content/uploads/2021/03/2020_INRIX_Scorecard_Report_US.pdf.

10 Clean Air Fund, "The City of Bogotá Joins Breathe Cities Initiative to Tackle Global Air Pollution", 23 de septiembre de 2024, <https://www.cleanairfund.org/news-item/bogota-breathe-cities/>.

11 C40 Cities, "C40 Cities Mayors Launch Global Air Quality Marathon as New Poll Reveals Widespread Support", comunicado de prensa, 25 de julio de 2024, <https://www.c40.org/news/c40-global-air-quality-campaign-poll-its-in-the-air/#:~:text=New%20data%20underscores%20the%20popularity,%25%20and%2096%25%2C%20respectively>.

12 En este artículo, se utilizó el término gas natural comprimido (GNC) para referirse al gas natural utilizado como combustible vehicular, en lugar de gas natural vehicular (GNV) o gas natural comprimido para uso vehicular (GNCV).

de emisiones para vehículos ligeros a gasolina son menos estrictas, con normas Euro 4 vigentes para estos vehículos desde 2023.¹³

Contar con información sobre las emisiones reales de escape en circulación de la flota vehicular de Bogotá es fundamental para diseñar e implementar políticas eficaces de reducción de emisiones que permitan alcanzar la meta de la ciudad de reducir la contaminación del aire en un 30% para 2030. A medida que la ciudad introduce el programa Zonas Urbanas por un Mejor Aire (ZUMA), una iniciativa para crear zonas con aire más limpio en la ciudad, estos datos son clave para identificar los segmentos vehiculares que requieren una intervención prioritaria, maximizando así los beneficios en la calidad del aire. Además, la información de las emisiones de la flota permite identificar brechas normativas, lo que ayuda a priorizar futuras políticas y formular más programas para abordar los vehículos con altas emisiones y regular con mayor eficacia las emisiones reales de los vehículos futuros.

Este estudio aborda estas brechas de conocimiento mediante el análisis de datos de emisiones de escape en condiciones reales en Bogotá. La Iniciativa The Real Urban Emissions (TRUE) llevó a cabo una campaña de medición durante 35 días en septiembre y octubre de 2023, utilizando tecnología de detección remota para medir las emisiones reales en el tubo de escape de NO_x, hidrocarburos (HC), CO y MP. Se recolectaron más de 272.025 mediciones en nueve puntos distintos de la ciudad, abarcando automóviles particulares, taxis, vehículos ligeros y pesados, autobuses y motocicletas. Este trabajo da continuidad a los estudios realizados por la iniciativa TRUE en América Latina, con estudios previos en Ciudad de México y São Paulo.¹⁴ En las secciones siguientes, se presentan las emisiones reales por tipo de vehículo, la composición de la flota y un estudio de caso comparativo de las emisiones de automóviles particulares y taxis entre Bogotá y Ciudad de México. Al final, se presentan recomendaciones de política pública focalizadas para reducir las emisiones vehiculares en Bogotá.

13 Los estándares Euro 6 solo pueden adoptarse para vehículos livianos a gasolina con combustibles de mayor calidad, con un contenido de azufre de 10 ppm o inferior. Véase: Martin Williams y Ray Minjares, *A Technical Summary of Euro 6/VI Vehicle Emission Standards* (International Council on Clean Transportation, 2016), https://theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6-VI_briefing_jun2016.pdf.

14 Michelle Meyer et al., *Assessment of Real-World Passenger Vehicle and Taxi Emissions in Mexico City* (Iniciativa TRUE, 2024), <https://trueinitiative.org/research/assessment-of-real-world-passenger-vehicle-and-taxi-emissions-in-mexico-city/>; Kaylin Lee et al., *Assessment of Real-World Emissions in São Paulo* (Iniciativa TRUE, 2025), <https://trueinitiative.org/research/assessment-of-real-world-vehicle-emissions-in-sao-paulo/>.

CONTEXTO DE LA POLÍTICA

Bogotá ha logrado avances sustanciales en la mejora de la calidad del aire durante las últimas décadas. Estos esfuerzos han incluido la implementación de estándares nacionales de emisión vehiculares, la inspección técnica periódica de vehículos, requisitos de calidad de los combustibles, la expansión del sistema de transporte público y la promoción de zonas para un aire más limpio.

Colombia estableció los primeros requisitos nacionales de emisiones vehiculares en 1996 mediante las Resoluciones 909 y 005.¹⁵ Desde entonces, la exigencia de estos estándares de emisiones ha aumentado de manera progresiva (Tabla 1).¹⁶ Los requisitos iniciales permitían la certificación bajo estándares de emisiones europeos o estadounidenses.¹⁷ No obstante, la normativa vigente solo define límites basados en los estándares europeos. Para simplificar y reflejar la normativa vigente, la Tabla 1 presenta únicamente los estándares europeos de emisiones. En 2022, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible emitió la Resolución 762, fundamentada en la Ley 1972, una medida de 2019 que exigía que, para el año 2023, todos los vehículos nuevos a gasolina cumplan estándares equivalentes a Euro 4, mientras que todos los vehículos diésel y GNC deben cumplir con los estándares equivalentes a Euro 6/VI.¹⁸ La mayoría de los vehículos que circulan en Colombia son importados, principalmente de México, Argentina, Brasil y Corea del Sur,¹⁹ y las regulaciones nacionales estipulan que solo se permite la importación de vehículos nuevos.²⁰

Además de las normas de emisiones para vehículos nuevos importados, todos los vehículos en Colombia deben realizar una inspección periódica de emisiones.

15 Resolución Conjunta 909 de 1996, Ministerio de Transporte, <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=20678>; Resolución Conjunta 005 de 1996, Ministerio de Transporte, <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=20677>.

16 Todo vehículo debe cumplir con los estándares correspondientes al año de su fabricación y no se encuentra sujeto a las normativas de fases implementadas con posterioridad a lo largo de su vida útil. Al respecto, consulte la Resolución 2604 de 2009 de los Ministerios de Minas y Energía, de la Protección Social, y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/resolucion-2604-de-2009/>; y la Resolución 1111 de 2013 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=111937>.

17 "Regions - Colombia", TransportPolicy.net, consultado el 18 de febrero de 2026, <https://www.transportpolicy.net/region/south-america/colombia/>.

18 Resolución No. 0762 de 2022, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-0762-de-2022/>.

19 Observatorio de Complejidad Económica, "Small Sized Cars in Colombia", Observatorio de Complejidad Económica, 2023, <https://oec.world/en/profile/bilateral-product/small-sized-cars/reporter/col>.

20 Decreto 1676 de 2005, <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=16631>.

Tabla 1. Normativa Euro de emisiones vehiculares en Colombia a partir de 1998

Año	Categoría de vehículo	Tipo de combustible	Norma Euro
1998 (año-modelo)	Vehículo ligero	Gasolina	Euro 1
2010 (año-modelo)			Euro 2
2023			Euro 4
1998 (año-modelo)		Diésel	Euro 1
2010 (año-modelo)			Euro 2
2015			Euro 4
2023			Euro 6
2023		GNC	Euro 6
1998 (año-modelo)	Autobús	Diésel	Pre-Euro
2001 (año-modelo)			Euro I ^a
2010			Euro II ^b / Euro IV ^{c,d}
2015			Euro IV ^d
2023		Euro VI	
2015	Autobús	GNC	Euro IV
2023			Euro VI
1998 (año-modelo)	Vehículo pesado	Diésel	Pre-Euro
2001 (año-modelo)			Euro I ^a
2010 (año-modelo)			Euro II ^b
2015			Euro IV ^d
2023		Euro VI	
2015	Vehículo pesado	GNC	Euro IV
2023			Euro VI
2010	Motocicleta	Gasolina	Euro 2
2023			Euro 3

Nota: El año indicado corresponde al periodo en que la norma pasó a ser obligatoria para la totalidad de los vehículos nuevos, ya fueran nacionales o importados. Ciertos requisitos se aplicaron según el año-modelo del vehículo en lugar del año de fabricación según el calendario.

^a Los límites de emisiones no se ajustan a las normas Euro, pero son las más cercanas a Euro I.

^b Diversos fabricantes ya importaban vehículos con tecnología Euro III debido a la calidad del combustible.

^c El límite de emisión mencionado es aplicable a los autobuses urbanos.

^d Debido a la calidad de los combustibles disponibles, diversos fabricantes ya importaban vehículos con tecnología Euro V antes de que la norma fuera obligatoria.

Los vehículos particulares están sujetos a su primera inspección 5 años después de su registro inicial y, posteriormente, cada 2 años. Los vehículos de servicio público deben efectuar su primera revisión obligatoria 2 años después del registro y, a partir de entonces, anualmente.²¹ Durante esta inspección periódica

obligatoria, los vehículos a gasolina y GNC están sujetos a límites de CO e HC introducidos en 2022, y los vehículos diésel están sujetos a límites de opacidad.²² Adicionalmente, los vehículos diésel nuevos sujetos a la norma Euro VI deben integrar sistemas de diagnóstico a

²¹ Ley 769 de 2002, <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=5557>.

²² Resolución No. 0762 de 2022.

bordo.²³ Las autoridades locales tienen la responsabilidad de monitorear las emisiones directamente desde las fuentes móviles para identificar incumplimientos regulatorios.²⁴

En consonancia con el avance de las normas de emisiones vehiculares colombianas, la calidad de los combustibles en cuanto a su contenido de azufre ha mostrado mejoras significativas. A partir de 2012, todo el combustible diésel utilizado en Colombia debía tener un contenido de azufre de 50 ppm o menos, valor que se redujo a un rango de entre 10 y 15 ppm en 2023 y a 10 ppm en diciembre de 2025.²⁵ El límite del contenido de azufre de la gasolina bajó de 300 ppm a 100 ppm en 2021 y posteriormente a 50 ppm a partir de 2022, con el objetivo de llegar a 10 ppm para finales de 2030.²⁶

Los vehículos impulsados por GNC tienen una amplia presencia en Colombia.²⁷ Se estima que, entre los años 2000 y 2023, cerca de 645.000 vehículos originalmente a gasolina fueron convertidos para operar con GNC.²⁸ La popularidad de esta tecnología radica en su costo operativo, con ahorros reportados del 52% frente a la gasolina.²⁹ Este diferencial de precio ha hecho que el GNC sea especialmente atractivo para el segmento de taxis, el cual representó casi el 98% de las conversiones estimadas en el primer semestre de 2023.³⁰ Además del ahorro en combustible, existen políticas locales y nacionales que incentivan su uso. Mientras que, generalmente, el impuesto vehicular anual oscila entre el 1,7% y el 3,7% del valor del vehículo, se limita al 1% para vehículos dedicados a GNC (certificados bajo estándares

de emisiones para gas natural) y vehículos eléctricos.³¹ Ambos tipos de vehículos reciben un 10% de descuento en el costo anual del Seguro Obligatorio de Accidentes de Tránsito (SOAT).³² La Alcaldía de Bogotá exige a ciertos vehículos propulsados por GNC, así como a todos los vehículos eléctricos e híbridos, de su política de pico y placa, medida que busca combatir la congestión vehicular en la ciudad mediante la restricción de la circulación de diferentes vehículos cada día de la semana según las letras de sus placas.³³

Bogotá opera uno de los sistemas de autobuses de tránsito rápido (BRT, por su sigla en inglés) más grandes del mundo y se encuentra en un proceso de transición hacia buses eléctricos. El sistema BRT de Bogotá, TransMilenio, inició operaciones en el año 2000.³⁴ El Sistema Integrado de Transporte Público (SITP) de Bogotá comprende los buses troncales de TransMilenio que operan en carriles exclusivos, los buses alimentadores que conectan los barrios con los corredores troncales, los buses zonales que brindan cobertura en áreas específicas y el sistema de teleféricos, que funcionan como una red unificada. La Alcaldía de Bogotá estimó que en marzo de 2025, el sistema fue utilizado más de 103 millones de veces, lo que equivale aproximadamente a 15 usos por persona.³⁵ Para septiembre de 2025, operaban en la ciudad 1,486 autobuses eléctricos, con otros 364 previstos para incorporarse en 2026.³⁶ Actualmente, la flota de autobuses funciona con una mezcla de tecnologías: en marzo de 2025, el 14% era eléctrica, el 20% a GNC, el 63% diésel y el 3% híbrida.³⁷

Finalmente, la iniciativa ZUMA busca crear zonas dentro de Bogotá priorizadas para intervenciones

23 Ley 1972 de 2019, <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/30036665>.

24 Resolución 910 de 2008, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30033825>.

25 Ley 1205 de 2008, <https://www.suin-juriscol.gov.co/clp/contenidos.dll/Leyes/1675542>; Ley 1972 de 2019.

26 Resolución 40103 de 2021, Ministerio de Minas y Energía y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/resolucion-40103-de-2021>; Resolución 40444 de 2023, Ministerio de Minas y Energía y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, [https://sidn.ramajudicial.gov.co/SIDN/NORMATIVA/TEXTOS_COMPLETOS/8_RESOLUCIONES/RESOLUCIONES%202023/Resolucion%2040444%20de%202023%20\(Calidad%20gasolina\).pdf](https://sidn.ramajudicial.gov.co/SIDN/NORMATIVA/TEXTOS_COMPLETOS/8_RESOLUCIONES/RESOLUCIONES%202023/Resolucion%2040444%20de%202023%20(Calidad%20gasolina).pdf); EcoPetrol, "Fuel Quality: More than Three Decades of Continuous Improvement", 18 de febrero de 2022, <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/tesg/environmental/clean-air/fuel-quality>.

27 "The Conversion of Gasoline Vehicles to Natural Gas Increased by 63% During 2023", Naturgas, 23 de enero de 2024, <https://naturgas.com.co/en-un-63-aumento-la-conversion-de-vehiculos-de-gasolina-a-gas-natural-durante-el-ano-2023/>.

28 Inspenet, "Colombia Reached More than 10,000 Conversions to CNG in the First Half of 2023", 11 de agosto de 2023, <https://inspenet.com/en/noticias/colombia-more-than-10-thousand-gnv-conversions/>.

29 Naturgas, "The Conversion of Gasoline Vehicles".

30 Inspenet, "Colombia Reached More than 10,000 Conversions".

31 Mónica Espinosa y Camilo Sarmiento, *Status Quo of Energy Efficiency Regulation in Colombia's Transportation Sector: Scoping study* (GIZ GmbH, 2024), 62, https://changing-transport.org/wp-content/uploads/GIZ.-2024.-Vehicle-Efficiency-in-Colombia_EN.pdf.

32 Espinosa y Sarmiento, *Status Quo of Energy Efficiency*.

33 Decreto 546 de 2021, Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C., <https://www.bogotajuridica.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=119621>; Decreto 652 de 2025, Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C., <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=191872>; Espinosa y Sarmiento, *Status Quo of Energy Efficiency*.

34 Michael Kimmelman, "How One City Tried to Solve Gridlock for Us All", *New York Times*, 7 de diciembre de 2023, <https://www.nytimes.com/interactive/2023/12/07/headway/bogota-bus-system-transmilenio.html>.

35 Alcaldía Mayor De Bogotá D.C., *Transmilenio en Cifras*, n.º 94 (2025), <https://www.transmilenio.gov.co/comunicaciones/publicaciones/2025/estadisticas-de-oferta-y-demanda-del-sistema-integrado-de-transporte-publico-sitp-marzo-2025>.

36 Álvaro Clavijo, "TransMilenio se Transforma con 364 Nuevos Buses Eléctricos", Bogotá, 26 de junio de 2025, <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/bogota-contara-con-364-nuevos-buses-electricos-en-transmilenio>; E-Bus Radar, "Electric Buses in Latin America", septiembre de 2025, <https://ebusradar.org/en/#>.

37 Alcaldía Mayor De Bogotá D.C., *Transmilenio en Cifras*.

interdisciplinarias que reduzcan la contaminación atmosférica.³⁸ La ciudad proyecta contar con dos zonas ZUMA plenamente operativas para 2027.³⁹ La primera de ellas, la Zona de Reducción de Emisiones Bosa-Apogeo, se estableció en 2023.⁴⁰ Ubicada al suroeste de la ciudad y con más de 35.000 habitantes en la localidad de Bosa,⁴¹ esta zona fue priorizada debido a sus altos niveles de emisiones vehiculares. Hasta la fecha, las acciones dirigidas a Bosa han incluido la plantación de árboles, la pavimentación de vías y la ampliación de la red de monitoreo de calidad del aire.⁴² Los elementos de la ZUMA Bosa-Apogeo definidos en el Plan de Acción ZUMA 2025 incluyen mejoras en infraestructura para peatones y ciclistas, el despliegue de autobuses de bajas y cero emisiones, estacionamiento preferencial para vehículos cero emisiones, gestión del tráfico o restricciones para vehículos particulares dentro de la ZUMA y un programa piloto de transporte de carga con vehículos cero emisiones.⁴³ Actualmente, el Plan de Acción no detalla qué tipo de vehículos particulares estarían sujetos a restricciones para reducir las emisiones.⁴⁴

DETECCIÓN REMOTA

RECOPIACIÓN DE DATOS

La Iniciativa TRUE llevó a cabo una campaña de detección remota en carretera para medir las emisiones de escape vehiculares en condiciones reales de circulación en Bogotá, Colombia. Las mediciones se realizaron durante

35 días, entre el 5 de septiembre y el 26 de octubre de 2023. La flota muestreada incluyó vehículos particulares, taxis, camiones ligeros, vehículos pesados, autobuses, microbuses y motocicletas.⁴⁵ En total, se recopilaron 272.025 mediciones en nueve puntos distintos. Estos puntos fueron seleccionados por su potencial para generar lecturas de medición válidas y para capturar una amplia gama de vehículos. Asimismo, se buscaron ubicaciones que representaran la actividad vehicular típica de la ciudad, con el objetivo de capturar las emisiones de la flota de autobuses y de camiones de carga. Se seleccionó un punto específico (BOG003) para medir vehículos pesados en una plaza de peaje, mientras que otros tres puntos (TRANSMI1, TRANSMI2 y TRANSMI3) se ubicaron en los patios de TransMilenio para medir autobuses. La ubicación de estos nueve puntos de medición se detalla en la Figura 1.

En alianza con Indra Colombia, la empresa Opus Inspection realizó las pruebas de emisiones vehiculares. Los datos se recopilaron mediante el instrumento portátil Opus RSD5700 (Figura 2); al paso de los vehículos, el equipo registró las emisiones en el tubo de escape de dióxido de carbono (CO₂), NO_x, óxido de nitrógeno (NO), NO₂, HC y CO, además del humo UV (como indicador de MP).⁴⁶ El instrumento también registró la velocidad y la aceleración de cada vehículo para estimar la potencia del motor. Adicionalmente, se registraron los números de placa para facilitar la obtención de las características técnicas de cada unidad.

RESUMEN DE LA MUESTRA

De las 272.025 mediciones recolectadas, 146.698 (54%) presentaron valores válidos de velocidad, aceleración y potencia específica vehicular (VSP) positiva. Se utilizó la información de la placa para vincular los vehículos medidos con los datos de características técnicas provenientes de tres fuentes: la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), el Departamento de Medio Ambiente de Bogotá; el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT), el registro nacional de vehículos; y

38 La iniciativa ZUMA se estableció en 2023 y contempla la creación de una zona de reducción de emisiones durante el primer año de su declaración. A esta le sigue una zona de bajas emisiones con una duración de seis años y, finalmente, una zona de emisiones ultra bajas a partir del séptimo año. Los requisitos técnicos para cada fase están definidos en el Plan de Acción de ZUMA.

39 Alcaldía Mayor De Bogotá D.C., "Plan Distrital de Desarrollo 2024-2027", Movilidad Bogotá, 16 de julio de 2024, https://www.movilidadbogota.gov.co/web/plan_distrital_de_desarrollo_2024_2027.

40 Secretaría de Ambiente SDA, *Plan de Acción de las Zonas Urbanas por un Mejor Aire - ZUMA* (2024), <https://www.ambientebogota.gov.co/documents/10184/7697369/Plan+de+Accio%C2%B4n+ZUMA+Bosa+Apogeo+06052025.pdf/36cbb82f-16ba-4eb0-b1db-2038e96eedaf>.

41 "ZUMA de Bosa-Apogeo", C40 Cities, consultado el 21 de noviembre de 2025, <https://www.c40reinventingcities.org/en/students/sites-in-competition/zuma-de-bosa-apogeo-2106.html>; Alcaldía Mayor De Bogotá D.C., "Fichas de Acciones: ZUMA Bosa-Apogeo", consultado el 18 de febrero de 2026, <https://www.ambientebogota.gov.co/documents/10184/7697369/Anexo+1.+Fichas+acciones+ZUMA+Bosa+Apogeo++06052025.pdf/083c9019-332c-4ca2-a809-38b2c83af9e6>.

42 Álvaro Clavijo, "Bogotá Fortalece la Primera Zona Urbana por un Mejor Aire en Bosa para Beneficiar a Más de 30.000 Personas", 21 de marzo de 2026, <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/bogota-fortalece-la-primera-zona-urbana-por-un-mejor-aire-en-bosa>.

43 Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., "Fichas de Acciones"; Decreto 670 de 2025, Alcaldía Mayor de Bogotá, D.C., <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal1.jsp?i=191905#1526>.

44 Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., "Fichas de Acciones".

45 Se midieron cuatriciclos, tractocamiones y triciclos, no obstante, debido al reducido tamaño de la muestra (menos del 1% de la flota medida), estos no se incluyeron en el presente análisis.

46 El humo UV se mide considerando la relación entre la opacidad y la cantidad de combustible quemado. La medición del humo UV depende de diversas características físicas y químicas del material particulado en el escape, y por lo tanto, se utiliza principalmente para análisis comparativos. Véase Michelle Meyer et al., *Particulate Matter Emissions from U.S. Gasoline Light-Duty Vehicles and Trucks* (TRUE Initiative, 2023), <https://trueinitiative.org/research/particulate-matter-emissions-from-u-s-gasoline-light-duty-vehicles-and-trucks/>. La medición de MP se basa en lecturas de opacidad con una tolerancia absoluta de $\pm 1\%$ en todo el rango de referencia actualmente verificable.

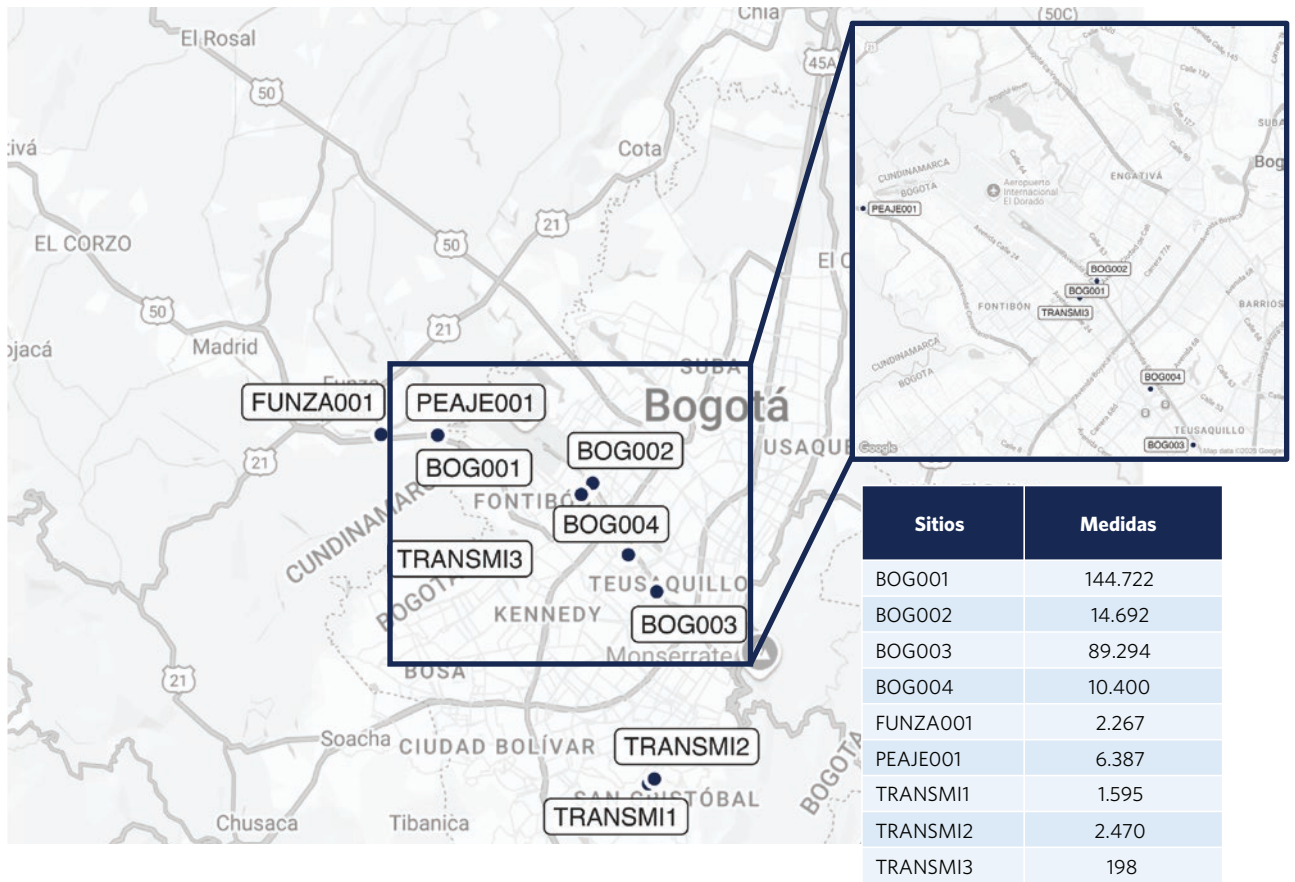


Figura 1. Mapa de puntos de medición para la campaña de detección remota



Figura 2. Recopilación de datos de detección remota mediante un instrumento portátil Opus RSD5700

Tabla 2. Resumen de las mediciones recopiladas en Bogotá y su validez para el análisis

Valores válidos de velocidad, aceleración y VSP positiva	Lectura de placa coincidente con información del vehículo ^a	Conteo	Proporción del total de mediciones
Sí	Sí	98.235	36%
	No	48.463	18%
No	Sí	65.190	24%
	No	60.137	22%

^a Indica que la placa pudo ser vinculada y que al menos se disponía de la clase del vehículo; la completitud de los datos sobre las especificaciones del vehículo varió.

clasificaciones por visión artificial mediante el software de Opus.⁴⁷ En total, se vincularon 163.425 mediciones (60%) con datos de características de los vehículos, de las cuales 98.235 (36%) tenían valores válidos de velocidad, aceleración y VSP (Tabla 2). Para maximizar el aprovechamiento de la información, se aplicaron diferentes criterios de inclusión según el tipo de análisis. Los análisis que examinaron únicamente las características de la flota utilizaron todas las mediciones vinculadas con la información técnica (60%), mientras que los análisis de emisiones de escape de los vehículos incluyeron solo aquellas con información vehicular relacionada y valores válidos de velocidad, aceleración y VSP (36%).

Se consideró que los datos de la SDA constituían una subserie más fiable que los del RUNT y, por lo tanto, se les dio prioridad siempre que ambas fuentes estaban disponibles. Los datos de visión artificial —que incluyeron la categoría, marca, modelo y color del vehículo— se utilizaron únicamente en los casos en que no se disponía de información de otras fuentes. Debido a ciertos vacíos en los datos vehiculares, no fue posible contar con el conjunto completo de especificaciones para cada vehículo; si bien estas limitaciones restringieron el nivel de detalle, los datos resultaron útiles para caracterizar las emisiones en condiciones reales de circulación de la flota de Bogotá.

La información sobre la certificación de la norma de emisiones de los vehículos no estaba disponible en las bases de datos de la SDA o del RUNT. Para comparar las emisiones reales medidas con los límites de certificación,

se agruparon las mediciones por año-modelo del vehículo, alineados con las normas de emisiones descritos en la Tabla 1. Por simplicidad, el análisis se centra en la comparación con las normas europeas y sus límites asociados, aunque los vehículos también podrían estar certificados bajo los límites de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

En consonancia con análisis anteriores de TRUE, se expresan los valores de emisiones específicas por combustible (g/kg de combustible) o, cuando es posible, se convierten a valores por distancia o por energía —unidades consistentes con los límites regulatorios europeos— mediante la metodología desarrollada en publicaciones anteriores de TRUE.⁴⁸ Se utilizó el Modelo de Movilidad de la Agencia Internacional de Energía para estimar el consumo de combustible en Colombia y calcular la conversión de emisiones por kilómetro recorrido (g/km) para todos los grupos de vehículos medidos, a excepción de los autobuses a GNC, para los cuales no se disponía de estimaciones de consumo.⁴⁹ Asimismo, las emisiones de los vehículos pesados

47 Opus empleó el software de visión artificial (CV, por su sigla en inglés) de Plate Recognizer para estimar las especificaciones vehiculares. El software proporcionó los siguientes atributos: categoría, marca, modelo y color. Estas especificaciones obtenidas mediante CV se utilizaron como datos complementarios para las mediciones que carecían de un identificador vehicular o de información técnica proveniente de otras fuentes. Consulte Plate Recognizer, “Accurate, Fast, Developer-Friendly ALPR”, <https://platerecognizer.com/>.

48 Yoann Bernard et al., *Determination of Real-World Emissions from Passenger Vehicles Using Remote Sensing Data* (TRUE Initiative, 2018), <https://trueinitiative.org/research/determination-of-real-world-emissions-from-passenger-vehicles-using-remote-sensing-data/>.

49 Los datos de consumo de combustible utilizados para calcular las emisiones por kilómetro recorrido se basan en el promedio de la flota nacional. El consumo de combustible puede variar en función de la altitud y de otras condiciones de operación. Este análisis no incluye un ajuste por altitud, el cual se esperaría que incrementara las estimaciones de emisiones. “Transport”, International Energy Agency, actualizado el 11 de julio de 2023, <https://www.iea.org/energy-system/transport>. No se disponía de datos sobre el consumo de combustible de los autobuses propulsados por GNC, por lo que no se calcularon las emisiones específicas de la distancia para esta clase de vehículo.

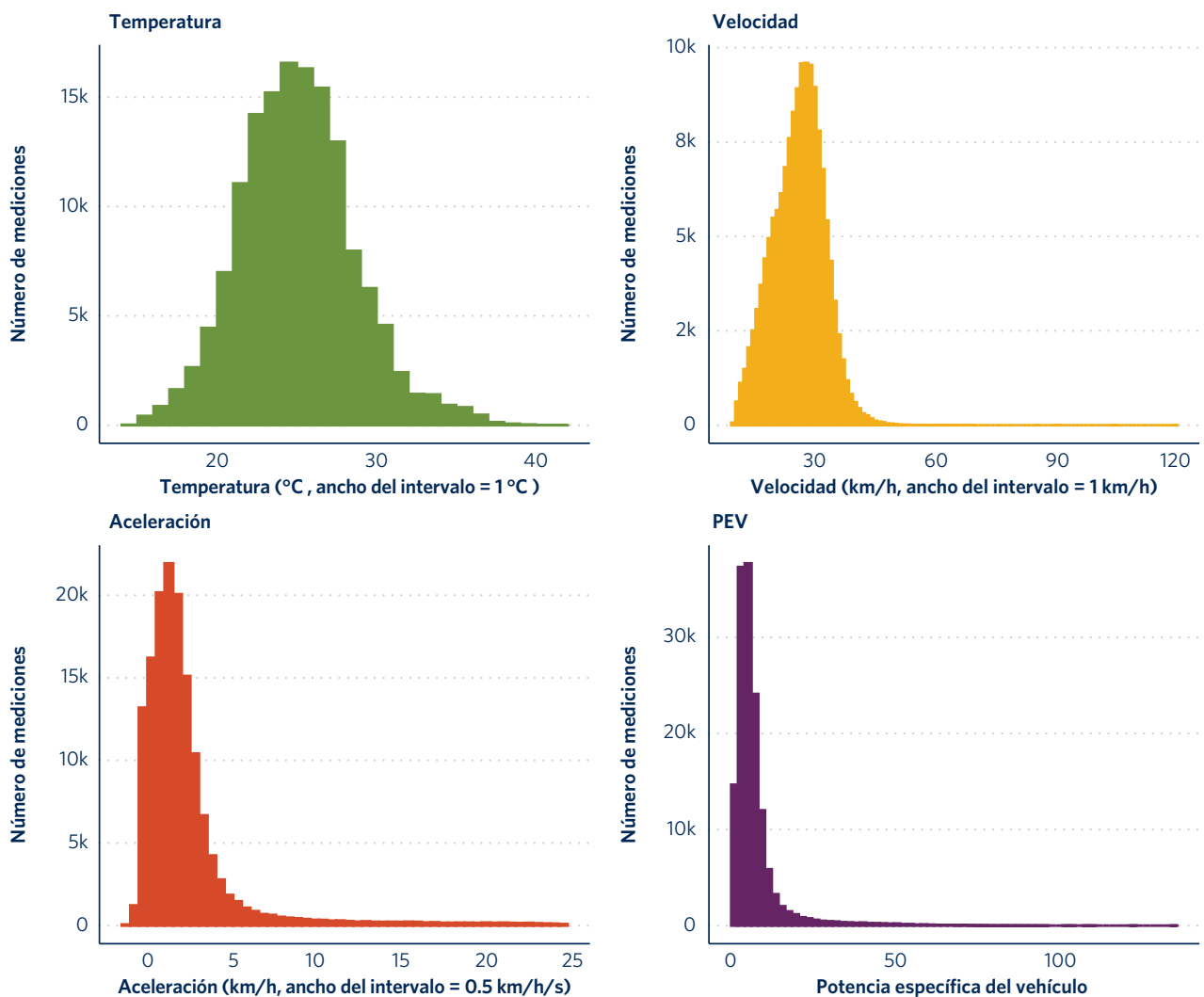


Figura 3. Resumen de las condiciones de prueba

se convirtieron a emisiones específicas por energía, expresadas por kilovatio-hora (kWh).⁵⁰

La Figura 3 resume las condiciones de las pruebas, incluyendo velocidad, aceleración, VSP y temperatura. Los valores medianos fueron de 25 km/h para la velocidad, 1,3 km/h/s para la aceleración, 4 kW/t para la VSP y 24 °C para la temperatura ambiente. La VSP mediana de esta muestra fue ligeramente inferior a los valores obtenidos en la campaña de TRUE en Ciudad

de México (5,9 kW/t) y en la base de datos de TRUE en Europa (8,2 kW/t).

CARACTERÍSTICAS DE LA FLOTA

Tal como se observa en la Figura 4, los automóviles particulares a gasolina representaron el grupo vehículo-combustible medido con mayor frecuencia en este estudio, representando el 45% de la muestra, seguidos por los taxis duales gasolina-GNC con un 25% y los camiones ligeros a gasolina con un 18%.⁵¹ Se considera que los vehículos monitoreados son representativos

⁵⁰ Debido a que los límites reglamentarios de emisión para vehículos pesados se establecen en función de la energía (g/kWh), las emisiones específicas de combustible se convirtieron a emisiones específicas de energía empleando el consumo específico de combustible al freno del vehículo en g/kWh, siguiendo la metodología descrita en Kazemi Bakhshmand et al., *Remote Sensing of Heavy-Duty Vehicle Emissions in Europe* (Consejo Internacional de Transporte Limpio, 2022), <https://theicct.org/publication/remote-sensing-of-heavy-duty-vehicle-emissions-in-europe/>.

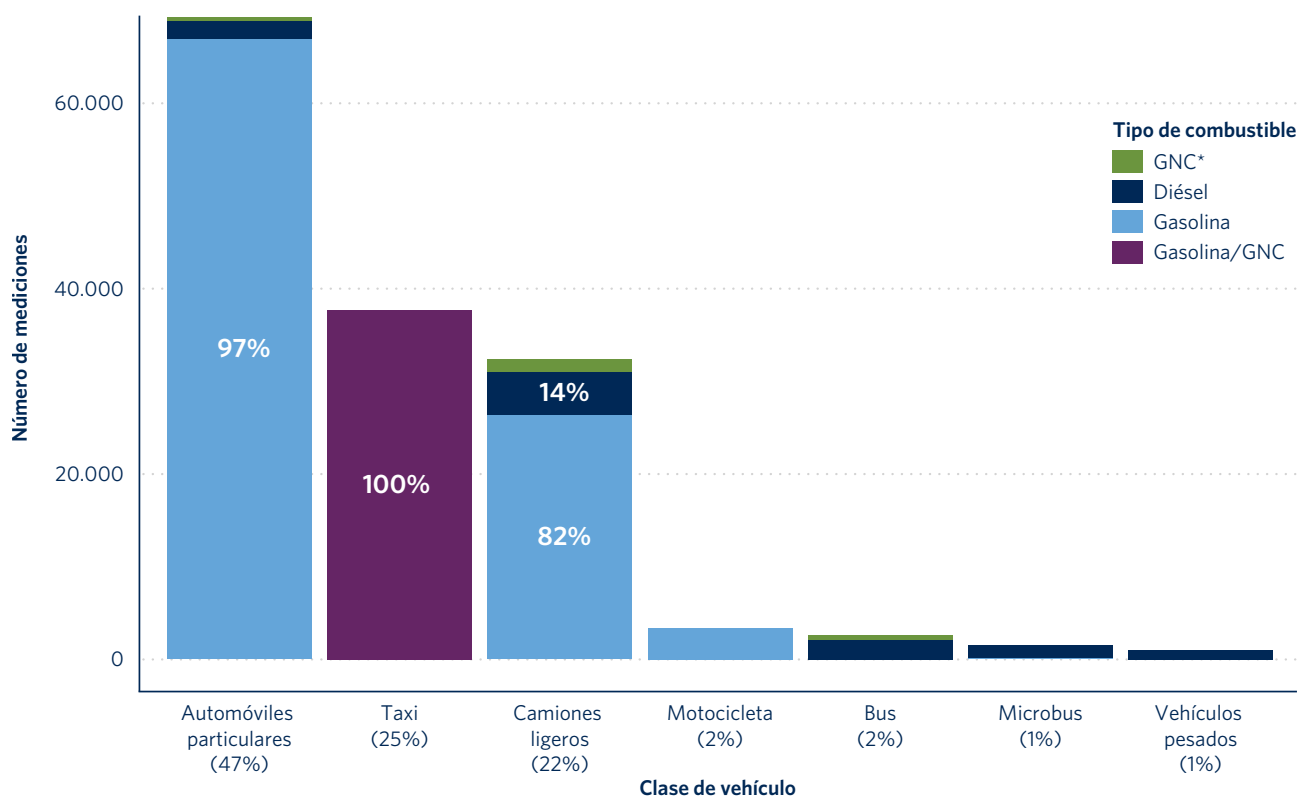
⁵¹ Debido a la extensa conversión, tanto formal como informal, de los taxis de gasolina a GNC en Bogotá, todos los taxis se categorizaron como vehículos de propulsión dual (gasolina y GNC), independientemente del tipo de combustible registrado en las especificaciones técnicas del vehículo.

de la composición del parque automotor de Bogotá, con excepción de los autobuses y las motocicletas, que estuvieron subrepresentados en las mediciones. Se estima que las motocicletas constituyen el 62% de la flota vehicular de la ciudad, pero su medición mediante detección remota suele presentar dificultades técnicas.⁵² Por su parte, la baja captura de autobuses se debe a que la flota de BRT opera en carriles exclusivos, lo que limitó su monitoreo a puntos de medición específicos. Este estudio se realizó inicialmente en inglés; la Tabla A1 del Apéndice presenta una comparación lado a lado de las categorizaciones de vehículos en ambos idiomas.

A partir de los datos disponibles, no fue posible distinguir entre los vehículos fabricados originalmente para funcionar con GNC y aquellos convertidos. Dada la popularidad de estas conversiones a GNC entre

los taxistas y el menor costo de este combustible en Colombia, es probable que gran parte de la flota de taxis haya sido adaptada para funcionar con GNC.

En promedio, los automóviles de pasajeros de gasolina tenían 10 años de antigüedad al momento de la medición (Tabla 3).⁵³ Los taxis a gasolina/GNC, que pertenecen todos a la categoría de automóviles de pasajeros, registraron una edad media de 9 años. La mitad de la flota de taxis monitoreada tenía entre 5 y 13 años de antigüedad, siendo 30 años la edad máxima registrada para este segmento. El grupo más antiguo, en promedio, fue el de automóviles de pasajeros bicomcombustible (GNC/gasolina), con 13 años.⁵⁴ En contraste, los autobuses a GNC conformaron el grupo más joven, con una edad promedio de 2 años, es decir, 5 años menos que la edad promedio de los autobuses diésel. Estos hallazgos



Nota: La proporción por tipo de combustible dentro de cada clase vehicular se representa en las barras, mientras que la proporción general de la clase figura entre paréntesis.

* Los automóviles de pasajeros a GNC probablemente sean, en su mayoría, vehículos bicomcombustible (GNC/gasolina) convertidos para operar con gas natural vehicular.

Figura 4. Número de mediciones por clase de vehículo y tipo de combustible

52 Julián Forero, "Los Motociclistas Somos una Realidad", Concejo de Bogotá, 5 de marzo de 2025, <https://concejodebogota.gov.co/los-motociclistas-somos-una-realidad/cbogota/2025-03-05/150819.php>.

53 La edad del vehículo se calculó como la diferencia entre el año de fabricación del vehículo y el año de medición.

54 Es probable que los vehículos de pasajeros clasificados como GNC hayan sido convertidos para operar con gas natural vehicular, aunque esto no puede confirmarse a partir de la base de datos de vehículos. Los vehículos convertidos suelen ser bicomcombustible (GNC y gasolina). Se asume que estos vehículos utilizan principalmente GNC debido al menor costo de combustible.

Tabla 3. Edad promedio por clase de vehículo y tipo de combustible

Clase de vehículo	Tipo de combustible	Edad promedio
Automóvil de pasajeros	Gasolina	10
	Diésel	8
	Bicombustible GNC/gasolina	13
Taxi	Gasolina/GNC	9
Camión ligero	Gasolina	7
	Diésel	9
	GNC	12
Motocicleta	Gasolina	9
Autobús	Diésel	7
	GNC	2
Microbús	Diésel	11
Vehículo pesado	Diésel	12

coinciden con el anuncio de TransMilenio, de que nuevos autobuses a GNC han sido incorporados a la flota desde 2019.⁵⁵

La información sobre la región de registro estuvo disponible para el 46% de los vehículos medidos (124.860). Se identificaron 30 ubicaciones diferentes de registro de los vehículos analizados, siendo las tres regiones más comunes Bogotá, D.C. (77%), Cundinamarca (14%) y Antioquia (2%). Aunque la mayoría de los automóviles particulares, taxis, autobuses y camionetas ligeras estaban registrados en Bogotá D.C., el 63% de los vehículos pesados y el 78% de los microbuses estaban registrados en Cundinamarca (Figura A1 del Apéndice).

55 Ana María Cuevas, "Con 320 Buses Zonales, TransMilenio Sigue Renovándose para Reverdecer a Bogotá", Bogotá, 20 de junio de 2020, <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/buses-nuevos-de-transmilenio-para-componente-zonal>; Jenny Suache, "Empiezan a Rodar los Primeros 140 Buses de TransMilenio a Gas Natural en Bogotá", Bogotá, 1 de julio de 2019, <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/transmilenio/llegaron-los-nuevos-buses-de-gas-natural-vehicular-transmilenio>.

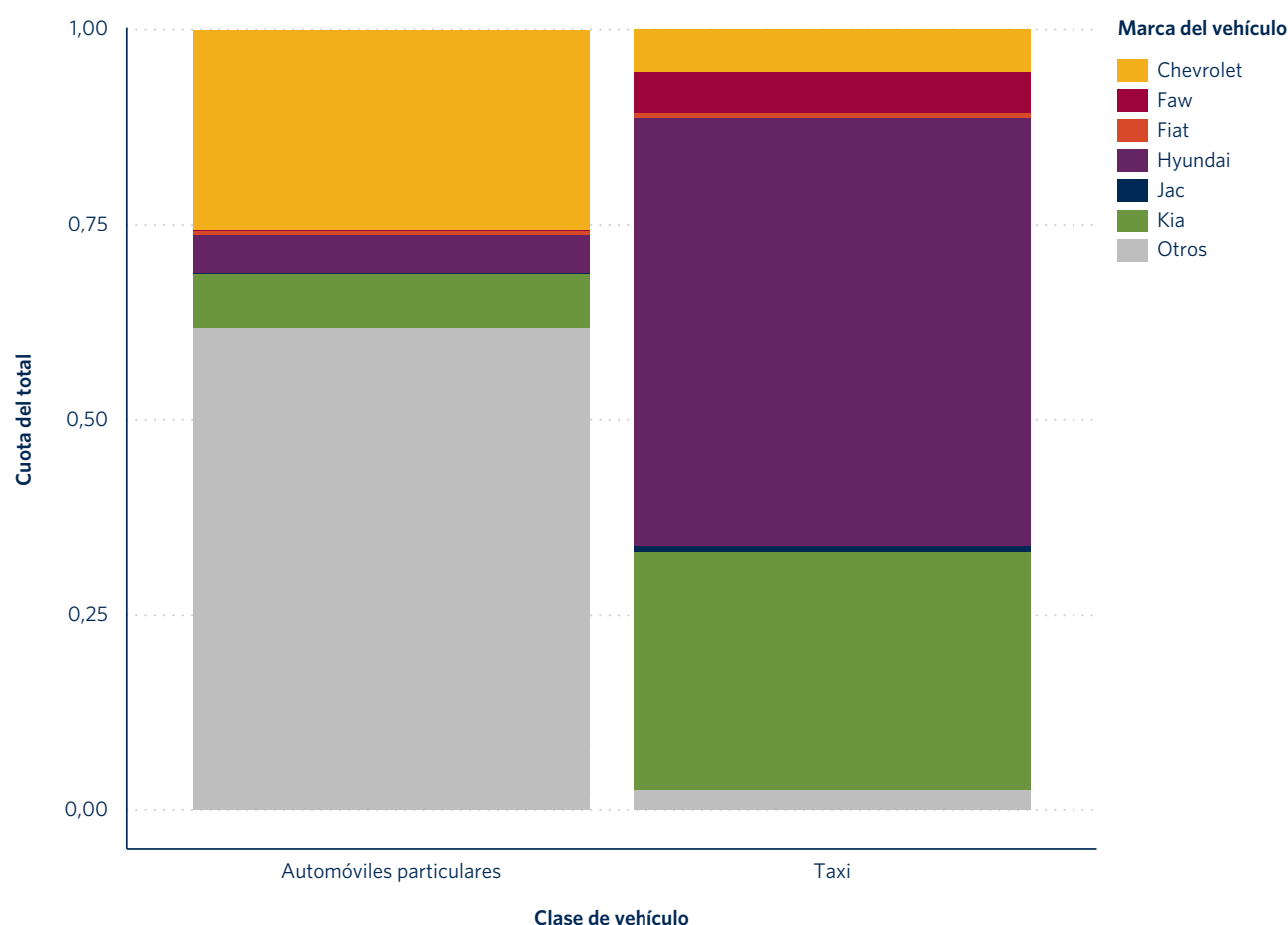


Figura 5. Proporción de la marca de los vehículos: taxis versus automóviles particulares en Bogotá

En este estudio, los taxis se identificaron mediante las características vehiculares que indicaban automóviles de pasajeros de color amarillo destinados al servicio público. Debido a su desempeño diferenciado en materia de emisiones, en este informe se analizan los taxis por separado del resto de automóviles de pasajeros. Como se observa en la Figura 5, la muestra de taxis presentó una composición de marca única en comparación con los automóviles particulares. Las principales marcas de los taxis en Bogotá son Hyundai (55%) y Kia (29%), fabricantes que tienen una participación significativamente menor en la flota de automóviles particulares (5% y 6%, respectivamente).

ANÁLISIS DE EMISIONES VEHICULARES

En esta sección se presentan las emisiones promedio de NO_x , MP, HC y CO de los vehículos que integran el conjunto de datos de Bogotá. En primer lugar, se ofrece una visión general de las emisiones promedio específicas por distancia para todos los grupos de vehículo-combustibles. Posteriormente, se detallan las tendencias de emisión de las dos categorías más comunes en este estudio, automóviles particulares y taxis, seguidas por los vehículos diésel. El número mínimo de mediciones considerado para el análisis de subgrupos fue, por lo general, de 100; la única excepción fueron las tendencias por año-modelo y grupo de años, donde el umbral mínimo se fijó en 30 mediciones.

Se presentan las tendencias detalladas de las emisiones por grupos de año-modelo, las cuales reflejan la cronología de adopción de las normas europeas de emisión en Colombia para los diferentes segmentos (véase la Tabla 1). Las gráficas incluyen los límites de emisión de las normas europeas aplicables a dichos grupos. Estos límites se proporcionan como referencia para contextualizar los resultados, no obstante, es posible que algunas unidades monitoreadas hayan sido certificadas bajo las normas de Estados Unidos en lugar de las europeas. Los datos sobre el peso vehicular eran escasos en las bases de características vehiculares; cuando los límites de emisión varían según el peso bruto vehicular, utilizamos los límites europeos correspondientes a la subcategoría de vehículos más pesados.

EMISIONES POR CLASE DE VEHÍCULO

Como se ilustra en la Figura 6, los autobuses diésel registraron las más altas emisiones promedio de NO_x por distancia entre todas las clases vehiculares medidas,

mientras que los vehículos pesados diésel presentaron los más elevados niveles promedio de MP, HC y CO.⁵⁶

Los automóviles de pasajeros bicomcombustible (GNC/gasolina) mostraron emisiones promedio más altas en todos los contaminantes en comparación con los vehículos a gasolina: 18% más en MP, 19% más en HC, 61% más en CO y 95% más en NO_x . Se observó una tendencia similar en los camiones ligeros a GNC frente a los de gasolina. La mayor edad promedio de los vehículos a GNC, tanto automóviles como camiones ligeros, en comparación con los de gasolina podría influir en estas emisiones promedio más elevadas (Tabla 3).

Los taxis a gasolina y GNC presentaron emisiones de HC particularmente altas, duplicando las registradas por los automóviles particulares, tanto a gasolina como a GNC. En Bogotá, los taxis a gasolina y GNC suelen ser vehículos de uso intensivo que acumulan kilometraje con rapidez, lo cual probablemente acelera el deterioro de los sistemas de control de emisiones y deriva en niveles de contaminación más altos.⁵⁷ Los resultados de las emisiones promedio específicas por combustible se encuentran detallados en la Figura A2 del Apéndice.

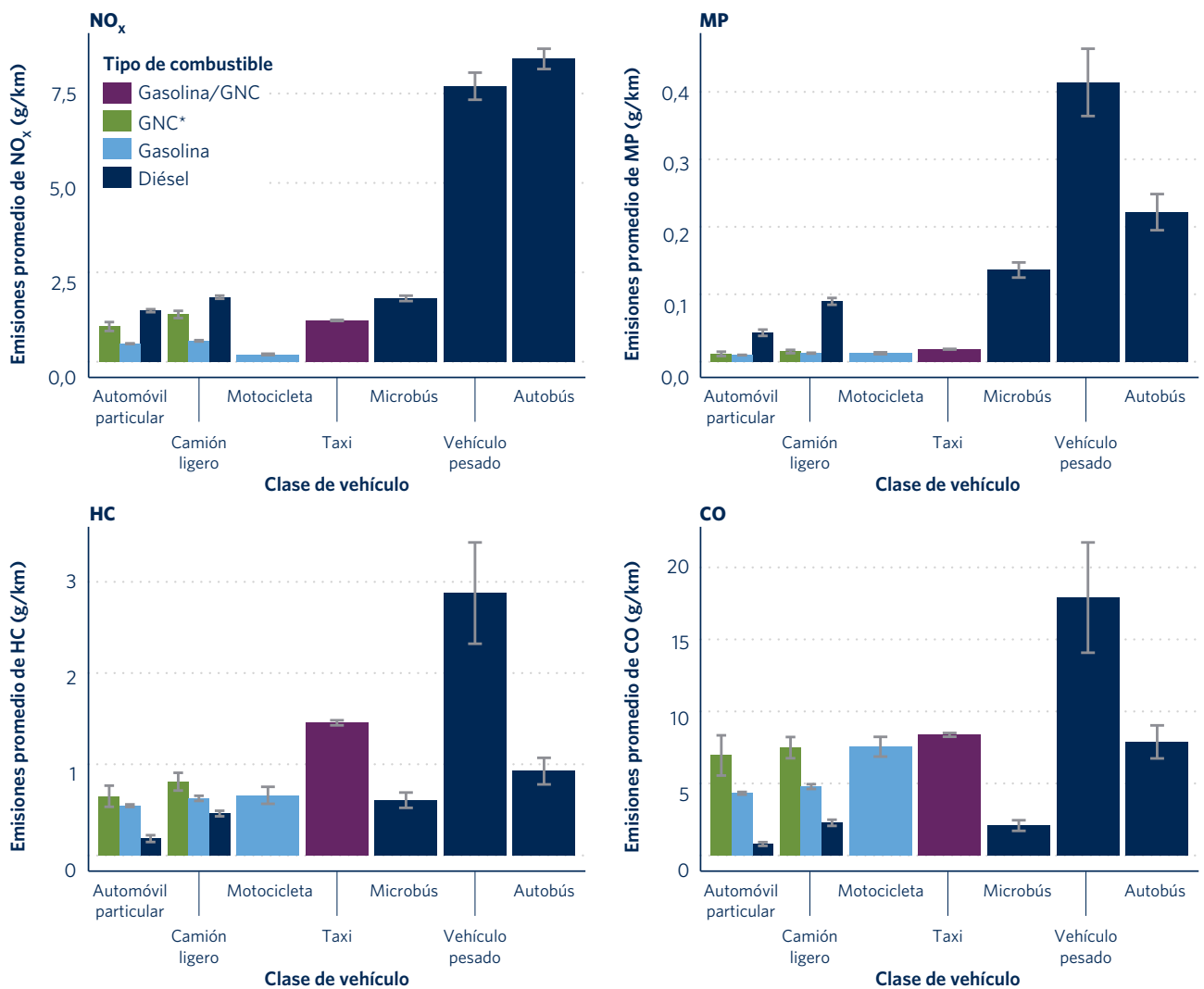
TENDENCIAS DE EMISIONES EN AUTOMÓVILES DE PASAJEROS

Los automóviles de pasajeros de los años-modelo más recientes mostraron reducciones significativas en las emisiones reales de todos los contaminantes, en línea con la implementación de normas de emisión más estrictas en Colombia (Figura 7). Los vehículos a gasolina fabricadas a partir de 2023, durante el periodo de la norma Euro 4, registraron emisiones promedio entre un 88% y un 96% menores en todos los contaminantes en comparación con los vehículos fabricados antes de 1998. Las emisiones promedio más altas se detectaron en los automóviles de pasajeros a gasolina anteriores a 1998, correspondientes a la etapa previa a la introducción de las normas de emisiones vehiculares en Colombia.

La Figura 7 evidencia que los automóviles particulares bicomcombustible (GNC/gasolina) registraron emisiones de NO_x especialmente elevadas en comparación con sus homólogos de gasolina del mismo año-modelo. En

56 Los autobuses a GNC no están incluidos en esta cifra debido a la falta de datos de economía de combustible. Los resultados específicos de cada combustible se muestran en la Figura A2 del Apéndice.

57 Yohén Cuéllar Álvarez, "Development of a New Integrated Assessment Methodology to Design and Select the Best Emission Reduction Strategies for Urban Passenger Transport" (PhD diss., Universidad Nacional De Colombia, 2023), https://www.researchgate.net/publication/370865140_Development_of_a_new_integrated_assessment_methodology_to_design_and_select_the_best_emission_reduction_strategies_for_urban_passenger_transport.



Nota: Las barras de error representan un intervalo de confianza del 95%.

* Los automóviles de pasajeros a GNC probablemente sean, en su mayoría, vehículos bicomcombustible (GNC/gasolina) convertidos para operar con gas natural vehicular.

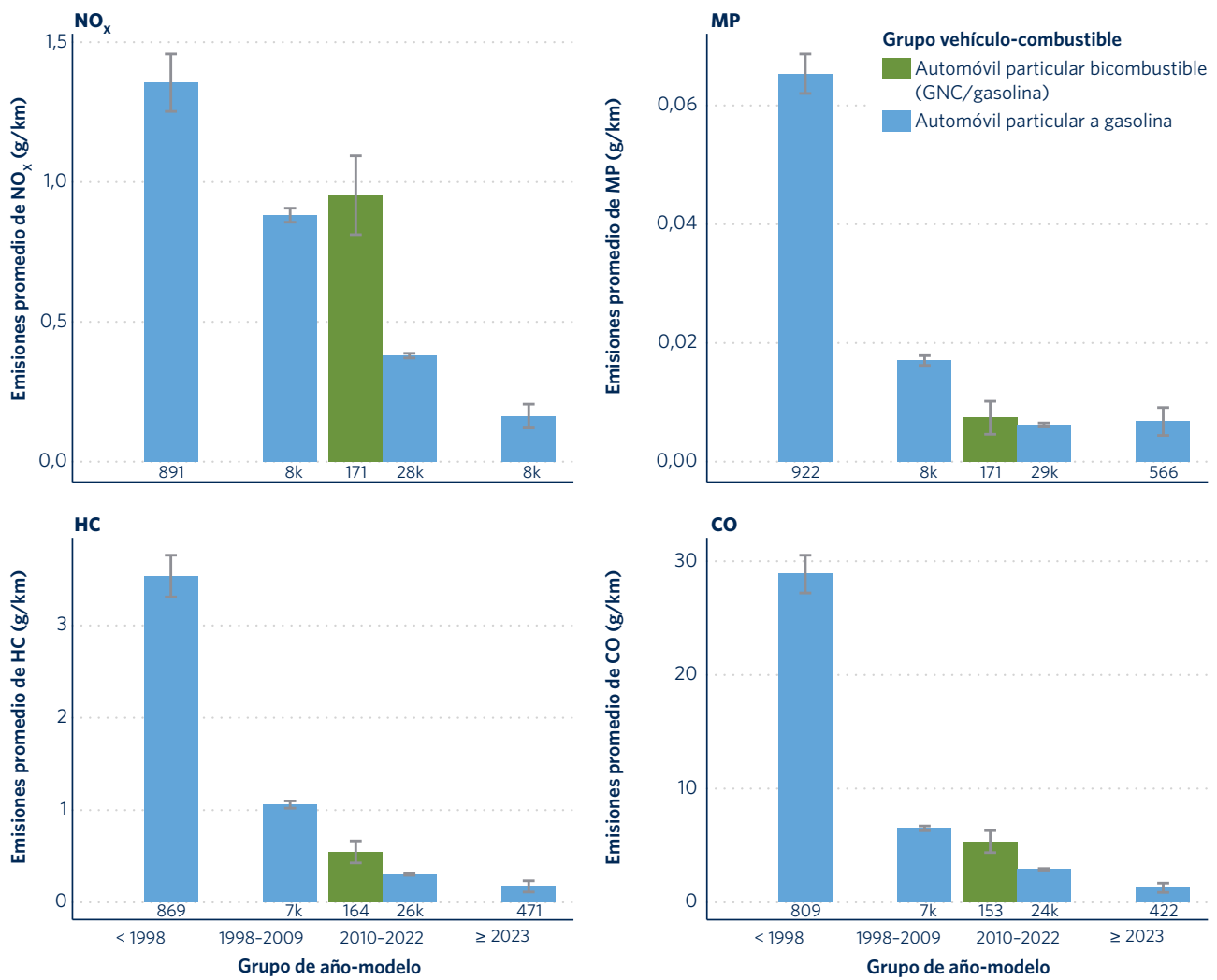
Figura 6. Emisiones promedio de NO_x, MP, HC y CO específicas para la distancia por clase de vehículo y combustible

promedio, los vehículos bicomcombustible (GNC/gasolina) emitieron 2,5 veces más NO_x que los de gasolina. De manera similar, los vehículos a GNC mostraron entre un 19% y un 84% más emisiones de HC, CO y MP en comparación con los vehículos a gasolina. Esta tendencia se repite en otros vehículos ligeros: los camiones ligeros a GNC mostraron emisiones promedio más altas en todos los contaminantes, especialmente en NO_x, con valores 2,3 veces superiores a los de gasolina para los años-modelo 2010 a 2022 (Figura A3). En este estudio no fue posible distinguir entre vehículos fabricados originalmente para GNC y aquellos convertidos, y las mayores emisiones observadas en vehículos a GNC podrían atribuirse a los vehículos convertidos en lugar de a vehículos diseñados originalmente para este

combustible.⁵⁸ Debido al reducido tamaño de la muestra de automóviles y camiones ligeros a GNC, no fue posible evaluar las tendencias de emisiones frente a la adopción progresiva de las normas.

La Figura 8 muestra que, a medida que la flota de automóviles a gasolina de Bogotá transita hacia tecnologías más nuevas y limpias, los vehículos antiguos aportan una carga contaminante cada vez más grande, a pesar de representar una pequeña parte de la flota. Asumiendo que la muestra es representativa de la actividad de los automóviles de pasajeros a gasolina en

58 M.J. Bradley & Associates, *Natural Gas as a Transportation Fuel* (International Council on Clean Transportation, 2005), <https://theicct.org/publication/natural-gas-as-a-transportation-fuel/>.



Nota: Las barras de error representan un intervalo de confianza del 95%. Los números debajo de las barras indican el número de mediciones.

Figura 7. Emisiones promedio específicas por distancia para automóviles de pasajeros (gasolina y GNC) a lo largo del tiempo

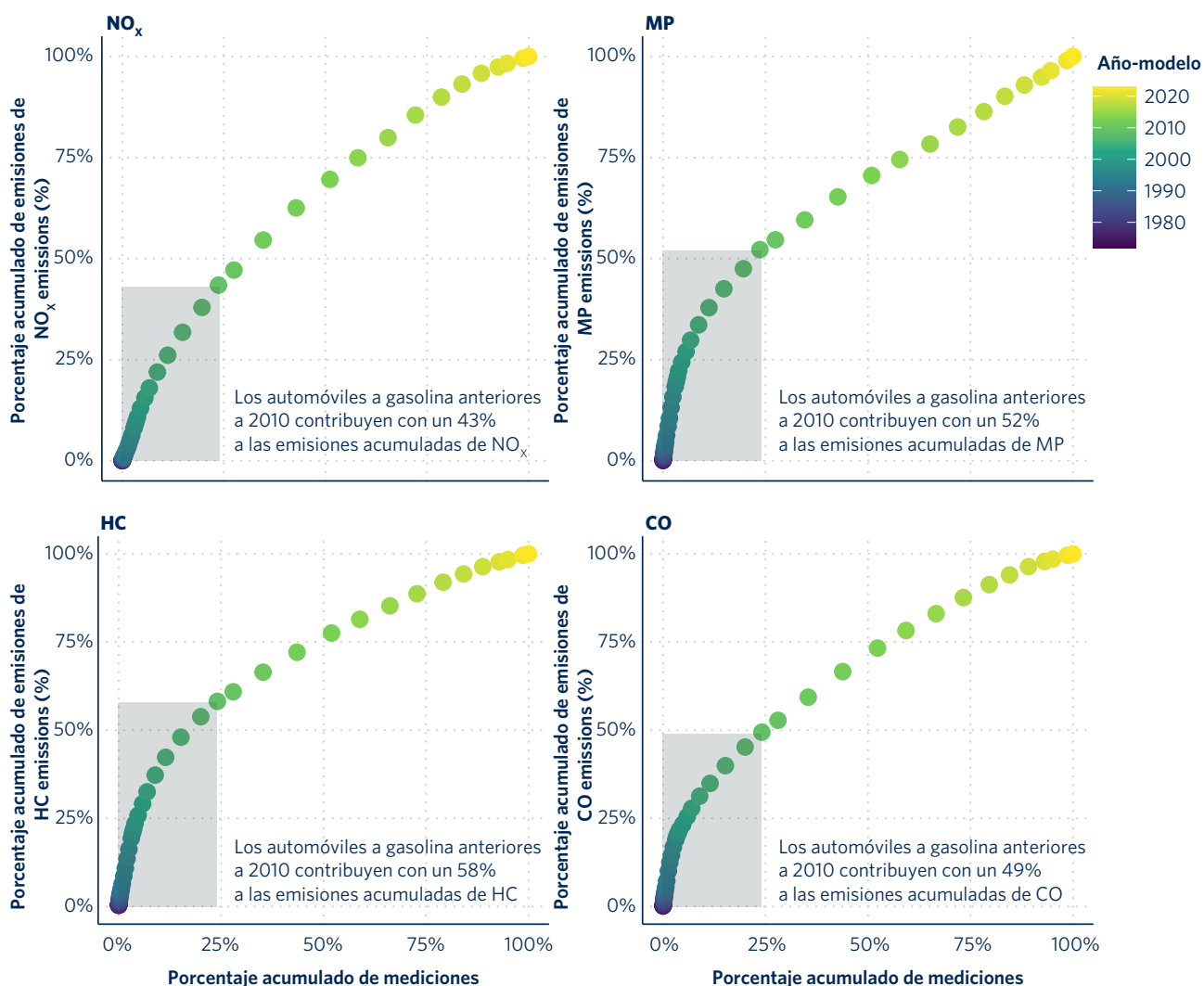


Figura 8. Porcentaje acumulado de emisiones por porcentaje acumulado de mediciones de automóviles de pasajeros a gasolina por año-modelo

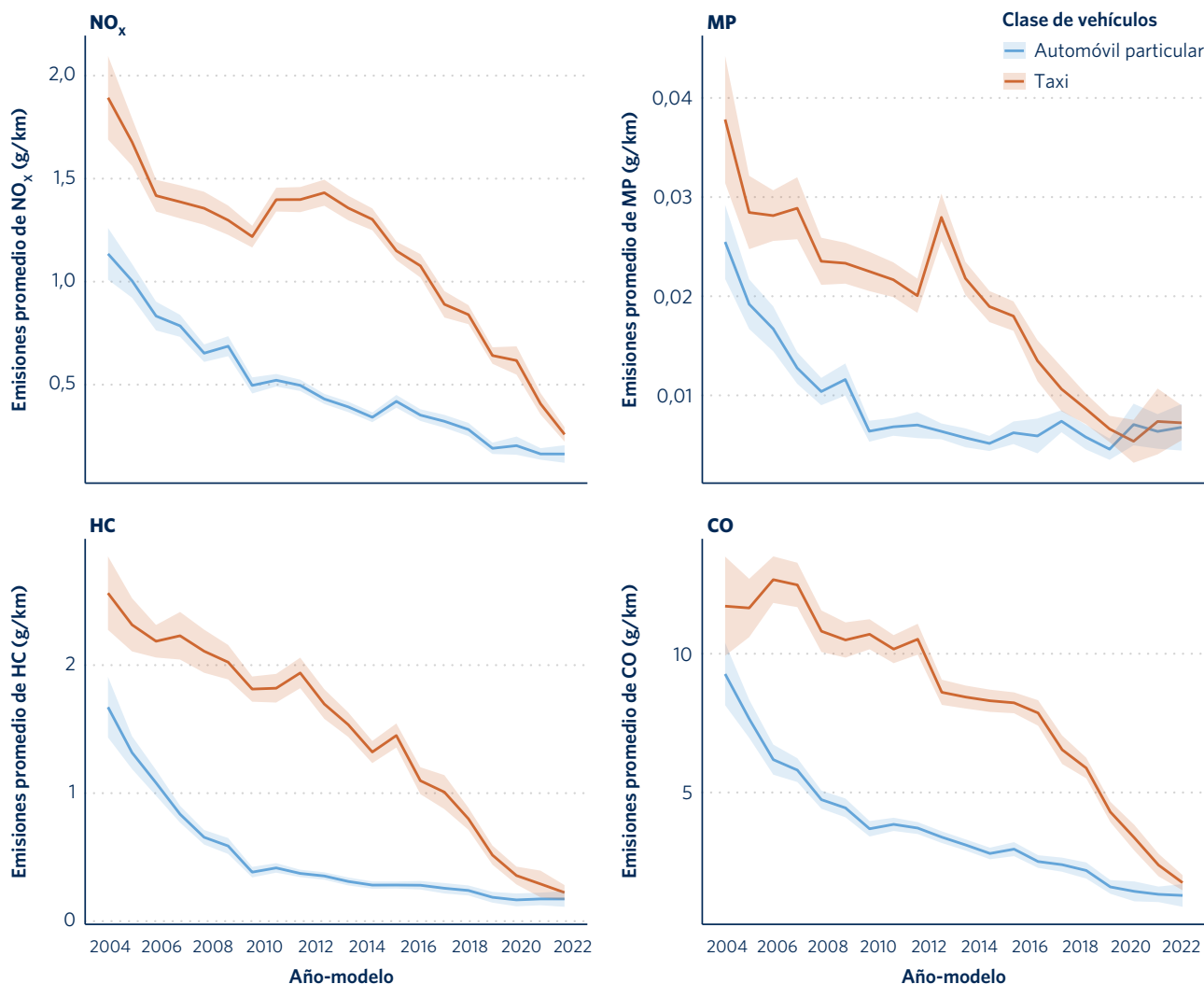
Bogotá, aquellos fabricados antes de 1998 representan solo el 2,5% de esa clase de vehículos, pero contribuyen con entre el 6% y el 17% de las emisiones acumuladas específicas por distancia de NO_x, MP, HC y CO. Asimismo, los vehículos fabricados antes de 2010 (previos a la norma Euro 2 en Colombia) representan el 24% de la flota medida de automóviles de pasajeros a gasolina, pero son responsables del 43%–58% de las emisiones acumuladas, como se indica en los recuadros grises de la Figura 8. Estos hallazgos subrayan la importancia de enfocar las políticas en la sustitución o la restricción de circulación de la porción más antigua y contaminante de la flota de automóviles a gasolina en Bogotá.

TENDENCIAS DE EMISIONES EN TAXIS

Los taxis en Bogotá mostraron emisiones reales significativamente elevadas en comparación con los

automóviles particulares. Entre los años-modelo 2004 a 2023, los taxis a gasolina y GNC registraron emisiones promedio de NO_x hasta 3,8 veces mayores, emisiones de MP hasta 4,7 veces mayores, emisiones de HC hasta 5,2 veces mayores y emisiones de CO hasta 3,1 veces mayores que los automóviles particulares del mismo año-modelo (Figura 9).

Las mayores emisiones de los taxis pueden atribuirse tanto al combustible utilizado como al deterioro acelerado de la flota. En promedio, los vehículos a GNC en Bogotá mostraron emisiones superiores a los de gasolina. Como se describió anteriormente, es altamente probable que la mayoría de los taxis en la ciudad operen con GNC debido al menor costo relativo de este combustible y a la práctica generalizada de la conversión de motores. Adicionalmente, la tendencia observada en la Figura 9 sugiere un deterioro prematuro



Nota: Las regiones sombreadas representan un intervalo de confianza del 95%.

Figura 9. Emisiones promedio por distancia por año-modelo para automóviles particulares a gasolina en comparación con taxis a gasolina y GNC en Bogotá

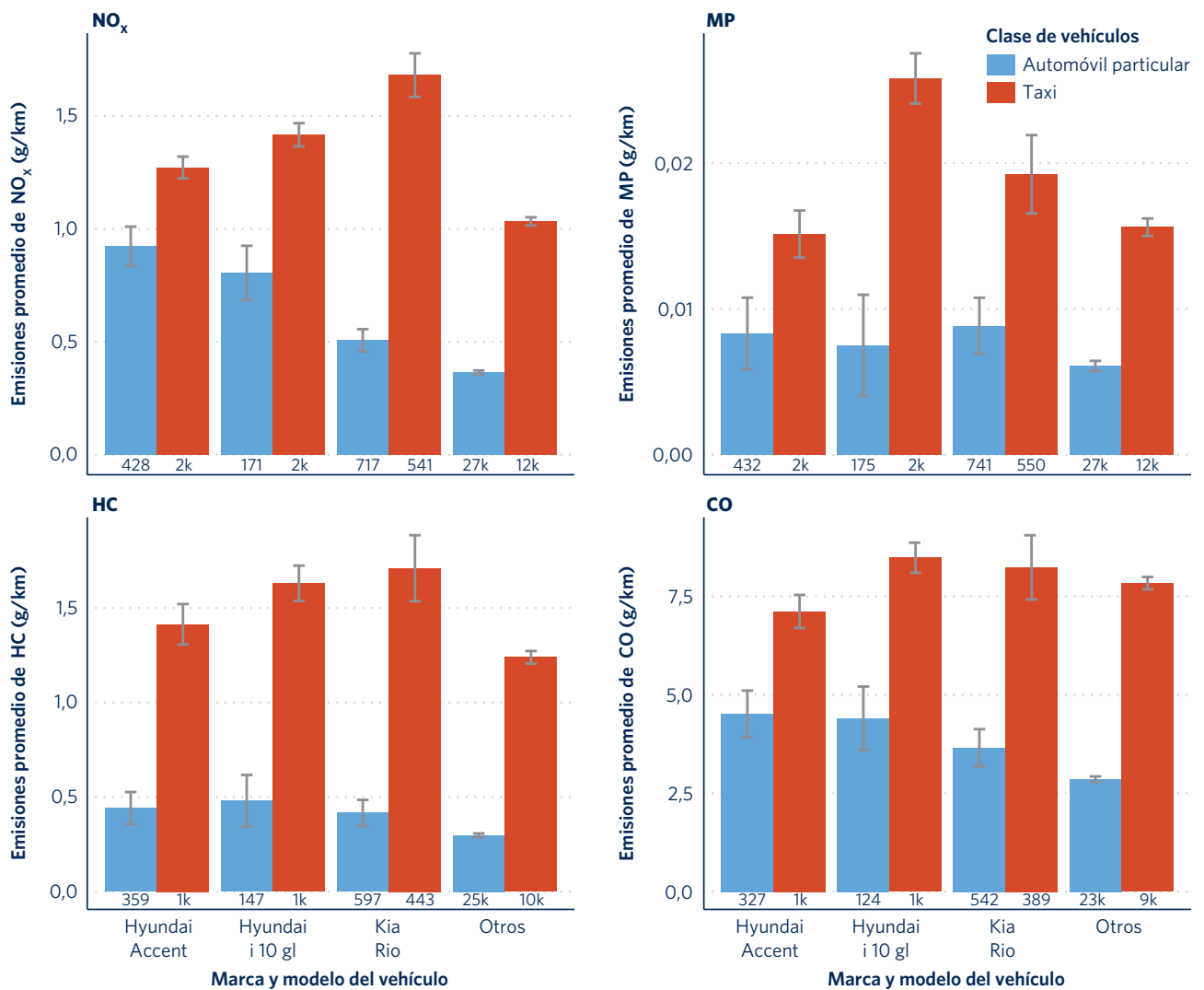
de los sistemas de control de emisiones en los taxis frente a los automóviles particulares, consecuencia probable de su alto kilometraje.⁵⁹ La Figura 9 muestra que la brecha más amplia de emisiones entre taxis y automóviles particulares ocurre en los años-modelo 2010 a 2018, diferencia que tiende a reducirse en los taxis más recientes. La recopilación futura de datos que cubran años-modelo más recientes permitirá determinar si los taxis de 2023 en adelante mantienen mejoras sostenidas y, por lo tanto, menores tasas de degradación. Asimismo, una documentación más rigurosa sobre las conversiones de taxis a GNC en la base de datos del RUNT resultaría fundamental para profundizar en la comprensión de las tendencias de emisiones.

La Figura 9 también ilustra que ha habido poca mejora en las emisiones reales promedio de MP entre los automóviles particulares a gasolina desde el año-modelo 2010, y en los taxis desde el año-modelo 2020. En los Estados Unidos, tendencias similares en vehículos ligeros se han atribuido a la transición hacia la tecnología de inyección directa de gasolina (GDI), la cual registra mayores emisiones reales de MP en comparación con otras tecnologías de inyección.⁶⁰ Al igual que en el mercado estadounidense, Colombia ha experimentado un crecimiento notable en la adopción de la tecnología GDI en el mercado vehicular.⁶¹

⁶⁰ Meyer et al., *Particulate Matter*.

⁶¹ Supriya Yadav, "Gasoline Direct Injection GDI System Market Analysis", Cognitive Market Research, octubre de 2025, <https://www.cognitivemarketresearch.com/gasoline-direct-injection-gdi-system-market-report>.

⁵⁹ Cuéllar Álvarez, "Development".



Nota: La figura compara taxis y automóviles particulares del grupo de años-modelo 2010 a 2022, alineados con las normas Euro 2 en Colombia. Las barras de error representan un intervalo de confianza del 95%. Los números debajo de las barras indican el número de mediciones.

Figura 10. Emisiones promedio específicas por distancia de modelos comunes de taxis comparadas con automóviles particulares

Una comparación de los modelos de taxis más comunes con automóviles particulares del mismo grupo de años-modelo (Figura 10) proporciona evidencia adicional sobre las elevadas emisiones de los taxis en Bogotá. Como se observa, los modelos de taxis Hyundai Accent, Hyundai i10gl y Kia Rio registraron emisiones de NO_x entre 1,4 y 3,3 veces más altas, emisiones de MP entre 1,8 y 3,4 veces más altas, niveles de HC entre 3,2 y 4,1 veces más altas, y emisiones de CO entre 1,6 y 2,3 veces más altas que los automóviles particulares a gasolina.

Los resultados de las Figuras 9 y 10 subrayan la importancia de priorizar la flota de taxis en los programas de inspección y mantenimiento, así como en las estrategias de renovación vehicular. Tendencias similares de emisiones elevadas en taxis se identificaron en el

análisis de TRUE para Ciudad de México, el cual se explora con mayor detalle en una sección posterior del informe.

TENDENCIAS DE LAS EMISIONES EN VEHÍCULOS DIÉSEL

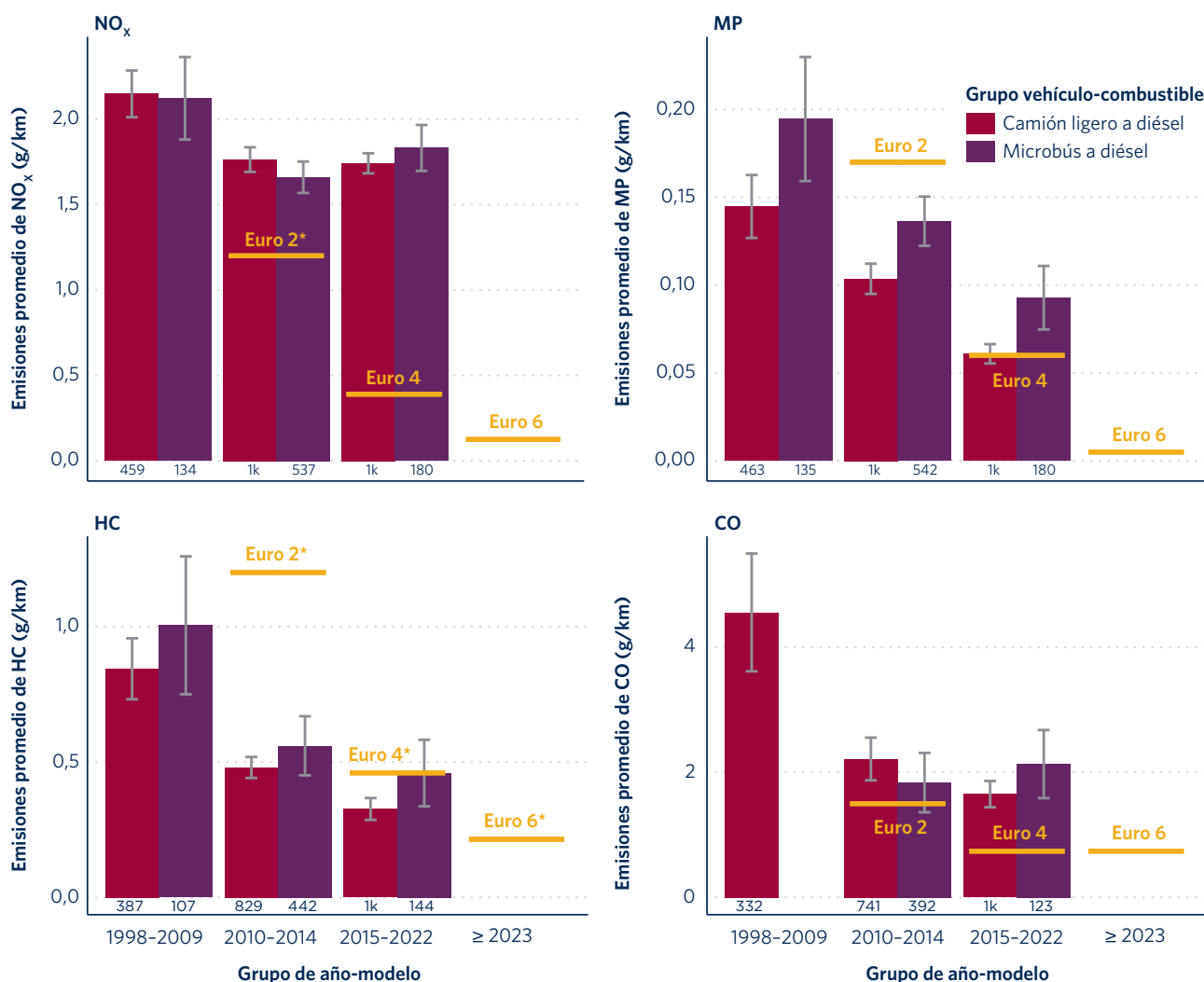
CAMIONES LIGEROS Y MICROBUSES

Los camiones ligeros y microbuses diésel mostraron mejoras limitadas en sus emisiones de NO_x a lo largo del tiempo, con emisiones en condiciones reales de circulación por encima de los límites establecidos para aquellos

vehículos homologados bajo los estándares europeos.⁶² Durante el periodo en que la norma Euro 4 estuvo vigente, los camiones ligeros y microbuses diésel de los años-modelo 2015 a 2022 registraron emisiones de NO_x 4 veces superiores al límite de vehículos homologados bajo dicho estándar (Figura 11). Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas de TRUE, las cuales indican que no se observa una reducción significativa de NO_x en condiciones reales hasta la implementación de las normas Euro 6 y posteriores (proceso que en Colombia inició

en 2023).⁶³ En el caso de los automóviles de pasajeros diésel de los años-modelo 2015 a 2022, se observó una tendencia similar, con emisiones de NO_x 6 veces superiores al límite de vehículos homologados bajo el estándar Euro 4 (Figura A4). Esto refuerza la idea de que el endurecimiento progresivo de las normas de emisiones es una medida crítica para mitigar las emisiones de NO_x de los vehículos diésel.

En general, los camiones ligeros y microbuses diésel presentaron menores emisiones promedio de MP, HC y



Nota: Las barras de error representan un intervalo de confianza del 95%. Los números debajo de las barras indican el número de mediciones. Los límites de emisión Euro mostrados corresponden a vehículos de clase N1 III (masa superior a 1.700 kg). No hubo mediciones suficientes para unidades del año-modelo 2023 para analizar aquellos certificados bajo la norma Euro 6, pero el límite se incluye como referencia.

* Indica el límite de HC+NO_x.

Figura 11. Emisiones promedio específicas de distancia entre camiones ligeros y microbuses diésel a lo largo del tiempo

62 Las comparaciones no tienen como objetivo determinar el cumplimiento de los estándares regulatorios, ya que las condiciones de ensayo y los métodos de medición difieren entre las pruebas de laboratorio y las mediciones en condiciones reales de operación.

63 Kaylin Lee et al., *Evaluation of Real-World Vehicle Emissions in Warsaw* (TRUE Initiative, 2022), <https://trueinitiative.org/research/evaluation-of-real-world-vehicle-emissions-in-warsaw/>.

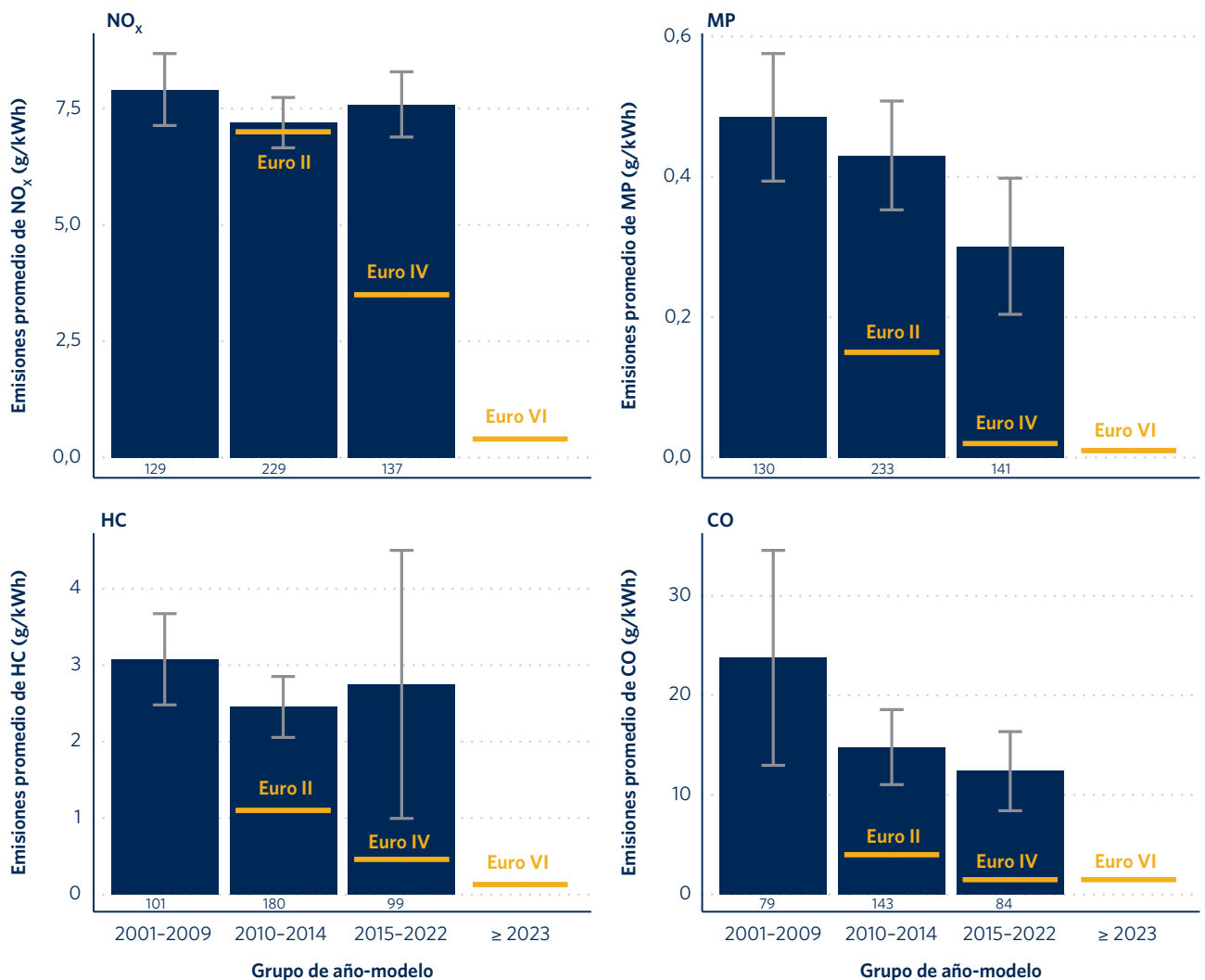
CO, con grupos de años-modelo más recientes alineados con el aumento en la exigencia de los estándares de emisiones en Colombia. Los camiones ligeros diésel de los años-modelo 2010 a 2022 registraron niveles de MP dentro de los parámetros de las normas Euro 2 y Euro 4; no obstante, los microbuses diésel de los años-modelo 2015 a 2022 mostraron emisiones 1,5 veces superiores al límite Euro 4.

VEHÍCULOS PESADOS

En consonancia con los resultados de otros vehículos diésel, los vehículos pesados registraron emisiones de NO_x en condiciones reales consistentemente altas, sin mejoras medibles en su desempeño de emisiones a lo largo del tiempo. Las unidades de los años-modelo 2015 a 2022 presentaron emisiones de MP en condiciones reales

particularmente elevadas, alcanzando 15 veces los límites de emisiones de vehículos homologados bajo el estándar Euro IV (Figura 12). En este mismo grupo de años-modelo, las emisiones reales de otros contaminantes también superaron los límites de vehículos homologados bajo Euro IV: 2 veces para NO_x, 6 veces para HC y 8 veces para CO.

La distribución de las emisiones de MP de los vehículos pesados diésel estuvo sesgada hacia valores altos, con un promedio que excedió la mediana en 0,2 g/kWh, lo que confirma la presencia de vehículos altamente emisores dentro de la flota (Figura 13). El 10% superior de emisores registró valores superiores a 1 g/kWh, aproximadamente 7 veces y 50 veces el límite establecido en para aquellos vehículos homologados bajo el estándar Euro II y Euro IV, respectivamente. Se observó una distribución similar



Nota: Las barras de error representan un intervalo de confianza del 95%. Los números debajo de las barras indican el número de mediciones. Los límites Euro se muestran solo como referencia.

Figura 12. Emisiones promedio específicas de energía entre vehículos pesados diésel a lo largo del tiempo

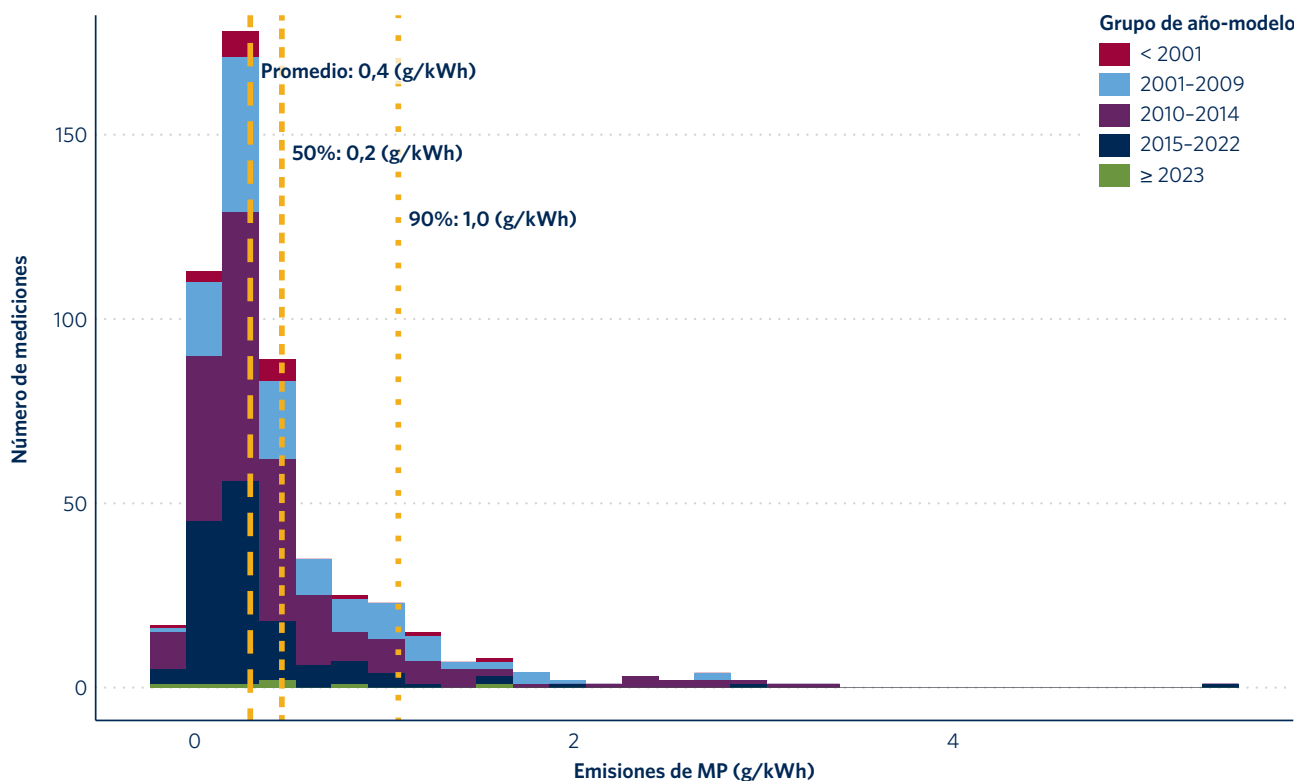


Figura 13. Distribución de las emisiones de MP específicas por tipo de energía de los vehículos pesados diésel por grupo de año-modelo

de años-modelo entre el 10% de mayores emisores y el resto de la flota, revelando que la norma de emisiones no fue el único factor que explica las altas emisiones en los vehículos pesados diésel en Bogotá. Si bien los camiones pesados de la ciudad tienden a ser antiguos—el mayor registro fue de 77 años—estos resultados sugieren que la modernización de la flota y la renovación vehicular por sí solas probablemente no serían suficientes para reducir las altas emisiones reales. Por lo tanto, se requiere una investigación más profunda sobre las causas de estas emisiones en este segmento. Además, monitorear las emisiones reales de los vehículos pesados de los años-modelo 2023 y posteriores proporcionaría información valiosa para determinar si la tendencia persiste en las tecnologías más recientes.

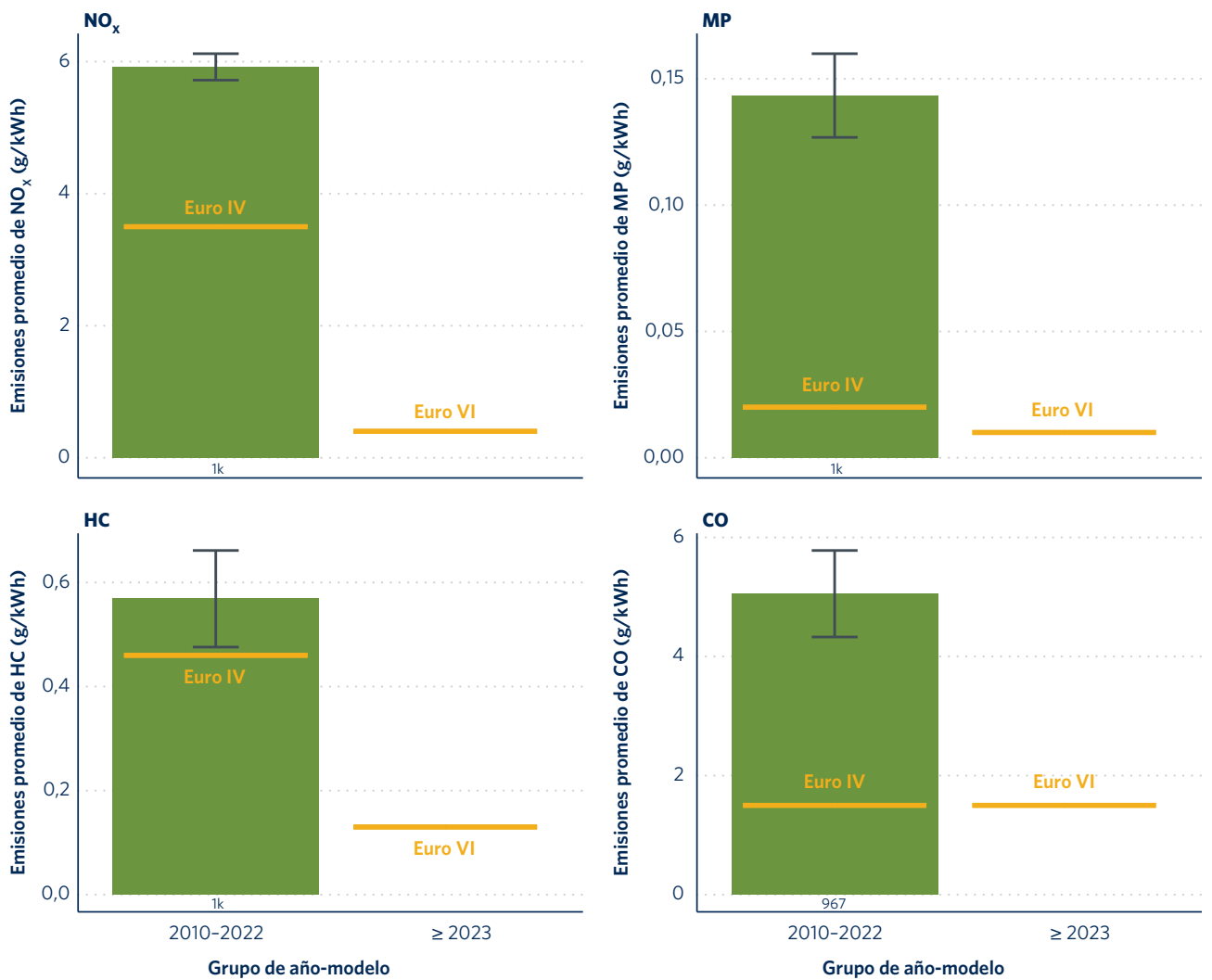
TENDENCIAS DE EMISIONES EN AUTOBUSES

Los autobuses diésel en Bogotá registraron emisiones reales de MP significativamente altas en comparación con los límites de la norma Euro IV. Las autobuses diésel de los años-modelo 2010 a 2022 mostraron emisiones promedio de MP 7 veces superiores al límite establecido para aquellos vehículos homologados bajo el estándar Euro IV, una tendencia similar a la de los vehículos pesados (Figura 14). En este mismo grupo de años-modelo, las emisiones reales de otros contaminantes

también superaron los límites de vehículos homologados bajo el estándar Euro IV: 1,7 veces para NO_x , 1,2 veces para HC y 3,4 veces para CO. Estos resultados subrayan la importancia de los esfuerzos en curso de Bogotá para sustituir los autobuses diésel por modelos de bajas o cero emisiones. Al igual que en otros vehículos diésel en Bogotá, las emisiones promedio de MP en condiciones reales muy por encima de los límites esperados justifican una mayor investigación o la implementación de programas específicos de inspección y mantenimiento.

Los autobuses diésel, que constituyeron la mayoría de las unidades monitoreadas, presentaban una antigüedad promedio de 7 años; el 98% de estos pertenecía a los años-modelo 2010 a 2022, periodo que coincide con la entrada en vigor de las normas de emisión Euro IV para autobuses urbanos diésel en el país. Por su parte, los autobuses a GNC correspondieron mayoritariamente al año-modelo 2021 y es probable que cuenten con certificación bajo la norma Euro VI, dado que la ciudad ha incorporado este tipo de unidades en las flotas zonales de TransMilenio y del SITP desde 2019.⁶⁴ Los autobuses a GNC del año-modelo 2021 registraron emisiones en condiciones reales de circulación por debajo de los límites

⁶⁴ Cuevas, “Con 320 Buses Zonales”; Suache, “Empiezan a Rodar los Primeros 140 Buses”.



Nota: Las barras de error representan un intervalo de confianza del 95%. Los números debajo de las barras indican el número de mediciones. Los límites Euro se muestran solo como referencia. No se dispuso de mediciones suficientes para unidades del año-modelo 2023 para analizar la norma Euro 6, pero el límite se incluye como referencia.

establecidos por buses urbanos homologados bajo el estándar Euro VI. El análisis de los autobuses diésel de años-modelo 2010 a 2022 incluyó tanto unidades BRT de TransMilenio como otros autobuses no BRT. Debido a

que ambos tipos de vehículos mostraron tendencias de emisión similares, los resultados se presentan de manera agregada.

ESTUDIO DE CASO DE EMISIONES: BOGOTÁ FRENTE A CIUDAD DE MÉXICO

Una comparación con el estudio de detección remota de TRUE en la Ciudad de México revela diferencias importantes en el desempeño de las emisiones en condiciones reales de circulación, las cuales pueden orientar las prioridades de política pública para Bogotá. Los resultados indicaron que las políticas implementadas más allá de las normas nacionales de emisión probablemente han contribuido a reducciones sostenidas en la Ciudad de México. En particular, Bogotá podría considerar la inclusión de límites de emisiones de NO_x en su programa rutinario de inspección vehicular y el uso de la detección remota para el monitoreo de emisiones en condiciones reales.

TENDENCIAS DE VEHÍCULOS Y EMISIONES

El estudio de la Ciudad de México, realizado en 2022, involucró mediciones en 21 ubicaciones distribuidas en

la Ciudad de México, el Estado de México y Puebla.⁶⁵ Se recopilaron casi 75.000 mediciones con lecturas válidas de contaminantes, lo que resultó en un total de 44.731 registros tras filtrar por velocidad del vehículo y coincidencia de la información del vehículo. El estudio de Ciudad de México se centró en los vehículos ligeros a gasolina, incluyendo automóviles particulares y taxis.⁶⁶ Tanto la flota de taxis como la de automóviles particulares eran ligeramente más nuevas en la Ciudad de México en comparación con Bogotá (Figura 15). En promedio, los automóviles de pasajeros y taxis en México eran 1 y 2 años más jóvenes, respectivamente, que los de Bogotá. Sin embargo, en ambas ciudades los vehículos se concentraron en los años-modelo 2010 a 2018. La Ciudad de México presenta una proporción muy pequeña de taxis fabricados en 2008 o antes, debido probablemente a la restricción de operación de 10 años impuesta por la normativa local.

Los resultados en ambas regiones demostraron que las unidades más recientes emiten niveles significativamente menores en comparación con los vehículos más antiguos de la flota. No obstante, los taxis en ambas ciudades registraron emisiones sustancialmente superiores a las de los automóviles particulares equivalentes, lo que confirma la degradación de los sistemas de control de emisiones en el servicio público debido a su alto

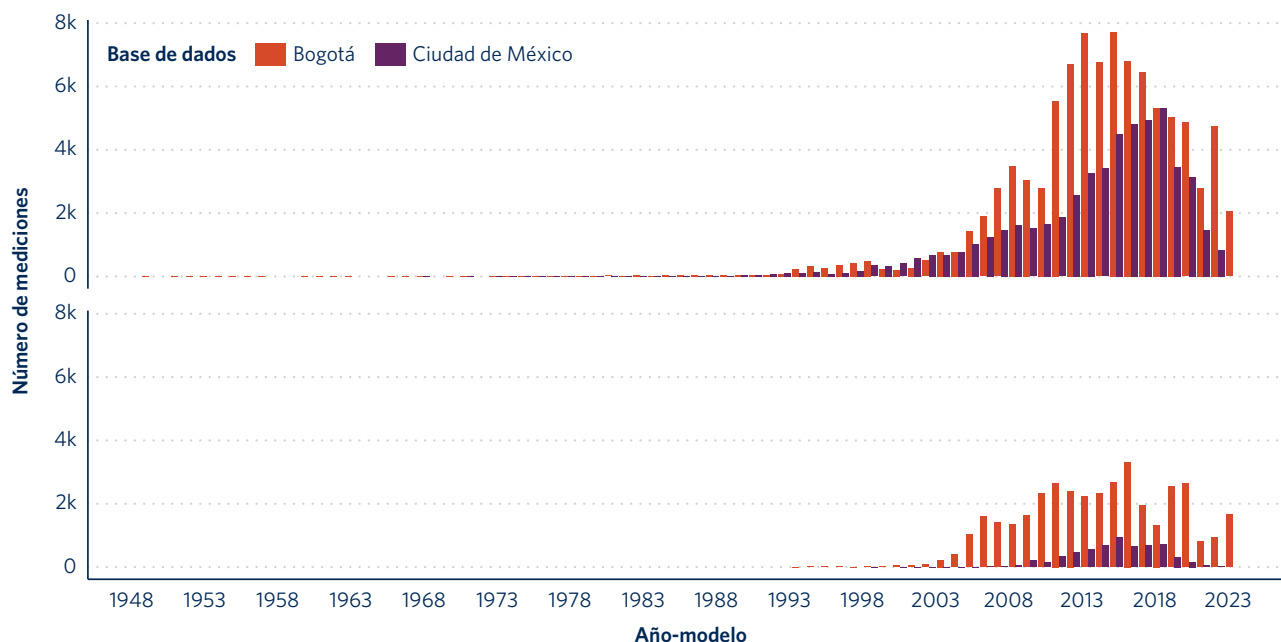
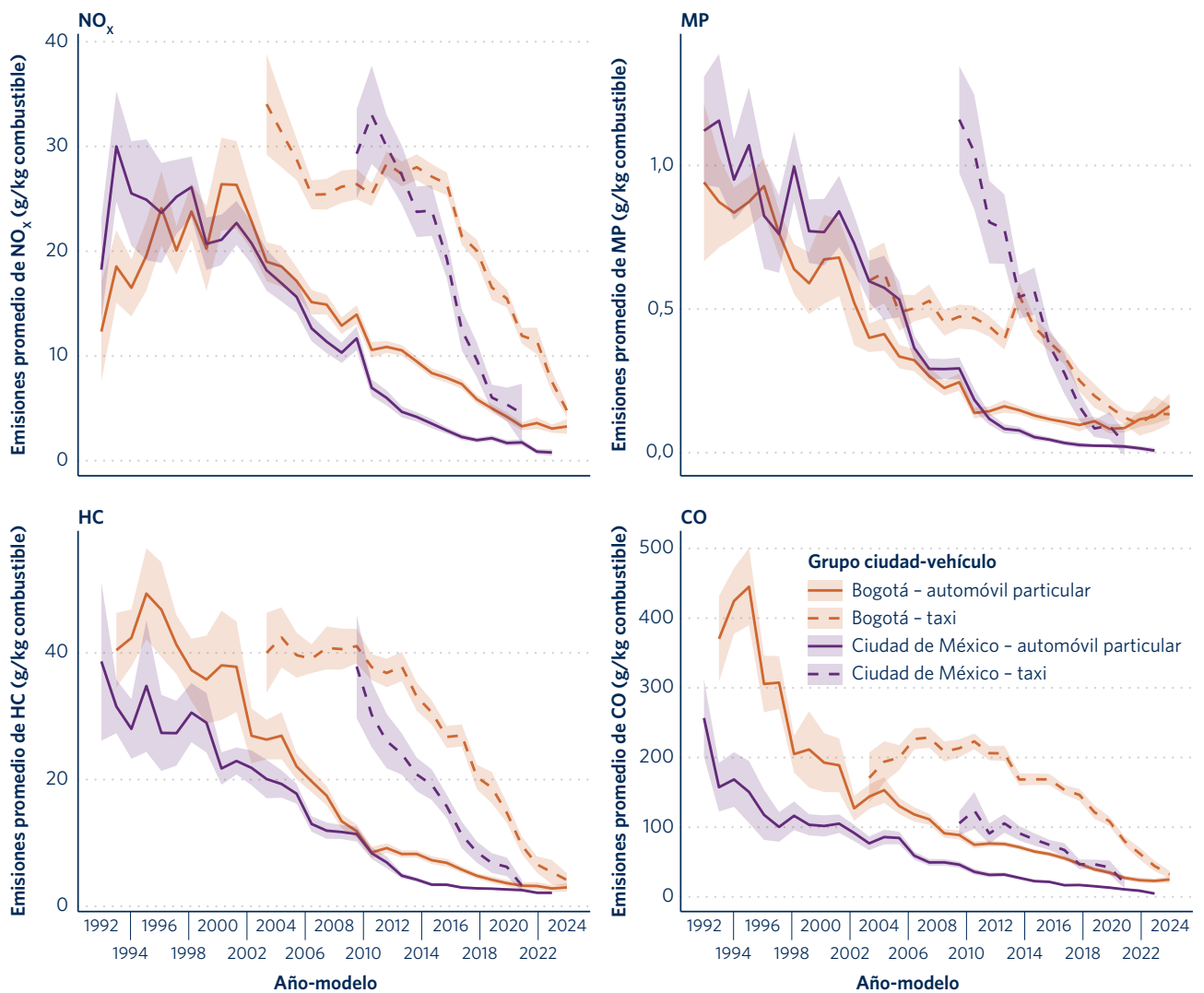


Figura 15. Mediciones de automóviles particulares y taxis en Bogotá y Ciudad de México por año-modelo

65 Meyer et al., *Passenger Vehicle and Taxi Emissions in Mexico City*.

66 A lo largo de esta sección del análisis, los automóviles de pasajeros y camiones ligeros en Bogotá se recategorizaron como automóviles de pasajeros para permitir una mejor comparación con el conjunto de datos de México.



Nota: Las áreas sombreadas indican el intervalo de confianza del 95% de la estimación promedio. Las líneas punteadas representan las emisiones de los taxis y las líneas continuas las de los automóviles particulares.

Figura 16. Emisiones específicas de NO_x, MP, HC y CO por tipo de combustible por año-modelo para automóviles particulares y taxis en Bogotá y Ciudad de México

kilometraje (Figura 16). A pesar de las similitudes en las tendencias generales, surgieron diferencias críticas entre las dos ciudades respecto a los niveles de emisión.

Ambas regiones mostraron emisiones promedio similares de NO_x y MP para los automóviles de pasajeros fabricados antes de 2010. Sin embargo, las unidades más nuevas de Bogotá (años-modelo 2010 y posteriores) registraron mayores emisiones de NO_x y MP que sus contrapartes de Ciudad de México. De estos vehículos, los automóviles particulares de Bogotá tuvieron emisiones de NO_x dos veces más altas en promedio en comparación con los de la capital mexicana. Mientras que las emisiones de MP disminuyeron de manera constante en los modelos más nuevos de Ciudad de México, en Bogotá se mantuvieron aproximadamente al mismo nivel. Entre los años-modelo

1992 a 2022, los automóviles particulares de Bogotá registraron entre 1,4 y 4,8 veces más emisiones de CO, y entre 1,1 y 2,0 veces más emisiones de HC que los de Ciudad de México. Los taxis en Bogotá también mostraron niveles de CO y HC consistentemente más elevados que los taxis en Ciudad de México.

DIFERENCIAS REGIONALES

Es probable que diversos factores hayan contribuido a la disparidad de emisiones entre ambas regiones, incluyendo las diferencias en el contenido de azufre del combustible, las normas nacionales de emisiones, las regulaciones regionales sobre vehículos en circulación y la geografía. El análisis de estos aspectos, junto con los resultados de emisiones, proporciona información

Tabla 4. Estándares de emisiones para vehículos nuevos a gasolina en Bogotá y México desde 2010

País	Norma	Años aplicables	Ciclo	CO (g/km)	NMHC ^a (mg/km)	NO _x (mg/km)	Estándar equivalente
México	NOM-042	2005-presente	FTP (EE. UU.)	2,11	99	249	Tier 1+/ Euro 3
Colombia	Resolución 910 de 2008	2010-2022	FTP (EE. UU.)	2,11	160	250	Tier 1
			NEDC (Europa)	2,20	500 (HC + NO _x)		Euro 2
	Resolución 0762 de 2022	2023-presente	NEDC (Europa)	1,00	100	80	Euro 4

^a NMHC indica hidrocarburos no metánicos.

valiosa sobre los aciertos de Bogotá en la gestión de emisiones y señala posibles brechas en las políticas públicas. Aunque son relativamente comparables entre regiones, las diferencias en la composición de la flota, las condiciones de conducción y la temperatura ambiente también influyeron en las disparidades observadas en las emisiones reales de circulación.⁶⁷

Contenido de azufre en el combustible. Los niveles históricamente elevados de azufre en la gasolina de Bogotá ofrecen una explicación de la brecha de emisiones entre ambas flotas. El uso persistente de combustible con alto contenido de azufre degrada irreversiblemente los sistemas de control de emisiones, como los convertidores catalíticos y los filtros de MP.⁶⁸ La norma nacional de México para el contenido de azufre en la gasolina es de 30 ppm como promedio anual y 80 ppm como máximo por lote desde 2016, no obstante, la Ciudad de México comenzó la transición hacia combustibles de 30 ppm desde 2007.⁶⁹ En contraste, el contenido de azufre en la gasolina de Colombia era de 300 ppm, reduciéndose a 100 ppm en 2021 y a 50 ppm a partir de 2022.⁷⁰

Normas nacionales de emisiones. Las normas de emisiones para vehículos ligeros en México se

actualizaron por última vez en 2005, introduciendo un marco que combinaba las regulaciones Tier 1 de Estados Unidos y Euro 3 (Tabla 4).⁷¹ Por su parte, la Resolución No. 910 de 2008 en Colombia introdujo una norma con límites de CO similares, pero con diferencias fundamentales en los umbrales de HC y NO_x.⁷² La norma colombiana permitía un límite combinado para las emisiones de HC y NO_x al certificar bajo el esquema europeo. Aunque el límite de NO_x en Colombia, bajo estándares estadounidenses, es equivalente al de México, la opción de certificar bajo la norma europea, menos estricta en su momento, ayuda a explicar las elevadas emisiones de HC y NO_x detectadas en los vehículos de Bogotá.

La continua disminución de las emisiones vehiculares en la Ciudad de México, a pesar de que las normas nacionales no han sido modificadas recientemente, señala la existencia de otros factores de política pública que impulsan estas reducciones. Si bien las diferencias en los límites de emisión explican parte de la brecha entre ambas regiones, es probable que otras medidas regulatorias locales contribuyan significativamente a reducir la contaminación en la capital mexicana. Esto resalta la importancia de desarrollar un enfoque integral de política pública que no se limite únicamente a la normativa nacional de emisiones.

Normativa regional. El programa de inspección y mantenimiento de la Ciudad de México es uno de los factores que probablemente contribuye a la reducción de emisiones en los automóviles de pasajeros más nuevos. A diferencia de Bogotá, donde las pruebas periódicas obligatorias no incluyen límites de NO_x, en Ciudad de México sí se contemplan, con una mayor

67 Los valores medianos para Bogotá y Ciudad de México, respectivamente, son los siguientes: 24 km/h y 23 km/h para la velocidad, 0,35 m/s² y 0,47 m/s² para la aceleración, 4 kW/t y 5,9 kW/t para VSP, y 24 °C y 31 °C para la temperatura ambiente.

68 Zhaohui He et al., "Recent Advances in Sulfur Poisoning of Selective Catalytic Reduction (SCR) Denitration Catalysts", *Fuel* 365 (junio de 2024): 131126, <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.131126>.

69 Comisión Reguladora de Energía, "Acuerdo por el que la Comisión Reguladora de Energía Expide la Norma Oficial Mexicana NOM-016-CRE-2016, Especificaciones de Calidad de los Petrolíferos", 31 de octubre de 2016, https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5450011&fecha=29/08/2016#gsc.tab=0; Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, "Adaptation of the Vehicle Emission Model MOVES to Mexico", 2022, <https://www.epa.gov/sites/default/files/2021-03/documents/usaid-inecc-2016-01-31.pdf>.

70 Resolución Número 40444 de 2023.

71 Norma Oficial Mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 7 de septiembre de 2005, https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=2091196&fecha=07/09/2005#gsc.tab=0.

72 Resolución 910 de 2008.

rigurosidad para los vehículos más nuevos que aspiran a los certificados de circulación más limpios. Los automóviles de pasajeros que cumplen con los dos certificados de mayor exigencia promediaron entre 1 y 5 g/kg de combustible de NO_x en las pruebas de detección remota, niveles que son iguales o incluso inferiores a los de las unidades más recientes en Bogotá. Estos resultados sugieren que la Ciudad de México cuenta con un programa eficaz de inspección y mantenimiento y que Bogotá podría mitigar las emisiones en condiciones reales de circulación añadiendo límites de NO_x a su normativa. Además de incluir el NO_x, el programa mexicano también exige a los vehículos certificados bajo las normas estadounidenses Tier 2 Bin 5 o Euro 5 de las pruebas periódicas durante un lapso de dos a cuatro años, un incentivo que Bogotá podría considerar para acelerar la adopción de tecnologías limpias.⁷³

En la Ciudad de México, el impacto de las pruebas periódicas también es evidente según el lugar de registro. La regulación mexicana exige que los vehículos de la megalópolis, que incluye la Ciudad de México y seis estados circundantes, se sometan a procesos de inspección periódicos.⁷⁴ Análisis previos de detección remota encontraron que los vehículos de pasajeros antiguos registrados en el Estado de México emitían niveles de contaminantes mucho más altos que sus contrapartes de la capital, lo que sugiere que los procedimientos de inspección y mantenimiento no son homogéneos entre regiones.⁷⁵ Por lo tanto, la coordinación y homogeneización de los procedimientos es vital para lograr mayores reducciones de emisiones para Bogotá, sus jurisdicciones vecinas y el gobierno nacional.

Asimismo, México emplea la detección remota como una herramienta de vigilancia informal del mercado. Los órganos ambientales regionales y nacionales de México realizan campañas periódicas de monitoreo para evaluar las tendencias de emisiones de la flota, acumulando más de 500.000 mediciones desde 2008.⁷⁶ Aunque

este programa no tiene fines sancionatorios directos, proporciona una supervisión que puede disuadir a los fabricantes de diseñar sistemas de control de emisiones ineficaces que finalmente conduzcan a mayores emisiones en condiciones reales.⁷⁷

Taxis. Ambas regiones registraron emisiones elevadas en el segmento de taxis, confirmando que esta flota es una fuente importante de contaminación. La Ciudad de México implementa varios programas para abordar este problema. Por ejemplo, los taxis tienen un límite de 10 años de operación, aunque no existe ningún requisito de edad asociado con el registro de taxis. Además, la Ciudad de México un programa de renovación que ofrece incentivos económicos a los propietarios que sustituyen unidades antiguas a favor de modelos más nuevos y de menores emisiones.⁷⁸ Si bien estos programas fueron diseñados para promover la renovación de la flota, el número de vehículos reemplazados ha sido limitado en los últimos años.⁷⁹ Debido a que los taxis son propensos a un rápido deterioro del sistema de control de emisiones, los límites de edad o las restricciones de operación por sí solos son insuficientes para lograr reducciones sostenidas de las emisiones. La transición a modelos y tecnologías de vehículos más limpios y duraderos y la implementación de estrictos requisitos de inspección y mantenimiento se encuentran entre las soluciones para maximizar la reducción de las emisiones de los taxis.

Geografía. Por último, los niveles más altos de CO y HC tanto en automóviles particulares como en taxis en Bogotá podrían ser el resultado de la gran altitud, ya que la elevación de la ciudad es aproximadamente 400 metros superior a la de Ciudad de México.⁸⁰ La combustión incompleta de combustible debido a la elevada altura puede contribuir a mayores emisiones de CO y HC en condiciones reales entre los vehículos de Bogotá.⁸¹

73 Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, "Verificación Vehicular", consultado el 16 de diciembre de 2025, <https://sedema.cdmx.gob.mx/programas/programa/verificacion-vehicular>.

74 Norma Oficial Mexicana NOM-167-SEMARNAT-2017, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 5 de septiembre de 2017, https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5496105&fecha=05/09/2017#gsc.tab=0.

75 Meyer et al., *Passenger Vehicle and Taxi Emissions in Mexico City*.

76 Agencia de Estados Unidos para el Desarrollo Internacional e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático, "Adaptation of the Vehicle Emission Model MOVES to Mexico"; Gerencia de Eficiencia Energética y Sustentabilidad, "Aplicación de la NOM-167-SEMARNAT-2016, Mediante Campañas de Medición de Emisiones con Sensor Remoto en la Megalópolis", 28 de noviembre de 2017, https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment_data/file/555003/10.Informe_Final_Campan_a_Medicio_n_Emisiones_Sensor_Remoto_Megalo_polis_Noviembre_2017_.pdf; Junta de Gobierno del INECC, *Informe de Autoevaluación*, 31 de diciembre, 2019, https://www.inecc.gob.mx/transparencia/transparencia/2019_inf_autoevaluacion.pdf.

77 Yoann Bernard et al., *Worldwide Use of Remote Sensing to Measure Motor Vehicle Emissions* (Consejo Internacional de Transporte Limpio, 2019), <https://theicct.org/publication/worldwide-use-of-remote-sensing-to-measure-motor-vehicle-emissions/>.

78 Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México, "Aviso por el que se dan a Conocer los Lineamientos de Operación de la Acción Social Programa de Sustitución para el Transporte Público Individual Sostenible, 2025", 2025, https://data.consejeria.cdmx.gob.mx/portal_old/uploads/gacetas/d271bi5455d24059f599e650c2cd3eaf.pdf.

79 Secretaría de Movilidad de la Ciudad de México, "Aviso".

80 Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., *Manual de Uso de Marca Ciudad "Bogotá"* (2021), <https://bogota.gov.co/bog/manual-de-marca-bogota.pdf>; "About Mexico City", MexicoCity.CDMX.gob.mx, consultado el 28 de octubre de 2025, <https://mexicocity.cdmx.gob.mx/e/about/about-mexico-city/>.

81 Yanxu Ren et al., "Effects of Altitude on Light Gasoline Vehicles: Fuel Consumption and Air Pollution", *Atmospheric Pollution Research* 16, no. 11 (2025), <https://doi.org/10.1016/j.apr.2025.102652>.

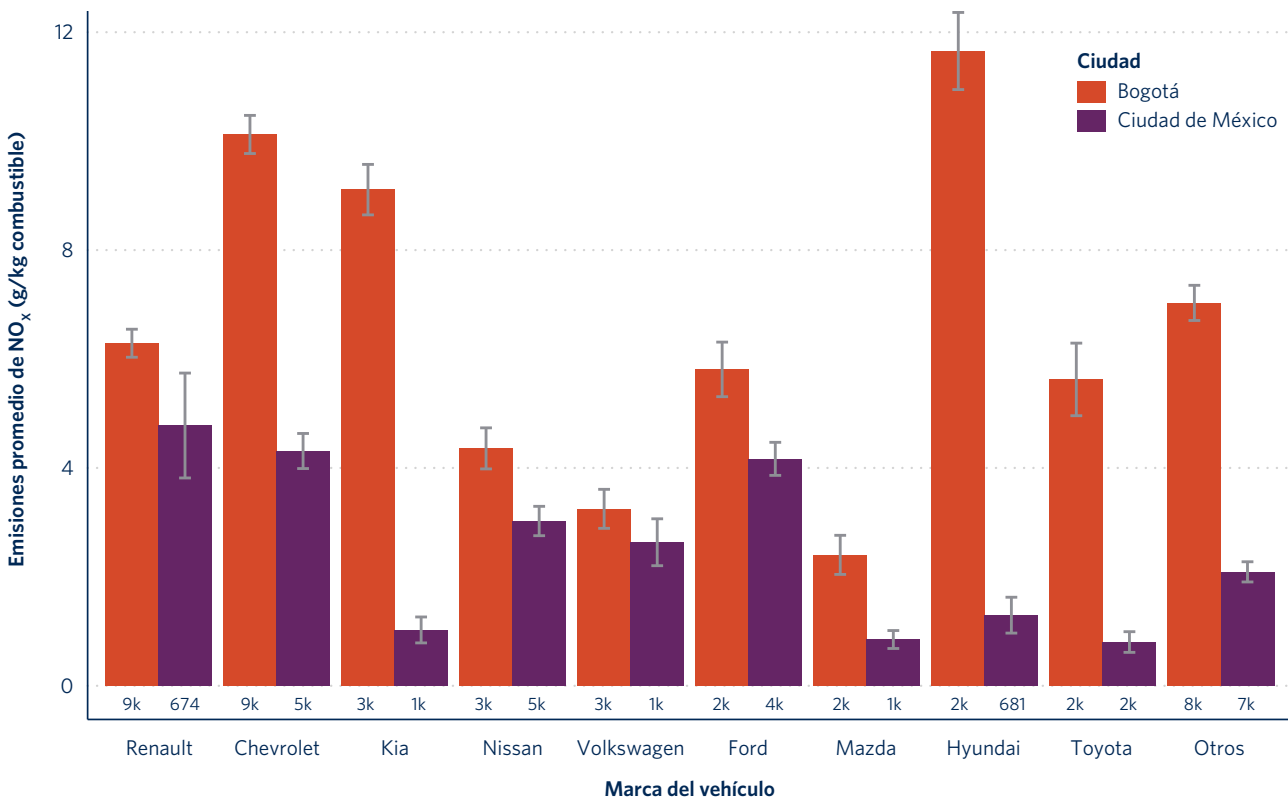
IMPORTANCIA DE MONITOREAR LAS EMISIONES EN CONDICIONES REALES

Los resultados por fabricante de vehículos indicaron que Bogotá podría beneficiarse de esfuerzos adicionales para monitorear y abordar las altas emisiones en condiciones reales. La Figura 17 muestra las emisiones promedio de NO_x para las marcas de vehículos más populares en Bogotá, en orden de mayor a menor número de mediciones. La mayoría de las marcas de vehículos registraron emisiones de NO_x en condiciones reales significativamente más altas en Bogotá en comparación con Ciudad de México (nivel de confianza del 95%). Algunos fabricantes tenían diferencias especialmente grandes entre las dos ciudades. Por ejemplo, los vehículos Hyundai y Kia medidos en Bogotá mostraron emisiones de NO_x en condiciones reales aproximadamente nueve veces mayores que las medidas en Ciudad de México. Una causa podría ser el mayor deterioro de estos vehículos en Bogotá debido a los años de operación utilizando combustible con mayor contenido de azufre.

También hay tendencias notables en las emisiones de MP por marca de vehículo. Como se destaca, las

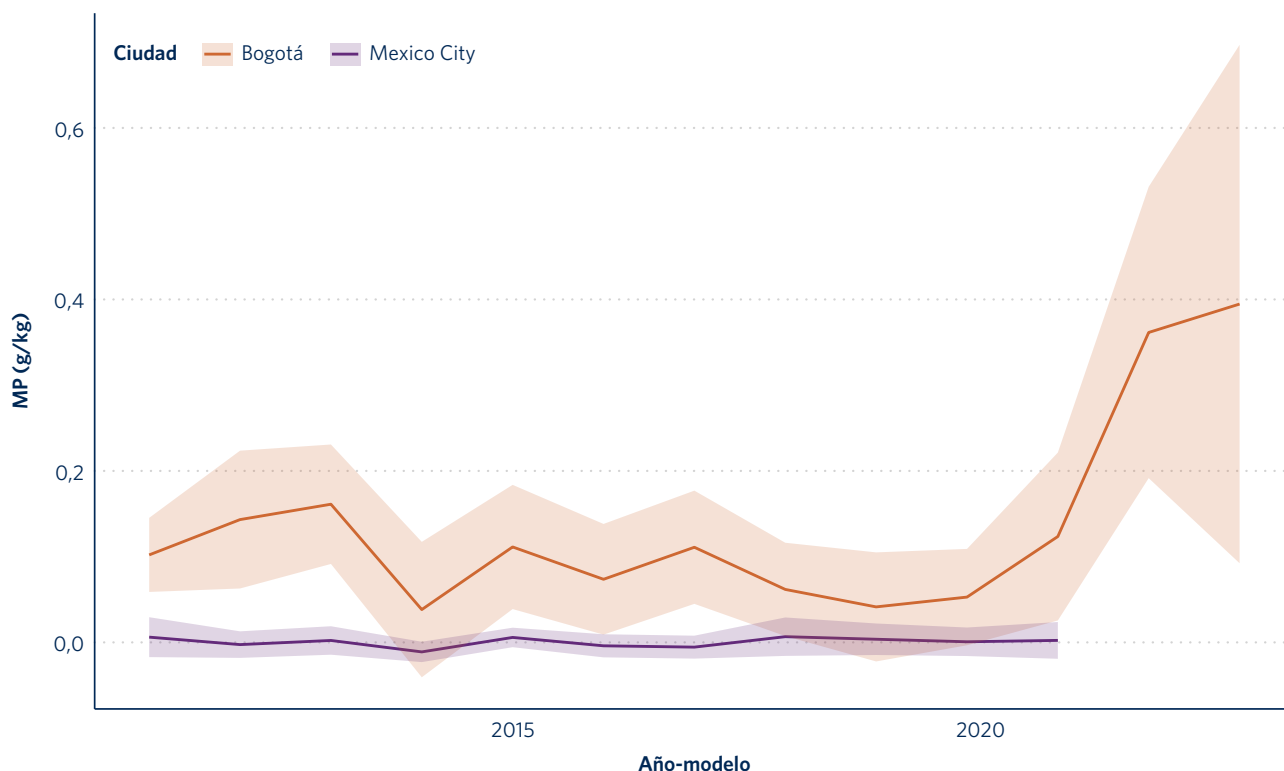
emisiones de MP de los automóviles de pasajeros han disminuido de manera constante en México, mientras tanto, se han estabilizado en Bogotá, mostrando una tendencia similar a la de los vehículos ligeros a gasolina en los Estados Unidos, donde el aumento de las emisiones de MP se ha relacionado con la tecnología GDI. Una investigación más profunda por marca de vehículo en Bogotá reveló que una marca, Toyota, mostró emisiones sustancialmente más altas entre los modelos más nuevos. La Figura 18 muestra el fuerte aumento de las emisiones de MP de los automóviles Toyota medidas en Bogotá alrededor del año-modelo 2021. No está claro si estos vehículos Toyota utilizan motores GDI. Los vehículos Toyota medidos en la Ciudad de México no muestran la misma tendencia, sin embargo, los datos más allá del año-modelo 2021 fueron limitados. Este hallazgo sugiere que el monitoreo continuo de las emisiones de MP de gasolina en condiciones reales puede ser beneficioso para ambas regiones para determinar si esta tendencia es evidente entre otras marcas de vehículos.

La brecha relativamente grande entre las mediciones de emisiones de Bogotá y Ciudad de México entre marcas de vehículos seleccionadas sugiere que



Nota: Las barras de error representan el intervalo de confianza del 95% y los números debajo de las barras indican la cantidad de mediciones. Se incluyen en el gráfico las marcas de vehículos con al menos 1.500 mediciones en Bogotá.

Figura 17. Emisiones promedio específicas de NO_x por combustible, por marca de vehículo, de automóviles particulares en Bogotá y



Nota: Las regiones sombreadas representan un intervalo de confianza del 95%.

Figura 18. Emisiones promedio específicas de combustible de MP de automóviles de pasajeros a gasolina Toyota por año-modelo en Bogotá y Ciudad de México.

podría justificarse una mayor investigación. Bogotá podría considerar implementar un programa oficial de vigilancia del mercado, utilizar detección remota para monitorear la flota y agregar un límite de emisiones de NO_x para pruebas periódicas para ayudar a reducir el exceso de emisiones en condiciones reales.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DE POLÍTICAS

Este informe presenta los resultados de un estudio de detección remota de 2023 en Bogotá, Colombia, comparando las emisiones de automóviles de pasajeros y taxis con los datos de detección remota de la Ciudad de México. A través del análisis de mediciones de NO_x , MP, HC y CO en condiciones reales, este estudio encontró que la progresión de las normas de emisiones en Colombia ha llevado a reducciones de emisiones en Bogotá. Sin embargo, ciertos segmentos de vehículos mostraron emisiones reales superiores a los niveles esperados y a sus límites de emisiones supuestos. Las políticas basadas en evidencia dirigidas a los grupos de vehículos con mayores emisiones en Bogotá podrían ayudar a reducir las emisiones relacionadas con los vehículos.

Esta sección resume los hallazgos clave en los distintos segmentos de vehículos en Bogotá y destaca las opciones de políticas para reducir las emisiones relacionadas con los vehículos, en cinco temas clave.

Los vehículos diésel registraron emisiones de NO_x y MP superiores a sus límites establecidos en la homologación, lo que subraya la necesidad de priorizar estos segmentos en programas de inspección, mantenimiento y la vigilancia del mercado. Los vehículos pesados y autobuses diésel exhibieron las emisiones promedio más altas de NO_x y MP entre los grupos de combustibles medidos, consistentemente por encima de los límites establecidos en la homologación bajo el estándar Euro. Todos los grupos diésel mostraron una mejora mínima en el desempeño de emisiones de NO_x en condiciones reales a lo largo del tiempo. Los camiones ligeros y microbuses diésel tuvieron emisiones de NO_x 4 veces superiores al límite establecido en la homologación bajo el estándar Euro 4. Además, los autobuses y vehículos pesados, probablemente homologados bajo la norma Euro IV, mostraron emisiones de MP en condiciones reales 7 y 15 veces superiores al límite, respectivamente. Nuestros resultados muestran que hubo vehículos pesados diésel con altas emisiones

de MP en todos los grupos de años-modelo, lo que indica que se requieren una mayor investigación y acciones para abordar el exceso de emisiones entre la flota actual de vehículos diésel.

Las emisiones elevadas también pueden ser el resultado de estrategias auxiliares de control de emisiones. Una estrategia auxiliar de control de emisiones se refiere a una desviación de la estrategia base de control de emisiones del vehículo en respuesta a determinadas condiciones de funcionamiento, lo cual está permitido en altitudes elevadas, incluso bajo las normas Euro 7. Para abordar cualquier exceso de emisiones asociado con la altitud, Colombia podría considerar incluir en futuras normas de emisiones un desempeño mínimo de emisiones para los vehículos que operan a la altitud de Bogotá.

Los vehículos diésel son un foco importante del actual programa de pruebas de emisiones en carretera de Colombia, y se podría emplear la detección remota para monitorear de manera más exhaustiva la flota de vehículos en busca de altos emisores. La detección remota puede ser favorable respecto de las actuales pruebas en carretera, que causan interrupciones en el tráfico urbano y se estima que cuestan más de COL\$ 1.750 millones probar no más de 3.000 vehículos al año.⁸²

La detección remota también puede servir como herramienta de vigilancia del mercado para verificar que los vehículos cumplen las normas de emisiones en condiciones de funcionamiento reales, incluso cuando no existen fallas de funcionamiento. Los programas de detección remota de la Ciudad de México podrían estar contribuyendo a reducir las emisiones de los automóviles de pasajeros a gasolina en comparación con Bogotá. Otras técnicas de detección remota pueden ofrecer beneficios similares, como la búsqueda de columnas de humo, que se ha probado con éxito en Eslovaquia.⁸³

Estos resultados resaltan la importancia de una eliminación acelerada de los autobuses diésel para impulsar la adopción de autobuses eléctricos en Bogotá. Además de la electrificación continua, la adopción de las normas Euro 6, teniendo en cuenta las emisiones en altitud, y eventualmente las normas Euro 7, pueden ayudar a reducir aún más las emisiones en condiciones reales.

Las emisiones de los vehículos a gasolina en Colombia han disminuido gracias a normas de emisiones progresivas, y la adopción de los requisitos Euro 6 podría generar reducciones adicionales. Los vehículos de pasajeros a gasolina del año-modelo 2023 en adelante emitieron entre un 88% y un 96% menos emisiones promedio de NO_x, MP, HC y CO en comparación con los modelos fabricados antes de 1998, anteriores al establecimiento de los estándares de emisiones en Colombia. La adopción de las normas de emisiones Euro 6 para vehículos ligeros a gasolina en Colombia permitirá seguir reduciendo las emisiones. La evidencia de otras ciudades muestra que la transición a los requisitos Euro 6, con límites de emisiones de NO_x más estrictos y pruebas en carretera, puede ayudar a reducir las emisiones y cerrar la brecha entre las emisiones reales y los límites regulatorios.⁸⁴

Los automóviles de pasajeros a gasolina anteriores a 2010 contribuyen de manera desproporcionada a las emisiones, lo que indica que restringir su circulación podría reducir las emisiones eficazmente. Aunque representaron solo el 24% de la flota a gasolina monitoreada, los modelos anteriores a 2010 (previos a la norma Euro 2 en Colombia) aportaron entre el 43% y el 58% de las emisiones específicas por distancia acumuladas de NO_x, MP, HC y CO. Estos resultados están alineados con un estudio de 2025 que modeló que el retiro acelerado de los automóviles de pasajeros pre-Euro y Euro 1 en Bogotá podría reducir las emisiones de CO de toda la flota en aproximadamente un 60%.⁸⁵

Instrumentos como el pico y placa y la iniciativa ZUMA podrían limitar gradualmente la operación de vehículos anteriores a 2010. Además de los planes existentes para promover los vehículos eléctricos, la primera ZUMA en la región de Bosa-Apogeo también podría limitar la operación de los vehículos más antiguos y con mayores emisiones. Estos resultados pueden informar el sistema de Etiquetado Ambiental Vehicular de Bogotá, que clasifica los vehículos en función de su impacto ambiental para apoyar políticas que incentiven tecnologías más limpias.⁸⁶

84 Lee et al., *Vehicle Emissions in Warsaw*.

85 Jaime y Mangones, "Benefits of Transportation Strategies".

86 Alcaldía Mayor de Bogotá D.C., "Así son las Etiquetas con las que el Distrito Medirá Contaminación de Vehículos", 8 de septiembre de 2023, <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/seguridad/asi-son-las-etiquetas-con-las-que-el-distrito-medira-contaminacion>; Ambiente Bogotá, "Planes, Proyectos y Estrategias para Mejorar la Calidad del Aire de Bogotá", Ambiente Bogotá, consultado el 24 de octubre de 2025, https://www.ambientebogota.gov.co/historial-de-noticias/-/asset_publisher/VqEYxdh9mhVF/content/estrategias-para-mejorar-la-calidad-del-aire-de-bogota.

82 Helmer Acevedo y Oscar Delgado, *Mecanismos de Bajo Costo Para La Verificación y Control de Emisiones Vehiculares En Colombia* (Consejo Internacional de Transporte Limpio, 2023), <https://theicct.org/publication/heavy-vehicles-colombia-costs-may23/>.

83 Christina Schmidt et al., "Identification of High Emitting Heavy Duty Vehicles Using Plume Chasing: European Case Study for Enforcement", *Science of The Total Environment* 994 (septiembre de 2025): 179844, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179844>.

Estas restricciones podrían combinarse con incentivos económicos para facilitar la transición hacia modelos más nuevos y de menores emisiones. Incentivos para la chatarrización bien diseñados, reforzados con restricciones de matriculación o circulación cuando sea necesario, podrían ofrecer la ruta más rápida hacia tales reducciones de emisiones.

Los vehículos ligeros a GNC emitieron, en condiciones reales, más del doble de contaminantes que sus equivalentes a gasolina.

Los automóviles de pasajeros y camionetas ligeras propulsados por GNC emitieron emisiones promedio más altas de todos los contaminantes en comparación con sus contrapartes propulsadas por gasolina de grupos de años-modelos comparables. Los automóviles de pasajeros y camiones ligeros propulsados por GNC emitieron emisiones de NO_x particularmente elevadas, más del doble que las de los vehículos de gasolina en grupos de años-modelo comparables. Estos niveles elevados podrían deberse a que se trata de vehículos adaptados (convertidos) al GNC en lugar de modelos fabricados originalmente para este combustible, ya que estos grupos no fueron distinguibles en este estudio.

Actualmente, los propietarios de ciertos vehículos dedicados a GNC reciben múltiples beneficios, como la exención del pico y placa y descuentos en el impuesto y Seguro Obligatorio de Accidentes de Tránsito obligatorio. Centrar las políticas existentes exclusivamente en incentivar los vehículos eléctricos ligeros, en lugar de los motores de combustión interna, garantizaría que se fomentara la compra y el funcionamiento únicamente de los vehículos con menores emisiones.

Además, nuestros hallazgos demostraron la necesidad de contar con mejores datos sobre las conversiones a GNC en Bogotá para comprender mejor su desempeño en materia de emisiones. Actualmente, el conjunto de datos gubernamentales del RUNT no indica si los vehículos se fabrican originalmente para combustible GNC o si son adaptados. Asimismo, existe una falta de datos confiables sobre el número de vehículos adaptados, en particular taxis. La realización de pruebas adicionales de emisiones en ambos tipos de vehículos a GNC permitiría comprender mejor su desempeño y desarrollar una regulación más efectiva para los vehículos a GNC en Colombia.

Implementar políticas de mantenimiento y chatarrización enfocadas en los taxis con mayores emisiones mitigaría significativamente su impacto real.

Los taxis en Bogotá mostraron emisiones reales hasta cinco veces mayores en comparación con los automóviles

particulares del mismo año-modelo. Observamos tendencias similares al comparar taxis y automóviles particulares del mismo modelo de vehículo. La amplia conversión de los taxis a GNC en Bogotá probablemente influyó en estas elevadas emisiones. La magnitud y la tendencia de las emisiones de los taxis también indicaron un deterioro acelerado del control de emisiones en comparación con los automóviles de pasajeros de Bogotá, debido probablemente al mayor kilometraje relativo entre los taxis.

Los procedimientos mejorados de inspección y mantenimiento pueden ayudar a mitigar los efectos del deterioro acelerado del sistema de control de emisiones en toda la flota. Actualmente, las pruebas periódicas solo incluyen límites de CO y HC; la adición de un límite de NO_x , como en México, podría ayudar a reducir las emisiones en condiciones reales de los taxis.

Además, los programas pueden incentivar a los propietarios de taxis en Bogotá a reemplazar las unidades más antiguas por modelos más nuevos. Esto podría lograrse a través de un programa de reembolsos que incentive a los propietarios del 25% de los taxis más antiguos (es decir, taxis que tienen 13 años o más) a dar de baja su viejo vehículo y recibir un descuento en la compra de un vehículo con emisiones más bajas o cero emisiones (que cumplan con las normas Euro 4 o superiores), similar al programa de la Ciudad de México.⁸⁷ Además, Bogotá podría introducir requisitos de la norma Euro 5 y 6 para los taxis recién matriculados antes que para otros vehículos ligeros a gasolina. Los responsables de las políticas podrían establecer una edad máxima de funcionamiento para todos los taxis no eléctricos para ayudar a limitar el efecto del deterioro de las emisiones, similar a los programas de Delhi y Londres.⁸⁸ Una edad operativa máxima de 13 años para 2030, por ejemplo, ayudaría a garantizar la eliminación gradual de los taxis con certificación Euro 1 y pre-Euro de la flota de Bogotá.

Si bien Bogotá ha logrado reducir las emisiones de los vehículos a lo largo del tiempo, este informe ilustra que el progreso continuo requiere una intervención política específica. La adopción de las recomendaciones basadas en evidencia presentadas en este informe podría apoyar una mayor reducción de emisiones y una mejor calidad del aire en la ciudad.

87 Meyer et al., *Passenger Vehicle and Taxi Emissions in Mexico City*.

88 Government of NCT of Delhi Transport Department, "Validity of Contract Carriage (Delhi NCR) Taxies Permit Up to 15 Years", 20 de junio de 2023, https://transport.delhi.gov.in/sites/default/files/Transport/circulars-orders/government_of_national_capital_territory_of_delhi.pdf; Transport for London, "Taxi Age Limits and Exemptions - Additional Information", consultado el 24 de octubre de 2025, <https://content.tfl.gov.uk/taxi-age-limits-additional-information.pdf>.

APÉNDICE

Tabla A1. Clase de vehículo en español a partir de los datos de especificación del vehículo y categorización de clase de vehículo en inglés correspondiente en este informe

Clases de vehículos en el informe	Clases de vehículos en español	Ejemplos
Bus	Bus	Autobús monocasco, autobús articulado, autobús biarticulado
Heavy-duty vehicle	Camión, volqueta	Camión de carga, camión volquete
Light truck	Camioneta	SUV, furgoneta de carga, camioneta comercial ligera
Motorcycle	Motocarro, motocicleta	Motocicletas, scooters
Passenger car, taxi	Automóvil, campero	Sedán, hatchback, SUV
Microbus	Microbús	Furgoneta de pasajeros ^a

^a Los modelos más comunes incluían Hyundai H1, Kia Pregio GS, Nissan Urvan y Volkswagen Transporter T5

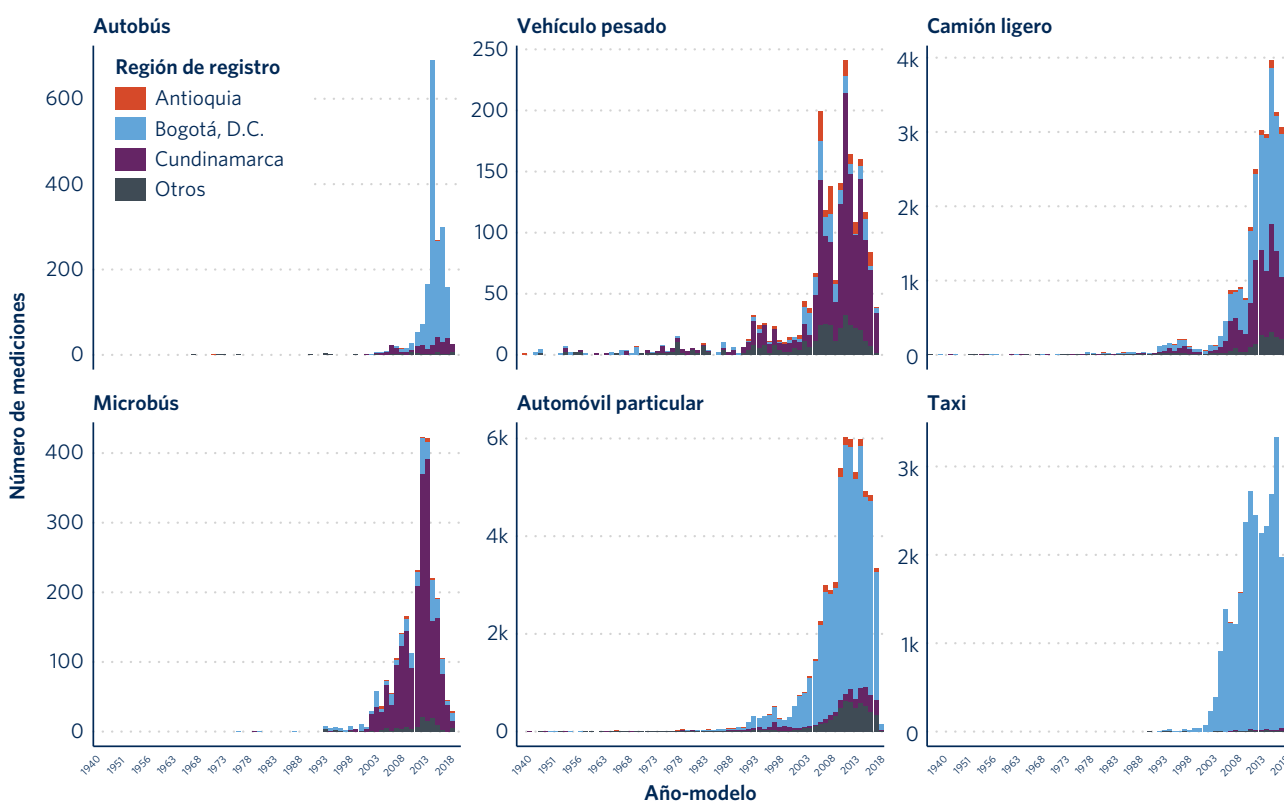
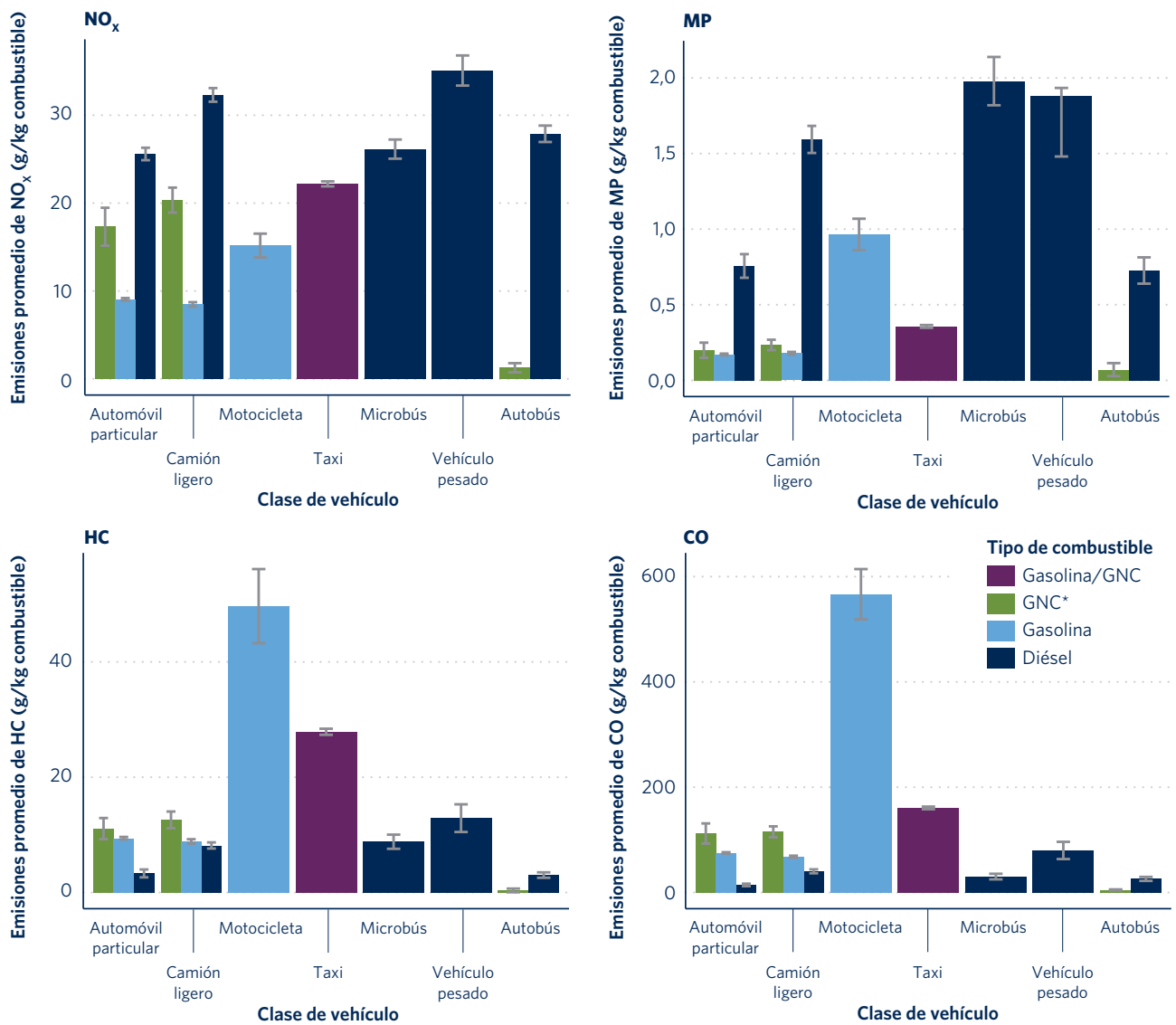


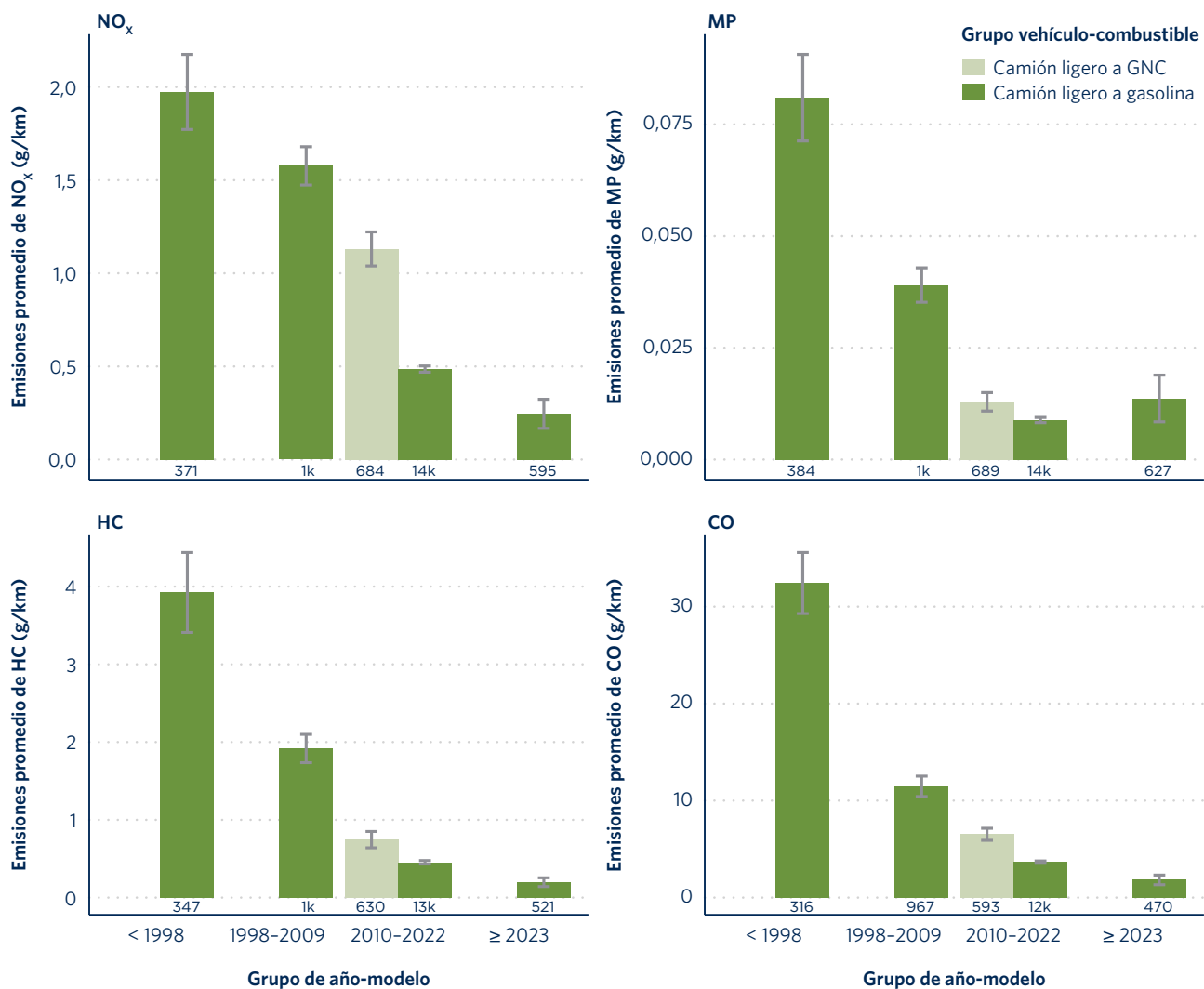
Figura A1. Mediciones por regiones de registro de vehículos entre clases de vehículos con datos de registro



Nota: Las barras de error representan un intervalo de confianza del 95%.

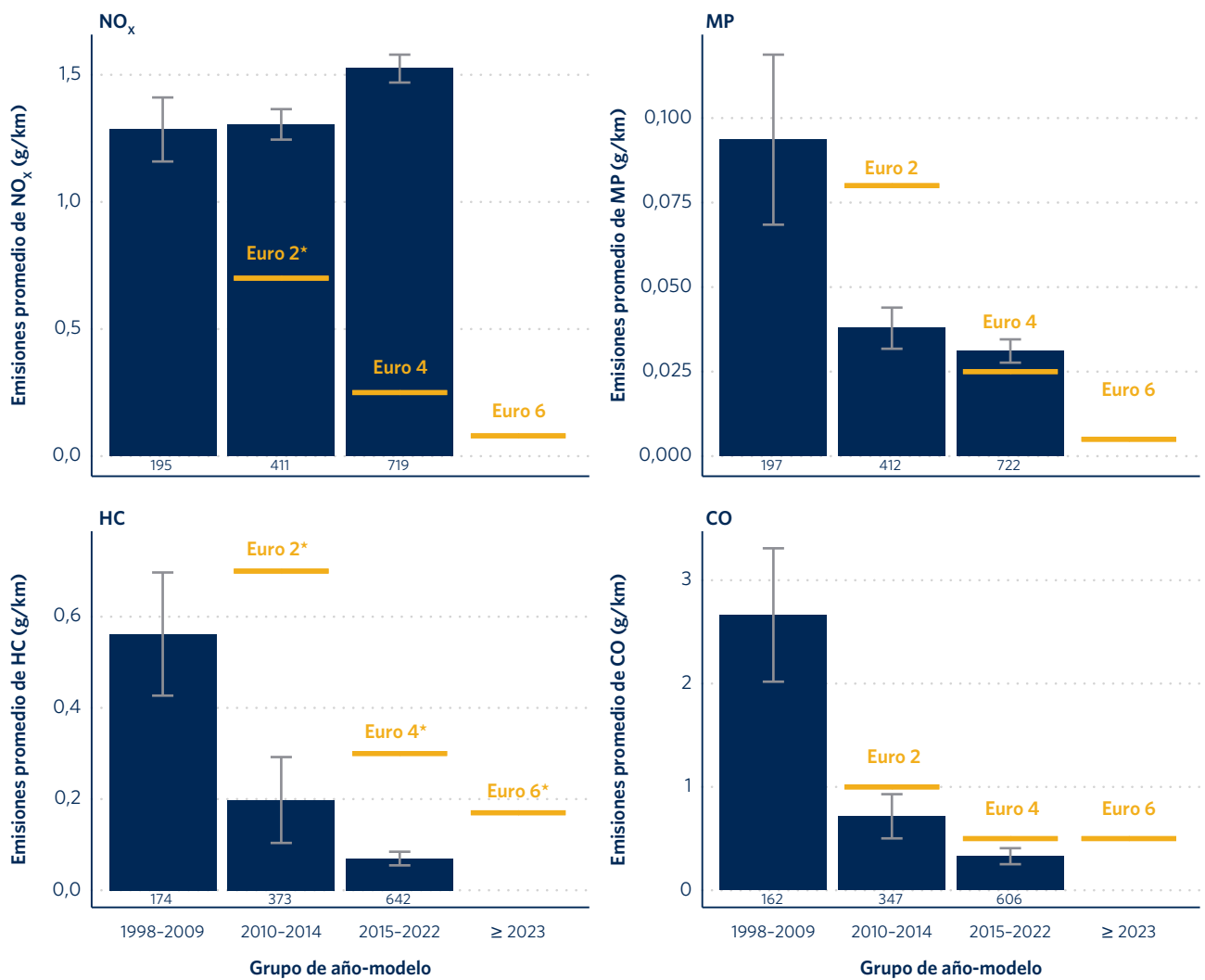
* Los automóviles de pasajeros a GNC probablemente sean, en su mayoría, vehículos bicomcombustible (GNC/gasolina) convertidos para operar con gas natural vehicular.

Figura A2. Emisiones promedio reales de NO_x, MP, HC y CO específicas del combustible por clase de vehículo y tipo de combustible



Nota: Las barras de error representan un intervalo de confianza del 95%. Los números debajo de las barras indican el número de mediciones.

Figura A3. Emisiones de NO_x, MP, HC y CO entre camionetas propulsadas por GNC y gasolina a lo largo del tiempo



Nota: Las barras de error representan un intervalo de confianza del 95%. Los números debajo de las barras indican el número de mediciones. Los límites Euro se muestran solo como referencia. No se dispuso de mediciones suficientes para unidades del año-modelo 2023 para analizar la norma Euro 6, pero el límite se incluye como referencia.

Figura A4. Emisiones específicas de distancia de NO_x, MP, HC y CO entre automóviles de pasajeros diésel a lo largo del tiempo

