



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS POR EL TRANSPORTE TERRESTRE POR CARRETERA EN COLOMBIA

Julieth Viviana Alfonso Avila

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2023

EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS POR EL TRANSPORTE TERRESTRE POR CARRETERA EN COLOMBIA

Julieth Viviana Alfonso Avila

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería - Transporte

Director (a):

Ph.D. Sonia Cecilia Mangones Matos

Codirector (a):

Ph.D. Néstor Yezid Rojas Roa

Línea de Investigación:

Planeación de la movilidad

Grupo de investigación:

Grupo de investigación en logística para el transporte sostenible y la seguridad - TRANSLOGYT

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola

Bogotá, Colombia

2023

“La utopía está en el horizonte. Camino dos pasos,
ella se aleja dos pasos y el horizonte
se corre diez pasos más allá.
Entonces, ¿para qué sirve la utopía?
Para eso, sirve para caminar”.

Eduardo Galeano

Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Julieth Alfonso

Julieth Viviana Alfonso Avila

Fecha 30/01/2023

Agradecimientos

A mi padre, mi gran consejero y cómplice de vida quien me motivó a continuar con mi formación académica, aunque un siniestro vial te haya arrebatado la vida durante el desarrollo de mi maestría y ahora no estés presencialmente conmigo el recuerdo de tu esencia es mi fuerza para continuar.

A mi madre, hermanos, pareja y amigos por su apoyo moral incondicional. Sin sus consejos precisos, palabras sensatas y espacios de esparcimiento el desarrollo de mi formación posgradual no hubiese sido exitoso. Gracias por ser luz y esperanza.

A la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, por abrirme las puertas a la formación posgradual y permitir enriquecer mi formación profesional. Con mucho orgullo, con este título soy una profesional en ingeniería con formación a nivel de pregrado y posgrado en la educación pública del país.

A la directora Sonia Mangones, por su pertinente orientación y persistencia, con su dirección y apoyo continuo la curva de aprendizaje se mantuvo constante durante el desarrollo de esta tesis, lo cual se ve reflejado en el presente documento.

Al codirector Néstor Rojas por las acertadas orientaciones técnicas impartidas desde su robusta experiencia profesional y académica en emisiones atmosféricas por fuentes móviles.

A Mauricio Osses por invitarme y acogerme en la Universidad Técnica Federico Santa María en Santiago de Chile para el desarrollo de la pasantía en investigación, además por guiarme en el mundo de la sostenibilidad energética.

A Dayron Bermúdez, Aquiles Darghan y Carlos Rivera por su apoyo constante en el proyecto “Herramienta para la gestión de la calidad del aire: Estimación y desagregación espacio temporal del inventario nacional de emisiones por fuentes de móviles en Colombia”, financiado a través de la Convocatoria para el Apoyo a Proyectos de Investigación, Creación Artística e Innovación de la Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia – 2020, dentro del cual se enmarca el desarrollo de esta tesis.

A la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), al Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) por brindar la información necesaria para desarrollar a cabalidad los objetivos de esta investigación.

¡GRACIAS TOTALES!

VIII Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

Resumen

Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

El propósito de esta investigación es desarrollar una aproximación conceptual y aplicada para cuantificar y proyectar emisiones de contaminantes atmosféricos generadas por el transporte terrestre por carretera en Colombia. Se construye una ruta metodológica que permite la estimación de emisiones a partir de los kilómetros recorridos anualmente por los vehículos (portales web de ventas vehiculares y revisiones técnico-mecánicas), los factores de emisión de *Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport* (COPERT) y la cantidad de vehículos activos por departamento. La aproximación metodológica para la proyección de emisiones se apoya en el crecimiento del parque automotor según las dinámicas demográficas y económicas del país; se considera constante la actividad y los factores de emisión (valores del año base). El enfoque metodológico se aplicó para la construcción del inventario de emisiones nacionales por el transporte terrestre por carretera del año base 2019 y para su proyección en el período 2020-2050.

Se obtiene que los vehículos de carga son la tipología vehicular que más aporta a las emisiones nacionales de contaminantes atmosféricos, representado más del 53% de las emisiones de BC y NO₂, y alrededor del 49% de las emisiones de PM_{2.5}. Las motocicletas, que representan alrededor del 58% del parque automotor registrado, es la tipología vehicular que más contribuye a las emisiones de CO. El automóvil contribuye con un 55% y 33% a las emisiones de SO₂ y CO₂ respectivamente. En cuanto a las proyecciones, las emisiones de CO₂ y SO₂ aumentarán, mientras que las emisiones de BC, CO, NO₂ y PM_{2.5} tienden a disminuir.

Esta ruta metodológica para estimación y proyección de emisiones se convierte en una herramienta que apoya a los tomadores de decisiones con un método confiable para regular y controlar los niveles de emisiones del transporte terrestre por carretera, fortaleciendo así la evaluación de la calidad del aire.

Palabras clave: Transporte terrestre por carretera, calidad del aire, aproximación conceptual, proyecciones.

Abstract

Emissions of air pollutants from road transport in Colombia

This investigation aims to develop a conceptual and practical approach for quantifying and projecting atmospheric pollutant emissions released by road transport in Colombia. A methodology is developed that enables the estimation of emissions based on the annual mileage traveled by vehicles (technical-mechanical reviews and vehicle sales websites), the Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport (COPERT) emission factors, and the number of active vehicles per department. The methodological approach to estimating emissions relies on the growth of the automobile fleet according to the country's demographic and economic dynamics; activity and emission factors will be constant (values of the base year). The methodological approach was used to build the national emissions inventory for road transportation for the base year 2019 and project those emissions for 2020–2050.

Cargo vehicles are shown to contribute the most to national emissions of air pollutants, accounting for more than 53% of emissions of BC and NO₂, and almost 49% of emissions of PM_{2.5}. The type of vehicle that contributes most to CO emissions is the motorcycle, which represents around 58% of the registered motor fleet. The automobile's contribution to SO₂ and CO₂ emissions is 55% and 33%, respectively. According to projections, CO₂ and SO₂ emissions will rise, while BC, CO, NO₂, and PM_{2.5} emissions are expected to decline.

This methodology for estimating and forecasting emissions becomes a tool that supports stakeholders by providing a reliable method for regulating and controlling the emissions levels from road-based transportation, strengthening the assessment of air quality.

Keywords: Road transport, air quality, conceptual approach, projections.

Contenido

	Pág.
Resumen	IX
Abstract	X
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XVII
Lista de símbolos y abreviaturas	1
Introducción	21
1. Marco de referencia de emisiones por fuentes móviles	25
1.1 Perspectiva de la calidad del aire en Colombia	26
1.1.1 Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en Colombia.....	26
1.1.2 Contaminantes criterio en Colombia	30
1.2 Sistema de transporte terrestre por carretera en Colombia.....	33
1.2.1 Infraestructura vial	33
1.2.2 Generalidades del parque automotor	35
1.2.3 Tasa de motorización	37
1.2.4 Combustible	39
1.3 Gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos generados por el transporte terrestre por carretera	43
1.3.1 Monóxido de carbono (CO).....	44
1.3.2 Dióxido de nitrógeno (NO ₂).....	44
1.3.3 Material particulado fino (PM _{2.5}).....	45
1.3.4 Dióxido de azufre (SO ₂).....	45
1.3.5 Carbono negro (BC).....	46
1.3.6 Dióxido de carbono (CO ₂)	46
1.4 Aproximaciones metodológicas para la construcción de inventarios de emisiones por fuentes móviles.....	46
1.4.1 Metodología meso para el cálculo emisiones de contaminantes atmosféricos	49
1.4.2 Modelos para la estimación de factores de emisión por fuentes móviles	50
1.4.3 Inventarios de emisiones por fuentes móviles en Colombia.....	52
1.5 Proyección de inventarios de emisiones	57
1.5.1 ¿Cómo estructurar los escenarios de proyección?	60
1.5.2 ¿Cuáles son las particularidades de proyección de emisiones para el transporte terrestre por carretera?	61
2. Emisiones del transporte terrestre por carretera en Colombia año base 2019	65
2.1 Factores de actividad.....	67

XII Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

2.1.1 Variables de clusterización	67
2.1.2 Clusterización de departamentos	71
2.1.3 Aproximación a la actividad anual	73
2.2 Factores de emisión.....	77
2.2.1 Composición del parque automotor según COPERT	79
2.2.2 Características del transporte	84
2.2.3 Condiciones ambientales	88
2.2.4 Propiedades de los combustibles	88
2.2.5 Consideraciones adicionales	89
2.2.6 Factores de emisión COPERT aproximados para Colombia.....	90
2.3 Características de la flota vehicular en Colombia.....	91
2.3.1 Vehículos registrados.....	91
2.3.2 Aproximación a vehículos activos.....	104
2.4 Cuantificación de emisiones por el transporte terrestre por carretera.....	109
2.4.1 Emisiones nacionales	109
2.4.2 Emisiones departamentales.....	112
2.4.3 Contexto emisiones nacionales con resultados de otros inventarios nacionales e internacionales	115
3. Proyección de emisiones por el transporte terrestre por carretera en Colombia.....	119
3.1 Definiciones previas.....	119
3.1.1 Período de proyección.....	120
3.1.2 Metas de reducción	121
3.1.3 Consideraciones adicionales	122
3.2 Crecimiento parque automotor	124
3.2.1 Tendencial.....	125
3.2.2 Movilidad sostenible.....	126
3.3 Línea base de emisiones – Escenario BAU	129
3.4 Escenarios de reducción.....	129
3.4.1 Escenario A: Apuesta por reducción de vehículos	130
3.4.2 Escenario B: Apuesta por tecnologías limpias.....	131
3.4.3 Escenario C: Gran apuesta	133
3.5 Análisis de la proyección de emisiones	133
3.5.1 Meta de carbono negro.....	134
3.5.2 Meta de GEI.....	135
4. Conclusiones y recomendaciones.....	139
4.1 Marco de referencia.....	139
4.2 Emisiones año base 2019.....	141
4.3 Proyección de emisiones.....	143
4.4 Recomendaciones	145

4.5 Futuras investigaciones	146
5. Bibliografía	149
A. Anexo: Variables clusterización departamentos.....	159
B. Anexo: Homologación de red vial OpenStreetMap	161
C. Anexo: Insumos COPERT	163
D. Anexo: Factores de emisión COPERT aproximados para Colombia	181
E. Anexo: Emisiones per cápita y por vehículo por departamento	189
F. Anexo: Ascenso tecnológico vehicular a 2050	195

XIV Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1. Distribución de emisiones GEI en Colombia 2012.....	27
Figura 1-2. Emisiones GEI del sector transporte (CO _{2-eq}).....	30
Figura 1-3. Concentración de contaminantes criterio en América Latina (µg/metro cúbico)	31
Figura 1-4. Composición red vial nacional.....	33
Figura 1-5. Red primaria, secundaria y complementaria nacional	34
Figura 1-6. Combustible utilizado por parque automotor registrado en el RUNT	36
Figura 1-7. Tendencia uso de combustible en Colombia.....	37
Figura 1-8. Tasa de motorización a nivel mundial 2015 (veh/1,000 hab)	38
Figura 1-9. Evolución tasa de motorización en América Latina y el Caribe	39
Figura 1-10. Línea de tiempo de estándares Euro y calidad del combustible en Colombia	41
Figura 1-11. Contaminantes criterio y GEI por fuentes móviles considerados	44
Figura 1-12. Proceso de construcción de inventario de emisiones por fuentes móviles.....	48
Figura 1-13. Tipos de emisiones vehiculares.....	51
Figura 1-14. Criterios de los resultados de las proyecciones de inventarios de emisiones	58
Figura 1-15. Estructura metodológica para la proyección de emisiones	61
Figura 2-1. Estructura metodológica para la estimación de las emisiones generadas por el transporte terrestre por carretera	66
Figura 2-2. Red vial urbana e interurbana de Colombia.....	69
Figura 2-3. Actividad anual de motocicletas, automóviles y taxis por clúster (km/año-veh)	75
Figura 2-4. Actividad anual de buses, camiones, tractocamiones y volquetas por clúster (km/año- veh)	76
Figura 2-5. Insumos del modelo COPERT – Factores de emisión.....	78
Figura 2-6. Distribución de tecnología EURO por tipo de vehículo y combustible en Colombia (vehículos).....	81
Figura 2-7. Procedimiento de consulta de las velocidades Big-Data de Google	86
Figura 2-8. Estructura base de datos vehículos registrados	93
Figura 2-9. Vehículos registrados por departamento (vehículos).....	94
Figura 2-10. Parque automotor en Colombia al 2019 - Clase de vehículo (vehículos)	95
Figura 2-11. Evolución de registros vehiculares por clase vehicular (vehículos)	98
Figura 2-12. Clase y modelo del parque automotor en Colombia	99
Figura 2-13. Diagramas de densidad del modelo por clase del vehículo.....	100
Figura 2-14. Parque automotor Colombia - Tipo de combustible (vehículos)	102
Figura 2-15. Distribución del combustible del parque automotor colombiano (vehículos)	103
Figura 2-16. Factores de obsolescencia por categoría vehicular	105
Figura 2-17. Estructura metodológica del balance energético del transporte terrestre por carretera	106

XVI Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

Figura 2-18. Conciliación consumo y ventas de gasolina y diésel por el transporte terrestre por carretera a nivel nacional para el 2019 (galones).....	107
Figura 2-19. Distribución de las emisiones por categoría vehicular para cada contaminante	110
Figura 2-20. Emisiones por tipo de combustible para cada contaminante (ton/año).....	112
Figura 2-21 Emisiones nacionales del transporte terrestre por carretera IDEAM e inventario año base 2019 (ton/año).....	116
Figura 3-1. Metas nacionales de reducción de emisiones.....	121
Figura 3-2. Emisiones de GEI del transporte terrestre por carretera 2000-2018 (ton/año)	124
Figura 3-3. Franja de crecimiento tendencial del parque automotor	126
Figura 3-4. Crecimiento del parque automotor - movilidad sostenible	128
Figura 3-5. Comparación de emisiones entre línea base y escenarios. Año 2050	134
Figura 3-6. Cumplimiento de meta de reducción de carbono negro (ton/año)	135
Figura 3-7. Cumplimiento de metas de reducción de GEI (ton/año).....	136

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Emisiones GEI 2012 por departamento (CO ₂ -eq).....	28
Tabla 1-2. Umbrales de concentración de contaminantes criterio OMS y Colombia	30
Tabla 1-3. Emisiones de contaminantes criterio - Colombia 2014.....	32
Tabla 1-4. Estado red vial nacional - INVIAS 2020.....	35
Tabla 1-5. Estándar EURO de emisiones (g/km).....	40
Tabla 1-6. Modelos para el cálculo de factores de emisión por fuentes móviles	53
Tabla 2-1. Red vial interurbana y urbana por departamento (kilómetros).....	70
Tabla 2-2. Indicadores de silueta para diferentes números de categorías.....	72
Tabla 2-3. Características de los clústeres departamentales	72
Tabla 2-4. Valores de actividad de referencia (km/año-veh).....	74
Tabla 2-5. Homologación de las tecnologías vehiculares en Colombia	80
Tabla 2-6. Relación de peso bruto vehicular y cilindraje para los vehículos de carga	82
Tabla 2-7. Reglas para la asignación de categoría y segmento.....	83
Tabla 2-8. Duración y longitud de un viaje típico	87
Tabla 2-9. Propiedades de los combustibles	89
Tabla 2-10. Resumen limpieza base de datos RUNT	92
Tabla 2-11. Distribución vehicular por clases en los departamentos (vehículos).....	97
Tabla 2-12. Edad promedio del parque automotor en Colombia 2019.....	101
Tabla 2-13. Distribución del combustible por clase vehicular (vehículos)	102
Tabla 2-14. Rendimientos de combustible (km/gal).....	107
Tabla 2-15. Emisiones nacionales por el transporte terrestre por carretera - Año base 2019.....	109
Tabla 2-16. Emisiones por departamento – Año 2019 (ton/año).....	113
Tabla 2-17. Departamentos con mayores emisiones por contaminante.....	114
Tabla 2-18. Emisiones atmosféricas per cápita por el transporte terrestre por carretera en varias regiones de Latinoamérica (kg/año-habitante).....	117
Tabla 3-1. Modelos de crecimiento tendencial del parque automotor.....	125
Tabla 3-2. Emisiones período 2020-2050. Línea base (BAU) (ton/año).....	129
Tabla 3-3. Escenarios futuros del transporte terrestre por carretera	130
Tabla 3-4. Emisiones período 2020-2050. Escenario A (ton/año).....	131
Tabla 3-5. Distribución tecnológica a 2050. Escenario B	132
Tabla 3-6. Emisiones período 2020-2050. Escenario B (ton/año).....	132
Tabla 3-7. Distribución tecnológica a 2050. Escenario C	133
Tabla 3-8. Emisiones período 2020-2050. Escenario C (ton/año).....	133

XVIII Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos

SÍMBOLO	TÉRMINO	UNIDAD SI	DEFINICIÓN
E	Emisión total	Tonelada	1.4
FA	Factor de actividad	km/año	1.4
FE	Factor de emisión	g/km	1.4
N	Cantidad de vehículos	Unidad	1.4

Abreviaturas

ABREVIATURA	TÉRMINO
ANI	Agencia Nacional de Infraestructura
BAU	Business As Usual
BC	Black Carbon – Carbono Negro
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CCAC	Coalición del Clima y Aire Limpio
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
EEA	Agencia Europea de Medio Ambiente
EMEP	Programa europeo de seguimiento y evaluación
EPA	Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos
GEI	Gases efecto invernadero
GLP	Gas licuado del petróleo
HC	Hidrocarburos
HFC	Hidrofluorocarbonos
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
INVIAS	Instituto Nacional de Vías
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático
MADS	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible
MME	Ministerio de Minas y Energía
MTon	Megatonelada (1000000 Toneladas)
NDC	Nationally Determined Contributions - Contribuciones determinadas a nivel nacional
N ₂ O	Óxido nitroso
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
NO _x	Óxidos de nitrógeno
O ₃	Ozono
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
OMS	Organización Mundial de la Salud
OSM	OpenStreetMap

2 Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

ABREVIATURA	TÉRMINO
Pb	Plomo
PFC	Perfluocarbono
PM	Material particulado
PM ₁₀	Materia particulada con diámetro aerodinámico inferior a 10 micras
PM _{2.5}	Materia particulada con diámetro aerodinámico inferior a 2.5 micras
Ppm	Partes por millón
RUNT	Registro Único Nacional de Tránsito
SF ₆	Hexafluoruro de azufre
SLoCat	Partnership of Sustainable, Low Carbon Transport
SO ₂	Dióxido de azufre
THC	Hidrocarburos totales
UPME	Unidad de Planeación Minero-Energética

Introducción

Diversos factores inciden en la calidad de vida de la sociedad, dentro de los que se destaca la contaminación atmosférica. El panorama es crítico, pues la Organización Mundial de la Salud (2005) estima que el 92% de la población reside en zonas donde la calidad del aire sobrepasa los límites permisibles; particularmente en Colombia el 7% de la mortalidad anual se relaciona con la calidad deficiente del aire (ONS, 2019). La baja calidad del aire tiene consecuencias negativas en la sostenibilidad de las comunidades, la conservación del medio ambiente, la calidad de vida de los habitantes de un área geográfica y principalmente en la salud pública.

Los inventarios de emisiones permiten estimar la cantidad de emisiones de contaminantes atmosféricos, lo cual es relevante en la construcción y seguimiento de la política pública de reducción de emisiones. Los inventarios permiten cuantificar la contribución de los diferentes contaminantes provenientes de diversas fuentes a la contaminación atmosférica de una región específica, e informar a la comunidad en general al respecto. Adicionalmente, los inventarios pueden proyectarse en el tiempo para establecer los niveles de emisión de contaminantes en un período horizonte para diferentes escenarios, con lo que se apoya la instauración de políticas públicas en pro de la reducción de emisiones y la mitigación de efectos asociados.

La estimación de emisiones de contaminantes por el transporte terrestre por carretera se establece como el producto de factores de emisión con factores de actividad. Típicamente, los factores de emisión se asocian al vehículo en función del combustible, tipología y características del motor. Los factores de actividad se construyen con particularidades asociadas a la fuente de emisión. En fuentes móviles, se refiere a aspectos de velocidad, patrones de conducción, entre otros.

En Colombia se han desarrollado ejercicios locales de estructuración de inventarios de emisiones por fuentes móviles en Bogotá, Manizales, Medellín, Cartagena y otros. A nivel nacional, el IDEAM (2020) construyó el primer inventario nacional de emisiones de contaminantes criterio y carbono negro para el período 2010-2014 que incluye emisiones generadas por diferentes subsistemas de transporte. Adicionalmente, Méndez (2022) en su tesis de Maestría construyó un inventario de emisiones por el transporte terrestre en Colombia para el año base 2017.

La estimación de emisiones atmosféricas requiere información de la intensidad de la actividad de la fuente generadora de contaminantes. En el caso de fuentes móviles se enfoca al conocimiento de la operación de los sistemas de transporte a través de volúmenes de tránsito promedio diarios (TPD), características de la infraestructura vial, kilómetros recorridos anualmente por un vehículo, características del parque automotor, entre otros. De ahí la necesidad de explorar información oficial del transporte terrestre por carretera en el país, que permita refinar los factores de actividad y, en consecuencia, la estimación de emisiones.

En este sentido, esta investigación pretende ser una contribución al fortalecimiento de los sistemas de información para la gestión de la calidad del aire al constituirse en una herramienta que aporte en la consolidación y evaluación de políticas públicas de reducción de emisiones en Colombia. En Colombia aún no se han desarrollado proyecciones de emisiones de GEI y contaminantes criterio, las cuales podrían sustentar la promulgación de políticas públicas para la reducción de la contaminación atmosférica, por lo que en esta investigación se realizará la primera aproximación para proyectar las emisiones en Colombia a 2050.

Esta tesis se fundamenta en las siguientes preguntas de investigación ¿Cómo estimar las emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero por el transporte terrestre por carretera, a partir de la exploración de datos de transporte? y ¿Cómo cambiarán las emisiones generadas por el transporte terrestre por carretera en Colombia en un período de 20 años? De ahí que el objetivo principal de esta investigación es desarrollar una aproximación conceptual y aplicada para cuantificar y proyectar las emisiones de contaminantes atmosféricos generadas por el transporte terrestre por carretera en Colombia, a partir de la exploración de datos de transporte, lo cual se logró con la consecución de los siguientes objetivos específicos:

- Elaborar un marco de referencia de la calidad del aire y del sistema de transporte en Colombia, así como de las aproximaciones metodológicas para la cuantificación y proyección de emisiones por el transporte terrestre por carretera.
- Cuantificar las emisiones de contaminantes criterio, gases de efecto invernadero y carbono negro generadas por el transporte terrestre por carretera en Colombia para el año base 2019.

- Proyectar las emisiones de contaminantes criterio, gases de efecto invernadero y carbono negro producidas por el transporte terrestre por carretera en Colombia para un período de 20 años.

A partir de lo anterior, esta investigación se enfoca en la estimación de emisiones atmosféricas ocasionadas por el transporte terrestre por carretera en Colombia para el año base 2019 y la proyección de emisiones para el período 2020-2050, incluyendo el carbono negro, los contaminantes criterio CO, NO₂, PM_{2.5}, SO₂ y el CO₂ como gas de efecto invernadero tipo.

El documento se estructura en cuatro capítulos. En el primer capítulo se desarrolla un marco de referencia de las emisiones por el transporte terrestre por carretera considerando elementos como la calidad del aire, las características del sistema de transporte terrestre por carretera, los tipos de contaminantes generados por esta fuente, las aproximaciones metodológicas para la construcción de inventarios de emisiones por fuentes móviles en Colombia y los elementos implícitos en la proyección de inventarios de emisiones.

El segundo capítulo comprende la estimación de emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero por el transporte terrestre por carretera en Colombia para el año base 2019. Para efectuar esto, los insumos de la estimación fueron: i) Factor de actividad del transporte terrestre a partir de los kilómetros recorridos anualmente por las diferentes tipologías vehiculares; ii) Factores de emisión a partir del uso del software *Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport v.5.5.1. (COPERT)*; iii) Tamaño del parque automotor y distribución tecnológica considerando como punto de partida los registros del RUNT y realizando una aproximación a los vehículos activos. Así, los resultados se presentan en tablas, gráficas y mapas temáticos como una radiografía de las emisiones nacionales por el transporte terrestre por carretera.

El tercer capítulo se orienta a la proyección de emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero por el transporte terrestre por carretera en Colombia para el período 2020-2050. De esta manera, se presentan las definiciones previas, entre otras cosas se exponen los métodos utilizados para la proyección del parque automotor, luego se relacionan las emisiones del escenario de línea base o *Business As Usual (BAU)*, posteriormente se describen los supuestos considerados en cada escenario. Por último, se muestra un análisis de las emisiones estimadas en los diferentes escenarios.

Finalmente, en el capítulo de conclusiones y recomendaciones se realiza un análisis de los resultados y hallazgos de la tesis, adicionalmente se presentan recomendaciones para el desarrollo de investigaciones futuras. La estimación de emisiones por fuentes móviles presentada en el documento permite concluir que para el 2019 las emisiones del transporte terrestre por carretera han disminuido respecto al diagnóstico realizado por el IDEAM (2020) para el 2014 en todos los contaminantes evaluados, a excepción del CO, lo cual podría estar explicado por la propagación de las motocicletas en el país. En cuanto a las proyecciones, la mayoría de las emisiones tienden a disminuir por el ascenso tecnológico vehicular en el estándar EURO, a excepción del CO₂ y SO₂. Para cumplir los compromisos de reducción de emisiones pactados en las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC por sus siglas en inglés) se requiere una gran apuesta por el ascenso tecnológico acelerado hacia tecnologías limpias.

1. Marco de referencia de emisiones por fuentes móviles

Parte de las externalidades medio ambientales asociadas al transporte se pueden representar mediante los inventarios de emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero (GEI) por fuentes móviles. En estos se estima la cantidad de emisiones de contaminantes para un año base, distribuidas por diferentes características como modo de transporte, región geográfica, categoría vehicular o tipo de combustible. Dicha cuantificación se realiza con la exploración de datos de composición tecnológica del parque automotor, su actividad o condiciones de tránsito a través de los kilómetros recorridos anualmente y las características de la red vial de una zona geográfica en particular.

Los inventarios de emisiones por fuentes móviles tienen diferentes aplicaciones. La cuantificación de contaminantes constituye una herramienta para la gestión de la calidad del aire, puesto que permite el seguimiento y control a la implementación de políticas públicas del transporte. De otra parte, los inventarios se pueden proyectar en el tiempo, permitiendo la comparación de concentración de contaminantes en diferentes escenarios de tiempo para un mismo espacio geográfico, lo cual se constituye en un insumo para la formulación de políticas públicas de reducción de emisiones y mitigación de impactos asociados.

En el caso colombiano es fundamental cuantificar las emisiones de GEI y contaminantes criterio originadas por la operación del transporte terrestre carretero a nivel nacional debido al gran impacto que tiene este modo. Particularmente, para el 2019, el 81% del transporte de carga y el 73% del transporte de pasajeros se realizó mediante el transporte terrestre por carretera (Ministerio de Transporte, 2019). Además, en América Latina, el transporte terrestre carretero es el modo predominante en la matriz logística de carga (BID, 2021). Colombia se ha comprometido con la reducción de la contaminación del aire adquiriendo compromisos internacionales, como el reporte de indicadores ambientales a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE), la reducción de emisiones de contaminantes climáticos de vida corta por la vinculación del país a la Coalición del Clima y Aire Limpio (CCAC), la reducción del 51% de emisiones de GEI para el 2030 en el marco del Acuerdo de París y a la elaboración periódica del inventario de emisiones.

El propósito de este capítulo es desarrollar un marco de referencia considerando los elementos conceptuales de la calidad del aire, el sistema de transporte y las aproximaciones metodológicas para la estimación y la proyección de emisiones por fuentes móviles en Colombia. De esta manera, se establece el soporte conceptual para realizar la cuantificación de emisiones por el transporte terrestre carretero en Colombia para el año base 2019, y su proyección en el período 2020-2050 ítems que se desarrollarán en los capítulos 2 y 3.

El capítulo 1 se estructura así: en primera instancia, se identifican las características de la calidad del aire en Colombia según la concentración de los GEI y los contaminantes criterio. Después, se abordan las particularidades del sistema de transporte terrestre por carretera en el territorio nacional considerando la infraestructura vial, parque automotor, tasa de motorización y combustible. En el tercer apartado se presentan aproximaciones metodológicas para la estimación de emisiones por fuentes móviles aplicadas en el país. Por último, se listan diversos factores a considerar en la proyección de emisiones por fuentes móviles.

1.1 Perspectiva de la calidad del aire en Colombia

Las emisiones se expresan en dos categorías asociadas al tipo de impacto: i) los gases de efecto invernadero, GEI, son gases que emiten y absorben radiación con influencia directa en el sistema climático terrestre, conocido como cambio climático, ii) los contaminantes criterio, son aquellos que por su naturaleza y fuente de emisión están presentes en todo lugar con efectos nocivos en la salud pública y el medio ambiente. De otra parte, según su composición las emisiones son gases, diferentes sustancias y compuestos gaseosos que tienen una influencia directa en la química atmosférica, o partículas, mezcla compleja de partículas líquidas y sólidas de sustancias orgánicas e inorgánicas suspendidas en el aire (IDEAM, 2019). En los siguientes apartados se presentarán las condiciones de calidad del aire en Colombia por GEI y contaminantes criterio.

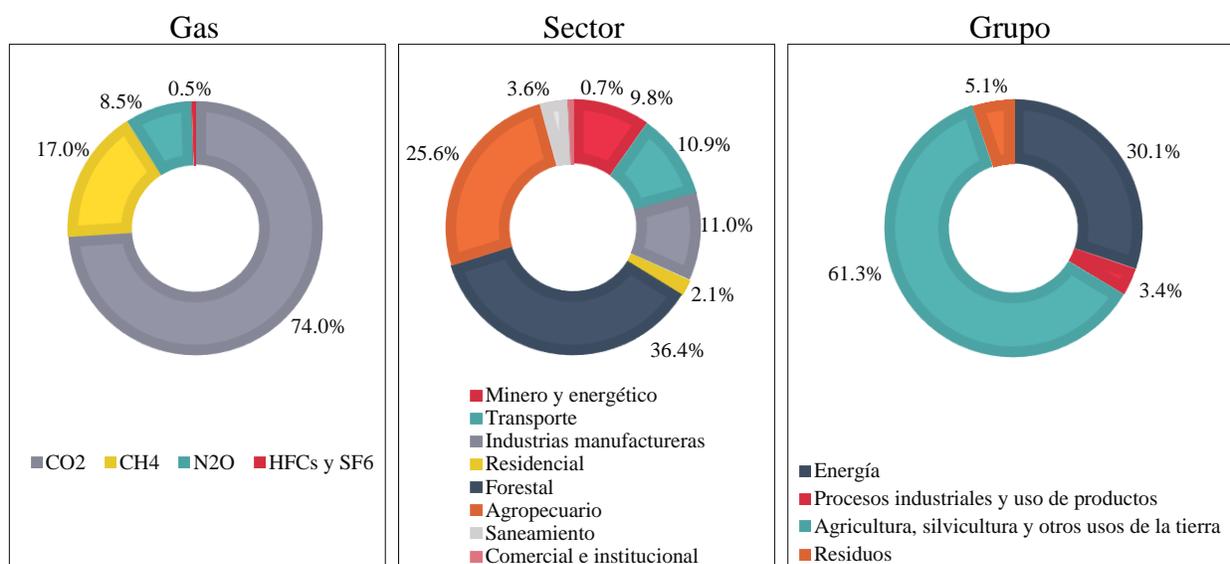
1.1.1 Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en Colombia

Las emisiones de gases efecto invernadero se reportan en unidades de masa de cada GEI. Sin embargo, para simplificar la cuantificación y evaluación de estos, típicamente las cifras se presentan en una unidad común de medida denominada CO₂ equivalente, así, cuando se reporta una cantidad de emisión de GEI en CO_{2-eq} se está representando la emisión de más de un GEI.

De las emisiones totales de GEI a nivel mundial, cinco países (China, Estados Unidos, India, Rusia, Japón) contribuyen con cerca del 50%. En el contexto de Latinoamérica y el Caribe, Colombia está en el quinto puesto de los países más generadores de GEI, representando un 0.42% de las emisiones globales, y a nivel mundial se ubica en la posición 105 dentro de los países emisores, con un registro de emisiones GEI per cápita de 4.2 toneladas CO₂-eq/habitante para el 2012 (IDEAM, 2016).

El IDEAM (2016) realizó una estimación de emisiones de GEI para el período 1990-2012, en el que se establece que, históricamente, los sectores económicos forestal, agropecuario y transporte son los que más aportan a las emisiones de estos gases en Colombia. Es así, como para el 2012 se estimó una emisión de GEI de 258.8 Mton CO₂-eq, distribuidas por GEI, sector económico y grupo IPCC, como se presenta en la Figura 1-1.

Figura 1-1. Distribución de emisiones GEI en Colombia 2012



Fuente. Elaboración propia a partir de (IDEAM, 2016)

En la Tabla 1-1 se presenta la distribución de las emisiones totales nacionales de GEI del 2012 por departamento, la intensidad de las emisiones (emisiones per cápita) y la distribución por sector económico. Los departamentos de Meta, Antioquia, Caquetá, Bogotá, Boyacá, Casanare, Cundinamarca, Guaviare, Santander y Valle del Cauca son los que más contribuyeron a la emisión nacional de GEI del 2012; mientras que las emisiones medias por habitante, intensidad emisiones, son más altas en los departamentos de Caquetá, Chocó, Guainía, Guaviare, Vaupés y Vichada. El

sector transporte está dentro de los principales generadores de GEI en la mayoría de los departamentos, particularmente en Bogotá D.C., donde es la principal fuente de emisión.

Tabla 1-1. Emisiones GEI 2012 por departamento (CO₂-eq)

DEPARTAMENTO	EMISIONES GEI TOTALES 2012 ^(a)	INTENSIDAD EMISIONES 2012 ^(b)	SECTORES ECONÓMICOS ^(c)
Amazonas	2.23	729 a 5,027	
Antioquia	22.94	65 a 291	
Arauca	4.44	729 a 5,027	
Archipiélago de San Andrés y Providencia	0.30	65 a 29	
Atlántico	7.42	292 a 468	
Bogotá D.C.	10.60	65 a 291	
Bolívar	8.05	292 a 468	
Boyacá	10.78	292 a 468	
Caldas	3.42	292 a 468	
Caquetá	19.84	5,028 a 19,157	
Casanare	10.93	729 a 5,027	
Cauca	5.74	292 a 468	
Cesar	6.60	729 a 5,027	
Chocó	4.23	5,028 a 19,157	
Córdoba	6.70	729 a 5,027	
Cundinamarca	13.27	292 a 468	
Guainía	1.33	5,028 a 19,157	
Guaviare	10.75	5,028 a 19,157	
Huila	5.64	292 a 468	
La Guajira	5.70	729 a 5,027	
Magdalena	5.75	729 a 5,027	
Meta	21.24	292 a 468	
Nariño	8.39	729 a 5,027	
Norte de Santander	6.71	729 a 5,027	
Putumayo	6.73	729 a 5,027	
Quindío	1.34	65 a 291	
Risaralda	1.84	65 a 291	
Santander	14.38	65 a 291	
Sucre	3.07	729 a 5,027	
Tolima	6.97	292 a 468	
Valle del Cauca	16.5	65 a 291	
Vaupés	1.77	5,028 a 19,157	
Vichada	2.75	5,028 a 19,157	

(a) Megatoneladas CO₂-eq

(b) Toneladas CO₂-eq / habitante

(c) Minero y energético

Forestal

Industrias manufactureras

Transporte

Agropecuario

Comercio e institucional

Residencial

Saneamiento

Otros

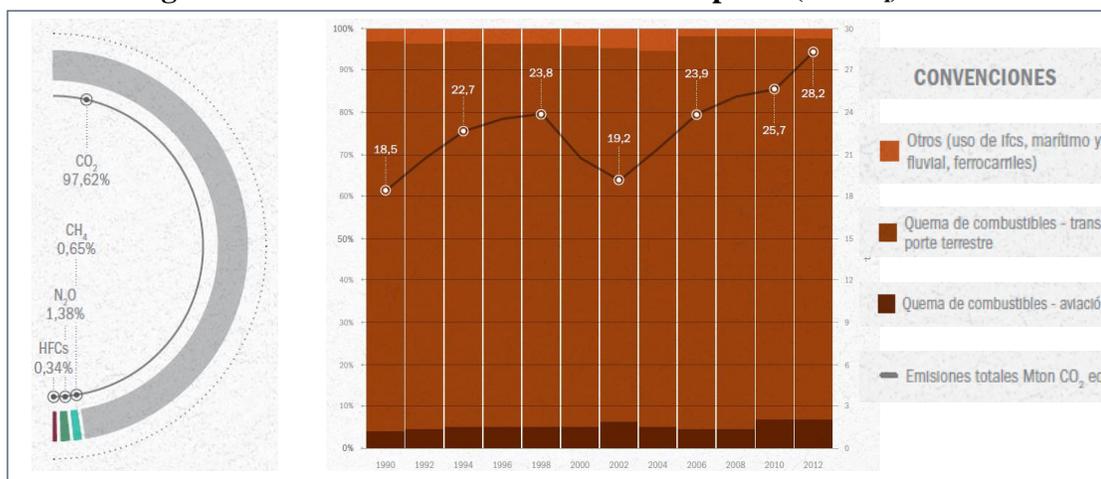
Fuente. Elaboración propia a partir de (IDEAM, 2016)

En el 2014, el transporte ocasionó el 14% de las emisiones globales de GEI. Particularmente en América Latina, las emisiones per cápita de GEI ocasionadas por el transporte han tenido un aumento considerable, debido a la alta población urbana que impulsa el crecimiento de la motorización. Así, en el período 2000-2016 se dio un crecimiento promedio de 23% en las emisiones de CO₂ (SLoCat, 2019). Por lo anterior, se establece que América Latina y el Caribe es la región que más contribuye a las emisiones mundiales de GEI del sector transporte, representando un 37% de éstas (Isla et al., 2019).

En Colombia se estableció que los GEI asociados a la actividad del transporte son de dos tipos, aquellos generados por la quema de combustible en el transporte terrestre y aéreo (CO₂, CH₄, N₂O), y los producidos por el uso de hidrofluorocarbonos en la refrigeración móvil (HFCS). El transporte terrestre supone un papel preponderante en las emisiones por fuentes móviles, la quema de combustibles del transporte terrestre representa el 91% de las emisiones GEI del sector transporte, y cerca del 10% de las emisiones totales del país, esto se debe principalmente al consumo de combustibles de mediana calidad por vehículos de bajas especificaciones tecnológicas, además de la elevada edad promedio del parque automotor (IDEAM, 2016).

El transporte es el sector con mayor consumo de energía y mayor cantidad de emisiones de CO₂ en Colombia (MME & UPME, 2016). En la Figura 1-2 se presentan las emisiones de GEI por el sector transporte para el 2012, en la que se identifican al CO₂ y N₂O como los principales contaminantes, y la quema de combustibles por el transporte terrestre como la acción más contaminante de este sector. Es importante aclarar que la reducción temporal de las emisiones alrededor de 1999 se generó por la contracción general de la economía por el período de recesión (IDEAM, 2016). El aumento en las emisiones nacionales de GEI por el transporte está impulsado en parte por el crecimiento en la tasa de motorización y el volumen de carga movilizado (MADS, 2017b).

Figura 1-2. Emisiones GEI del sector transporte (CO₂-eq)



Fuente. (IDEAM, 2016)

1.1.2 Contaminantes criterio en Colombia

Los contaminantes criterio principales son el material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), NO₂, O₃, CO y SO₂. Por las consecuencias adversas de las altas concentraciones de los contaminantes criterio, la OMS diseñó las Guías de Calidad del Aire (GCA) para orientar a las naciones en la estipulación de estándares propios. La Tabla 1-2 presenta las metas y los objetivos intermedios de cada contaminante criterio, los objetivos son la estructura para alcanzar una reducción progresiva en la contaminación del aire, y los límites de referencia establecidos para Colombia, que para el caso del material particulado corresponden a los objetivos intermedios de la OMS. El MADS definió que para el 2030 Colombia tendrá como estándar de calidad del aire de material particulado el Objetivo Intermedio 3 de las GCA de la OMS (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

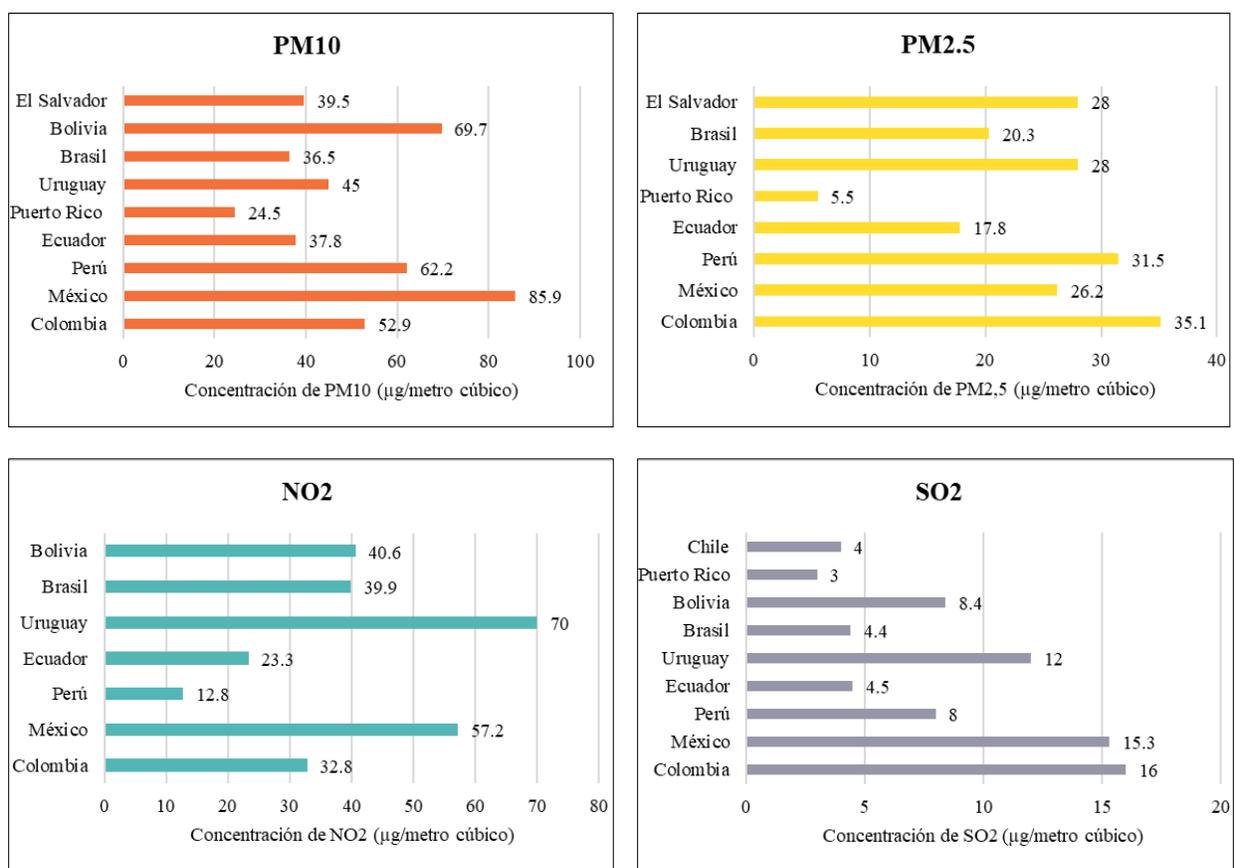
Tabla 1-2. Umbrales de concentración de contaminantes criterio OMS y Colombia

CONTAMINANTE	PM _{2.5} (µg/m ³)		PM ₁₀ (µg/m ³)		O ₃ (µg/m ³)			SO ₂ (µg/m ³)		NO ₂ (µg/m ³)		CO (µg/m ³)			
	24 hr	Anual	24 hr	Anual	1 hr	8 hr	10 min	3 hr	24 hr	1 hr	1 hr	24 hr	Anual	1 hr	8 hr
OMS	25	10	50	20	-	100	500	-	20	-	200	-	40	-	-
Objetivo intermedio 1	75	35	150	70	-	160	-	-	125	-	-	-	-	-	-
Objetivo intermedio 2	50	25	100	50	-	-	-	-	50	-	-	-	-	-	-
Objetivo intermedio 3	38	15	75	30	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Colombia	50	25	100	50	120	80	-	750	250	80	200	150	100	40	10

Fuente. Elaboración propia

A partir de estadísticas anuales promedio de estaciones de monitoreo, se estableció la concentración de cuatro contaminantes criterio para los países de América Latina (Green & Sánchez, 2013), como se identifica en la Figura 1-3. Para el 2011 la concentración promedio anual de material particulado, PM₁₀ y PM_{2.5}, en los países de América Latina evaluados y el promedio de la región son superiores a los estándares establecidos por la OMS. Mientras que, a nivel regional la concentración de los contaminantes de NO₂ y SO₂ están por debajo del límite máximo, sin embargo, México supera el límite de SO₂ y Chile, Bolivia, México y Uruguay superan el límite de NO₂. Bajo los estándares internacionales de la OMS, Colombia excede las concentraciones de PM₁₀, PM_{2.5} y está dentro del rango establecido para los contaminantes criterio SO₂ y NO₂.

Figura 1-3. Concentración de contaminantes criterio en América Latina (µg/metro cúbico)



Fuente. Elaboración propia a partir de (Green & Sánchez, 2013)

Según el Sistema de Información Ambiental de Colombia (2019), los contaminantes que se generan en mayor cantidad en el país son el material particulado, los óxidos de azufre, los óxidos de nitrógeno, el monóxido de carbono y el dióxido de carbono. Mientras que, los metales pesados,

32 Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

furanos, ruido, y dioxinas se generan en proporciones menores. En este sentido, el problema principal de la contaminación del aire en Colombia es la concentración de material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), situación que se agudiza en los grandes centros urbanos del país, tales como Bogotá, Medellín y Cali, y en municipios con alto desarrollo industrial como Ráquira (Boyacá) y Yumbo (Valle del Cauca) (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

El IDEAM (2020) elaboró el primer inventario nacional de emisiones de contaminantes criterio y carbono negro 2010-2014 considerando cinco contaminantes criterio; en la Tabla 1-3 se presenta el total de emisiones por contaminante, los sectores económicos que los emiten, las emisiones por fuentes móviles y la distribución de éstas por cada subsistema de transporte. El contaminante criterio que más se emite en Colombia es el monóxido de carbono, originado principalmente por incendios forestales y el sector transporte. En Colombia, los contaminantes que más se generan por la operación del transporte son el CO, NO₂, SO₂, además, el transporte terrestre por carretera es el subsistema de transporte que más genera emisiones de contaminantes criterio.

Tabla 1-3. Emisiones de contaminantes criterio - Colombia 2014

CONTAMINANTE	EMISIONES TOTALES 2014 (TON)	SECTOR ECONÓMICO ^(a)				MODO DE TRANSPORTE			
		[11] 29.9% [1A3] 15.5% [4] 2.0%	[1A4] 23.3% [3] 8.4% [1A1] 0.3%	[1A2] 18.4% [1B] 2.2%					
CN	21,851	[11] 29.9% [1A3] 15.5% [4] 2.0%	[1A4] 23.3% [3] 8.4% [1A1] 0.3%	[1A2] 18.4% [1B] 2.2%		79.1%	7.9%	8.5%	4.5%
PM _{2.5}	241,605	[11] 37.9% [1A2] 9.7% [1B] 1.0%	[1A4] 28.8% [4] 6.7% [2] 0.8%	[3] 10.2% [1A3] 4.5% [1A1] 0.2%		72.6%	5.1%	20.2%	2.1%
CO	2,565,694	[11] 40.3% [3] 9.6% [1A1] 1.0%	[1A3] 27.2% [1A2] 5.9% [1B] 0.2%	[1A4] 13.4% [4] 2.4%		89.3%	9.1%	1.3%	0.3%
NO ₂	354,006	[1A3] 70.7% [1A1] 6.6% [4] 0.9%	[1A2] 8.5% [3] 3.5% [1B] 0.3%	[11] 7.1% [1A4] 2.3%		64.1%	15.2%	17.2%	3.5%
SO ₂	176,095	[1A2] 57.3% [11] 3.3% [1B] 0.4%	[1A1] 27.1% [3] 1.0% [4] 0.2%	[1A3] 9.7% [1A4] 0.9%		14.8%	20.4%	0.1%	64.7%

(a) Los sectores económicos incluidos en el Inventario Nacional 2010-2014 son:
 [2] Procesos industriales y uso de productos [3] Agricultura, silvicultura, y otros usos de la tierra [4] Residuos
 [11] Incendios de bosques y pradera [1B] Emisiones fugitivas provenientes de la fabricación de combustible [1A3] Transporte
 [1A1] Industrias de la energía [1A2] Industrias manufactureras y de la construcción [1A4] Otros sectores

Fuente. Elaboración propia a partir de (IDEAM, 2020)

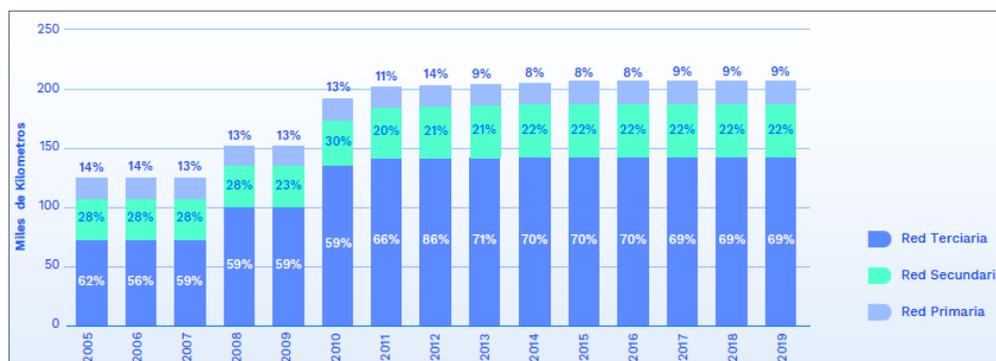
1.2 Sistema de transporte terrestre por carretera en Colombia

Las características del sistema de transporte inciden en la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes criterios emitidos a la atmósfera. El sistema de transporte terrestre está integrado por la infraestructura vial, el parque automotor y los combustibles. A continuación, se identifican las características generales de la red vial nacional, las particularidades del parque automotor colombiano y las especificaciones de los combustibles utilizados en el país.

1.2.1 Infraestructura vial

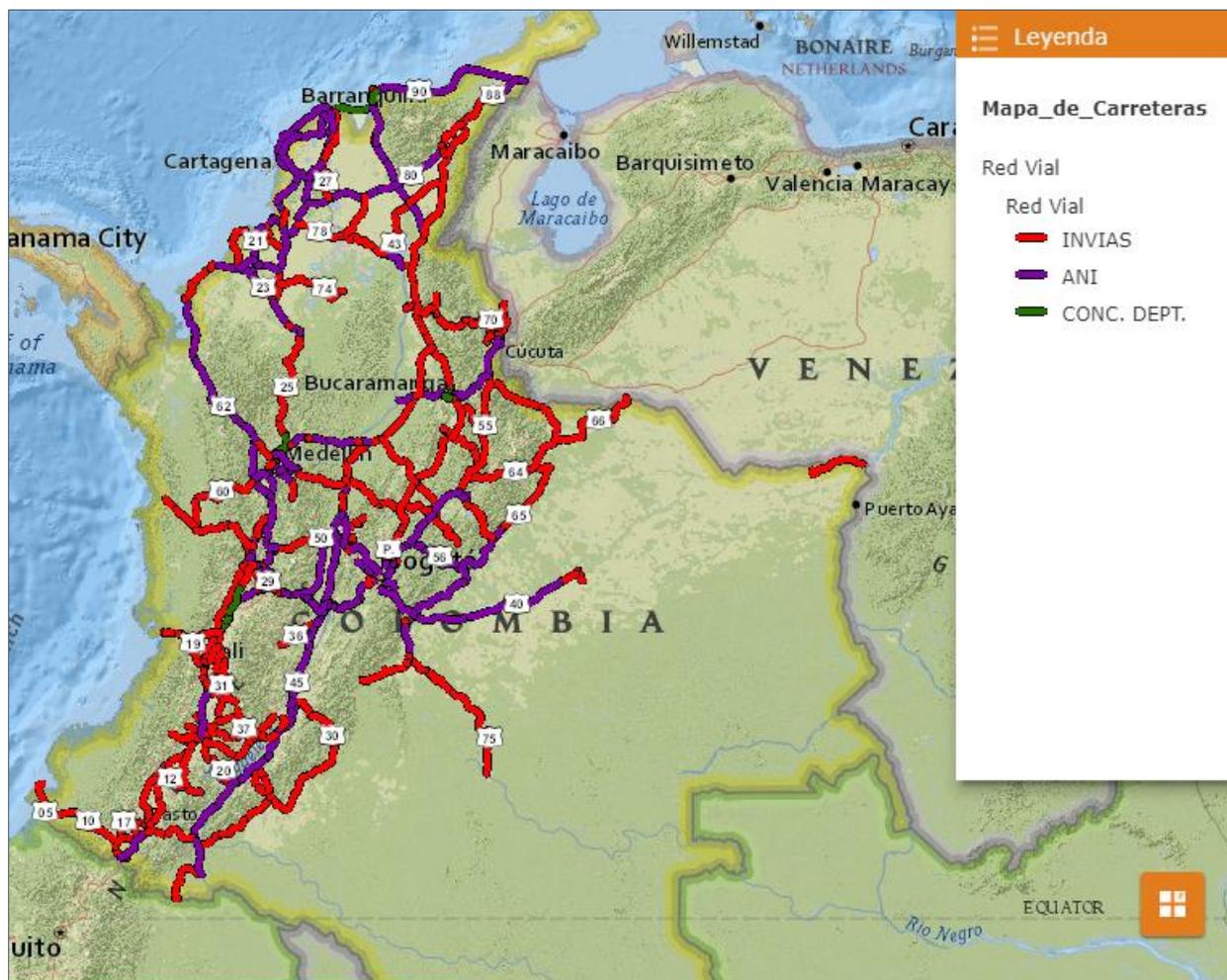
La red vial nacional colombiana se compone de tres redes: primaria, secundaria y terciaria. En el 2019 Colombia tenía una red vial de 205,379 kilómetros distribuida en 17,958 km de red primaria, 61% administrados por el INVIAS y 39% por la ANI, 45,137 km de red secundaria, y 142,284 km de red terciaria, esta última administrada en un 71% por los municipios, 10% por los departamentos y 19% por el INVIAS. En la Figura 1-4 se identifica la composición de la red vial nacional en una serie histórica, se evidencia que en los últimos años no se ha dado un cambio significativo en los kilómetros de la red vial ni en la participación de cada tipo de red vial.

Figura 1-4. Composición red vial nacional



Fuente. (Ministerio de Transporte, 2019)

En la Figura 1-5 se presenta la distribución de la red vial primaria, secundaria y complementaria a lo largo del territorio colombiano, discriminada por la entidad territorial responsable de su mantenimiento y operación. En este sentido, existe una mayor densidad de vías primarias y secundarias en las zonas norte, centro y occidente del país, mientras que en los sectores sur y oriente predominan las vías terciarias.

Figura 1-5. Red primaria, secundaria y complementaria nacional

Fuente. INVIAS. Disponible <https://hermes.invias.gov.co/carreteras/>

La red vial nacional a cargo del INVIAS se clasifica según el tipo de terreno predominante a lo largo del proyecto, así el 48% de las vías a cargo del INVIAS están en terreno plano (pendiente longitudinal inferior a 3%), un 29% en terreno ondulado (pendiente longitudinal entre 3% a 6%) y un 23% en terreno montañoso (pendiente longitudinal entre 6% a 8%) (Ministerio de Transporte, 2011). En la evaluación del estado de la red vial nacional del INVIAS realizada en el segundo semestre del 2020, ver Tabla 1-4, se identificó que más de la mitad de las vías pavimentadas están en buen estado, mientras que, de las vías sin pavimentar, poco más del 85% está en condiciones regulares o malas. Lo anterior está en armonía con la situación de América Latina, región en la que la red vial presenta baja calidad tanto en vías interurbanas como urbanas (BID, 2021).

Tabla 1-4. Estado red vial nacional - INVIAS 2020

ESTADO	PAVIMENTADO		SIN PAVIMENTAR (AFIRMADO)	
	Kilómetros	%	Kilómetros	%
Muy bueno	1,439.27	15.42%	24.36	1.10%
Bueno	3,419.95	36.64%	300.16	13.54%
Regular	2,808.71	30.09%	902.97	40.74%
Malo	1,588.77	17.02%	855.92	38.62%
Muy malo	77.44	0.83%	133.02	6.0%
Total	9,334.15	100%	2,216.43	100%

Fuente. Elaboración propia a partir de (INVIAS, 2021)

1.2.2 Generalidades del parque automotor

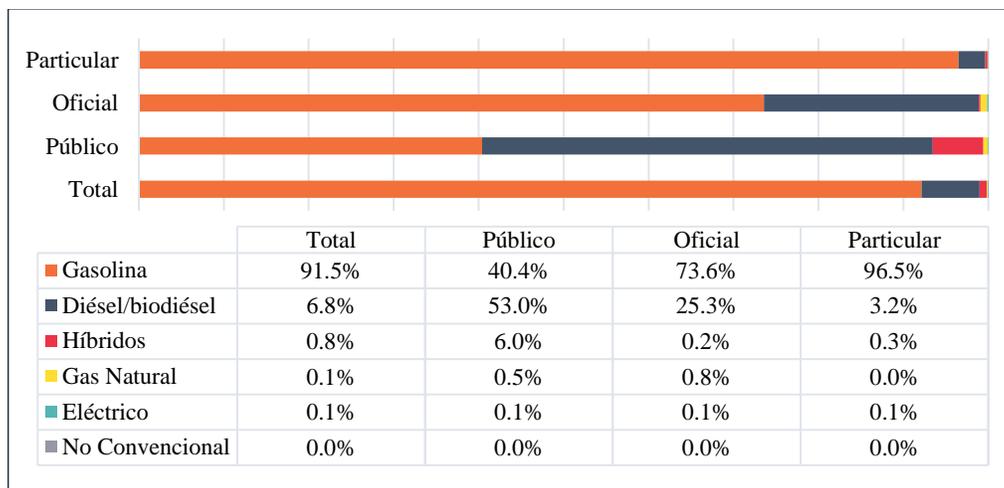
Para el año 2019, Colombia tenía un parque automotor total registrado de más de 15 millones de unidades, con un crecimiento promedio anual de 825,000 nuevos registros de matrículas de vehículos. Referente al tipo de servicio, del total de parque automotor un 93% tiene vocación particular, un 6% atiende a servicio público con mayor participación de automóviles, camionetas y camiones y el 1% restante se divide entre vehículos de servicio diplomático u oficial. Concerniente a la clase, el 58% de las unidades de transporte en Colombia son motocicletas, siendo ésta la clase predominante, el 23% son automóviles, un 8.8% corresponde a camioneta, un 4.5% a camperos, un 2.5% son vehículos de carga (camión, tractocamión, volqueta) y el porcentaje restante se compone por las clases de maquinaria, microbús, bus, buseta, motocarro, cuatrimoto, mototriciclo, ciclomotor y cuadríciclo (Ministerio de Transporte, 2019).

La moto es un vehículo que se ha incorporado con contundencia al parque automotor nacional en los últimos años, mientras que la cantidad de vehículos pesados nuevos tipo tractocamiones, volquetas y camiones es baja, representando una renovación reducida de parque automotor en los últimos años (Ministerio de Transporte, 2019). Lo anterior concuerda con la edad promedio del parque automotor en Colombia por clase establecida para el año 2018 (Departamento Nacional de Planeación, 2018) así: Volqueta: 21 años; Camión: 21 años; Bus: 21 años; Camperos: 20 años; Buseta: 18 años; Automóvil: 15 años; Microbús: 14 años; Camioneta: 14 años; Tractocamión: 13 años; Motos: 9 años. Es importante anotar que, actualmente en Colombia no existe normatividad vigente respecto a la vida útil de los vehículos de carga, y la alta edad promedio de los vehículos de estas clases se debe a la baja desintegración de vehículos antiguos y a la escasa adquisición de vehículos nuevos (Departamento Nacional de Planeación, 2019).

Como se mencionó anteriormente, la edad del vehículo es un factor definitivo en la generación de emisiones, por lo que para disminuir las emisiones de contaminantes en el país, a partir del 2001 se crearon estrategias para la desintegración de vehículos de servicio público colectivo urbano de pasajeros y unidades de transporte de carga con peso mayor a 10.5 toneladas, sin embargo, Colombia aún no establece mecanismos para la desintegración de motos, automóviles de servicio particular, ni vehículos de transporte de carga de bajo peso (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

En cuanto a combustible (ver Figura 1-6), del total de vehículos registrados en el RUNT para el 2019 un 91% utiliza gasolina, seguido por un 7% de diésel/biodiésel y unas proporciones bajas para energías alternativas tipo híbridos, gas natural y eléctrico, esta tendencia se replica en los vehículos particulares. En tanto que, en los vehículos de servicio público, poco más de la mitad de los vehículos utilizan combustible tipo diésel, y existe una mayor participación de combustibles no convencionales respecto a los combustibles utilizados por vehículos de otros servicios (Ministerio de Transporte, 2019).

Figura 1-6. Combustible utilizado por parque automotor registrado en el RUNT

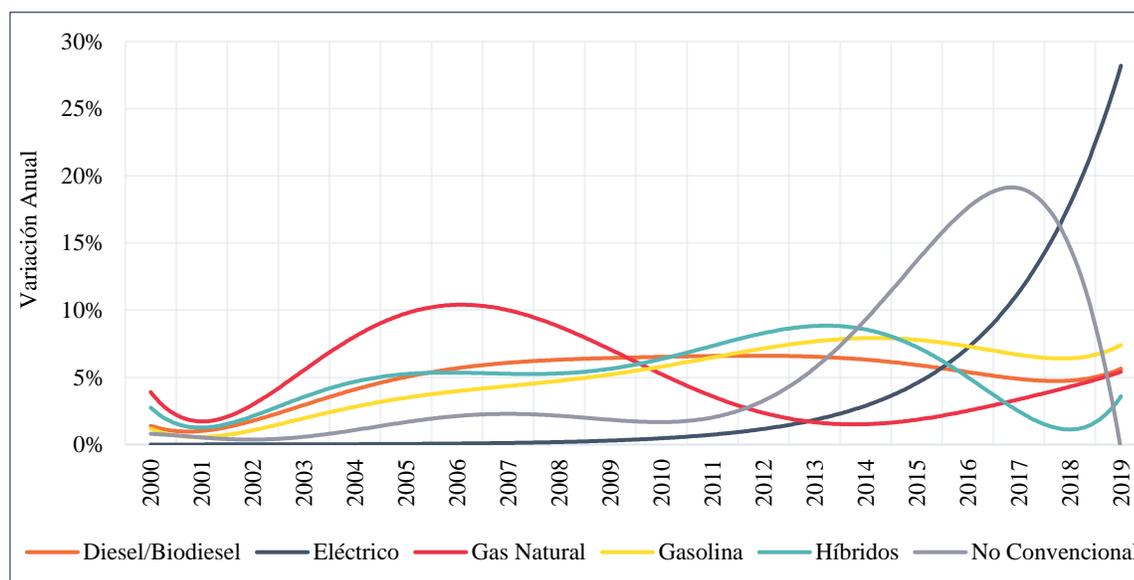


Fuente. Elaboración propia a partir de (Ministerio de Transporte, 2019)

La variación anual del tipo de combustible en los vehículos nuevos registrados en el RUNT (ver Figura 1-7) permite identificar un crecimiento de las unidades de transporte de combustible tipo eléctrico desde 2014; mientras que el gas natural, híbridos y combustibles no convencionales (etanol, hidrógeno, GLP) dejaron de crecer en los últimos años. Esto se debe en parte al costo elevado de transformación de un vehículo de combustible convencional a tecnología híbrida o

GLP, a los sistemas de almacenamiento robustos que requiere el hidrógeno lo cual resta eficiencia operativa al vehículo, a la baja disponibilidad del etanol como combustible independiente pues gran parte de la oferta mundial de este se dirige a la producción de gasolina.

Figura 1-7. Tendencia uso de combustible en Colombia



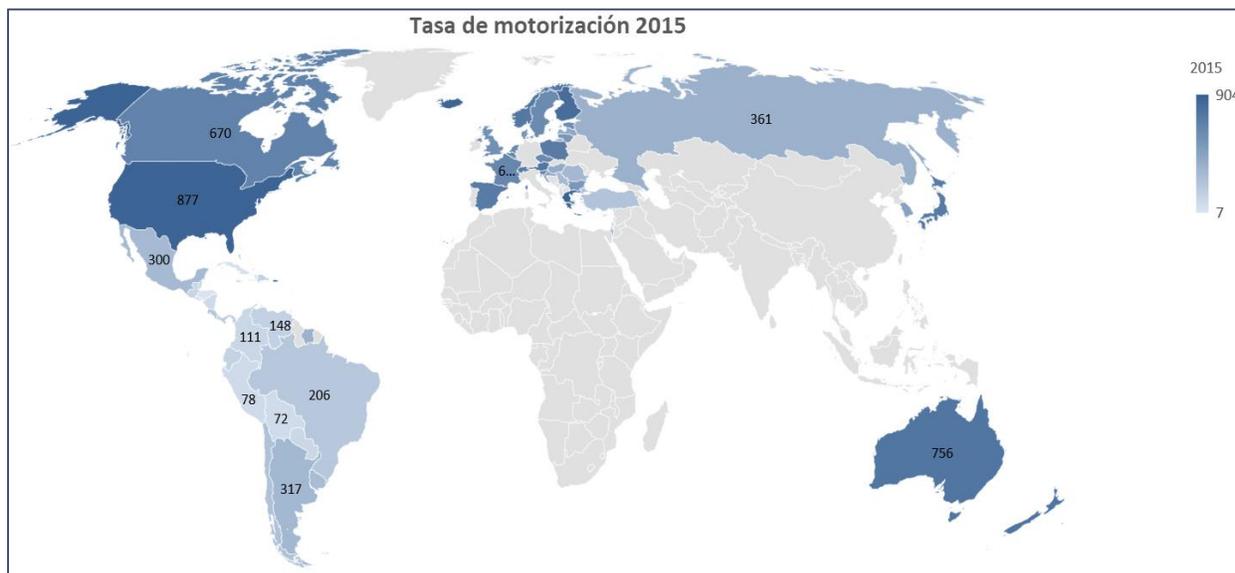
Fuente. (Ministerio de Transporte, 2019)

En el numeral 2.3 del presente documento se incluye un análisis más detallado de las particularidades del parque automotor del país.

1.2.3 Tasa de motorización

La tasa de motorización es un indicador de la motorización según la población en un área geográfica y período de tiempo, es el número de vehículos motorizados particulares por cada mil habitantes. En este sentido una tasa de motorización con valor de 1,000 implica una relación de que por cada habitante hay un vehículo registrado, y valores inferiores representan una motorización más reducida respecto a la población. La tasa de motorización revela en parte las condiciones económicas de una región, es así como una serie histórica de la tasa de motorización permite mostrar las tendencias de crecimiento económico.

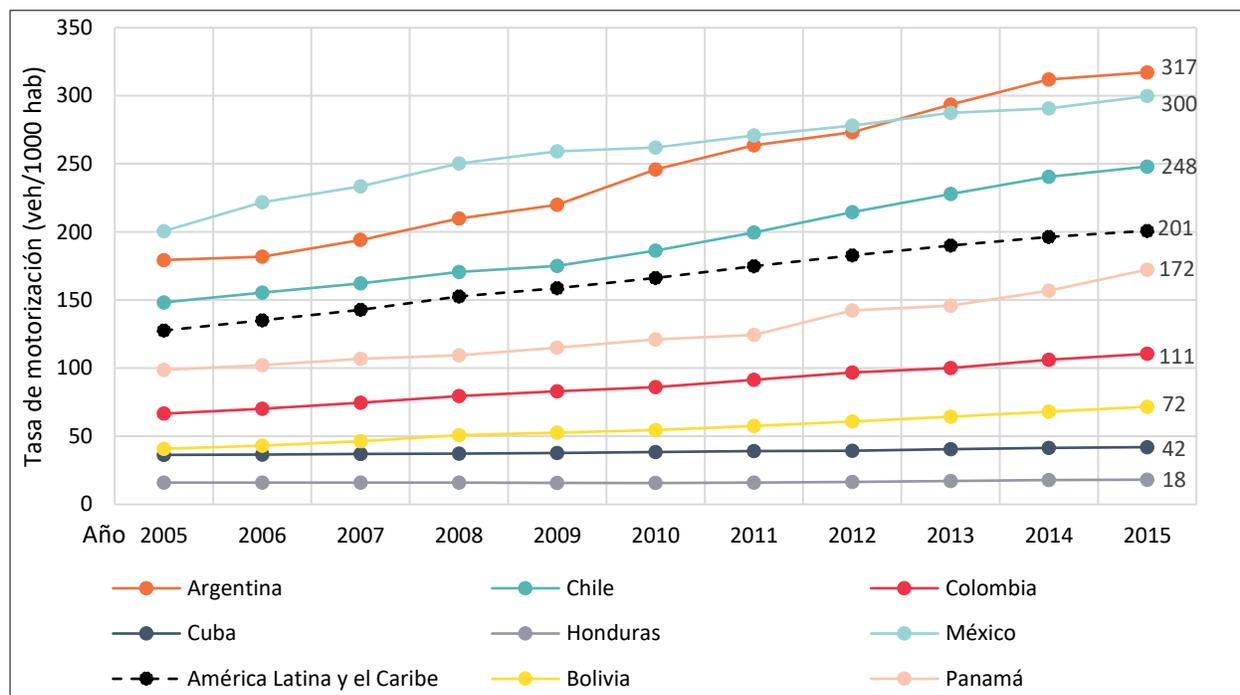
A partir de información de organismos económicos de cooperación internacional como la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD) se construye un mapamundi de la tasa de motorización a nivel mundial para el año 2015, ver Figura 1-8.

Figura 1-8. Tasa de motorización a nivel mundial 2015 (veh/1,000 hab)

Fuente. Elaboración propia a partir de (CEPALSTAT, 2021; OECD.Stat, 2021)

Según el mapa, América del Norte y Australia tienen unas de las tasas de motorización más altas. Sin embargo, de la información disponible se establece que Puerto Rico y Grecia tienen las tasas de motorización más elevadas con 904 y 880 vehículos/1,000 habitantes respectivamente. En Latinoamérica se tienen tasas de motorización medias-bajas y un amplio contraste. Por un lado, Cuba es el país con la menor tasa con 42 veh/1,000 hab, mientras que Argentina tiene la mayor cantidad de vehículos por cada mil habitantes con un valor de 317. Colombia está dentro de los valores promedios de tasas de motorización de la región con 111 veh/1,000 hab para el 2015 (CEPALSTAT, 2021).

En la Figura 1-9 se identifica una serie histórica de diez años (período 2005 a 2015) de las tasas de motorización de algunos países y el promedio de América Latina y el Caribe (CEPALSTAT, 2021). Chile, México y Colombia han tenido un crecimiento sostenido muy similar al promedio de la región. Argentina y Panamá también presentan crecimiento, pero más acentuado que el promedio regional, es decir la adquisición de vehículos por cada habitante en estos países ha sido más alta. De otra parte, Bolivia, Cuba y Honduras presentan un estancamiento en la tasa de motorización, lo cual se puede dar por baja tasa de renovación vehicular y preservación de vehículos existentes (acompañado por altas edades vehiculares promedio), o por alta tasa de renovación vehicular aproximándose a un esquema uno a uno en el que por cada vehículo que sale del mercado ingresa un vehículo nuevo.

Figura 1-9. Evolución tasa de motorización en América Latina y el Caribe

Fuente. Elaboración propia a partir de (CEPALSTAT, 2021)

Colombia tiene un crecimiento sostenido en la tasa de motorización y su cifra de 111 veh/1,000 hab para el 2015 sitúa al país en aquellos con las tasas más bajas a nivel mundial y en el promedio de América Latina. En Colombia el crecimiento medio anual de motorización es de 5.2%, un valor muy alejado al de países desarrollados como Estados Unidos con un 0.5% o Australia con un 1%. A pesar de que en términos generales se tiene una baja posesión vehicular por los colombianos, la contribución de las emisiones por fuentes móviles a la contaminación atmosférica es importante como se destacó en apartados anteriores (especialmente por la preferencia a combustibles fósiles), de ahí que se deba prestar atención especial al sector de vehículos motorizados.

1.2.4 Combustible

El tipo y calidad del combustible es fundamental en los contaminantes que se generan en el proceso de combustión del motor de un vehículo. El estándar europeo, conocido como Euro, establece límites para las emisiones producidas por un vehículo en función del combustible fósil utilizado, actualmente existen seis categorías, entre más alto es el número mayor es la exigencia en la reducción de emisiones. El estándar Euro de vehículos livianos se identifica con números arábigos de 1 a 6, mientras que para los vehículos pesados se presenta con números romanos de I a VI. En

la Tabla 1-5 se identifican los estándares Euro de emisiones, para vehículos livianos y motos en unidades de gramos/kilometro (g/km), mientras que para los vehículos pesados se definen según la potencia del motor, en unidades de gramos por kilovatio- hora (g/kWh) (DieselNet, 2022).

Tabla 1-5. Estándar EURO de emisiones (g/km)

TIPO VEHÍCULO	ESTÁNDAR EURO	CO		HC		HC + NO _x		NO _x		PM	
		G	D	G	D	G	D	G	D	G	D
Vehículo liviano ≤ 1305 kg	Euro 1	2.72	2.72	-	-	0.97	0.97	-	-	-	0.14
	Euro 2	2.2	1.0	-	-	0.5	0.90	-	-	-	0.10
	Euro 3	2.3	0.64	0.20	-	-	0.56	0.15	0.5	-	0.05
	Euro 4	1.0	0.5	0.10	-	-	0.30	0.08	0.25	-	0.25
	Euro 5	1.0	0.5	0.10 ^a	-	-	0.23	0.06	0.18	0.0045	0.0045
	Euro 6	1.0	0.50	0.10 ^a	-	-	0.17	0.06	0.08	0.0045	0.0045
Vehículo liviano 1305 – 1760 kg	Euro 1	5.17	5.17	-	-	1.40	1.40	-	-	-	0.19
	Euro 2	4.0	1.25	-	-	0.65	1.30	-	-	-	0.14
	Euro 3	4.17	0.80	0.25	-	-	0.72	0.18	0.65	-	0.07
	Euro 4	1.81	0.63	0.13	-	-	0.39	0.10	0.33	-	0.04
	Euro 5	1.81	0.63	0.13 ^b	-	-	0.295	0.075	0.235	0.0045	0.0045
	Euro 6	1.81	0.63	0.13 ^b	-	-	0.195	0.075	0.105	0.0045	0.0045
Vehículo liviano > 1760 kg. Máximo 3500 kg	Euro 1	6.90	6.90	-	-	1.70	1.70	-	-	-	0.25
	Euro 2	5.0	1.5	-	-	0.80	1.60	-	-	-	0.20
	Euro 3	5.22	0.95	0.29	-	-	0.86	0.21	0.78	-	0.10
	Euro 4	2.27	0.74	0.16	-	-	0.46	0.11	0.39	-	0.06
	Euro 5	2.27	0.74	0.16 ^c	-	-	0.350	0.082	0.280	0.0045	0.0045
	Euro 6	2.27	0.74	0.16 ^c	-	-	0.215	0.082	0.125	0.0045	0.0045
Vehículos de pasajeros > 2500 kg	Euro I	2.72	2.72	-	-	0.97	0.97	-	-	-	0.14
	Euro II	2.2	1.0	-	-	0.50	0.9	-	-	-	0.10
	Euro III	2.30	0.64	0.20	-	-	0.56	0.15	0.50	-	0.05
	Euro IV	1.0	0.50	0.10	-	-	0.30	0.08	0.25	-	0.025
	Euro V	1.0	0.50	0.10 ^d	-	-	0.23	0.06	0.18	0.0045	0.0045
	Euro VI	1.0	0.50	0.10 ^d	-	-	0.17	0.06	0.08	0.0045	0.0045
Camiones y autobuses pesados	Euro I	-	4.5	-	1.1	-	-	-	8.0	-	0.36
	Euro II	-	4.0	-	1.1	-	-	-	7.0	-	0.15
	Euro III	-	2.1	-	0.66	-	-	-	5.0	-	0.10
	Euro IV	-	1.5	-	0.46	-	-	-	3.5	-	0.02
	Euro V	-	1.5	-	0.46	-	-	-	2.0	-	0.02
	Euro VI	-	1.5	-	0.13	-	-	-	0.40	-	0.01
Motocicletas	Euro 1										
	Euro 2	5.50		1.20				0.30			
	Euro 3	2.0		0.80		0.30		0.15			
	Euro 4	1.14				0.17		0.09			
	Euro 5	1.0				0.1		0.06			

G: Gasolina

D: Diésel

a: y NMHC (Hidrocarburos distintos del metano) = 0.068 g/km

b: y NMHC (Hidrocarburos distintos del metano) = 0.090 g/km

c: y NMHC (Hidrocarburos distintos del metano) = 0.108 g/km

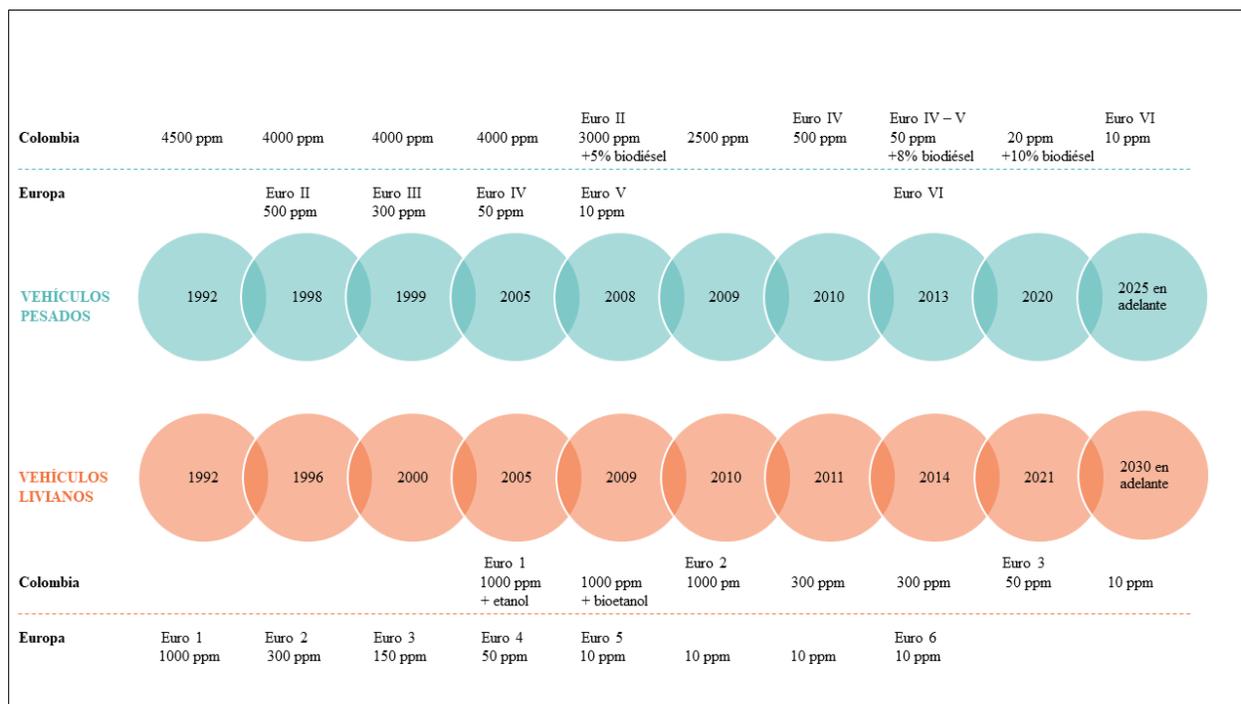
d: y NMHC (Hidrocarburos distintos del metano) = 0.068 g/km

Fuente. Elaboración propia a partir de (DieselNet, 2022)

Las características del combustible se determinan por el proceso de refinamiento, el transporte de éste por poliductos y el almacenamiento hasta su distribución en las estaciones de servicio. La calidad del combustible y las emisiones que genera depende del contenido de azufre expresado en partes por millón (ppm), el nivel de cetano que representa la rapidez de encendido del motor, la presencia de hidrocarburos aromáticos y benceno, la volatilidad y la densidad del combustible (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

Como se mencionó anteriormente la calidad del combustible depende, en parte, del contenido de azufre. Tradicionalmente los combustibles colombianos han tenido un alto contenido de éste, lo cual se evidencia en el atraso de más de una década en las regulaciones ambientales respecto a los estándares mundiales. En la Figura 1-10 se identifica una línea de tiempo de los combustibles tipo gasolina y diésel, según el contenido de azufre y la tecnología del motor considerando el año de implementación de cada estándar Euro tanto en Europa como en Colombia.

Figura 1-10. Línea de tiempo de estándares Euro y calidad del combustible en Colombia



Fuente. Elaboración propia a partir de (MADS, 2017c)

En Colombia la calidad del combustible ha retardado la comercialización de vehículos con tecnologías más eficientes, por tanto, existe la necesidad de establecer estrategias para el acceso a combustibles con la calidad suficiente para posibilitar el ingreso de mejores tecnologías

vehiculares al país. Mientras que el estándar diésel Euro V se divulgó en 2008 cuando Europa tenía diésel con 10 ppm y Colombia con 3,000 ppm de azufre, en el país el Euro V será exigido a partir del 2025, año a partir del cual las refinadoras del país deben producir diésel con 10 ppm de azufre (MME & MADS, 2020).

Para reducir las emisiones de contaminantes de los combustibles en Colombia, desde el 2005 se empezaron a utilizar biocombustibles. A la gasolina se adiciona el bioetanol, proveniente de la caña de azúcar, y al diésel se agrega biodiésel, extraído del aceite de palma. El Ministerio de Minas y Energía establece las mezclas de bioetanol y biodiésel recomendadas para los combustibles en el país, lo anterior según la cantidad de biocombustible disponible y la demanda de cada ciudad. De ahí que en la actualidad la gasolina contenga entre un 8% a 10% de bioetanol, y el diésel un 10% de biodiésel (MME, 2017).

En el 2017, de los vehículos con tecnología diésel en Colombia (buses, automóviles y vehículos de carga), un 67% contaban con tecnología Euro I, Euro II y Euro III, seguido por un 21.25% con tecnología Pre-Euro, y un 11.75% con tecnología Euro IV (Departamento Nacional de Planeación, 2018). A pesar de que en el mundo se implementó el estándar Euro VI para todos los vehículos en el 2014, en Colombia, actualmente los vehículos nuevos que entran en circulación deben cumplir el estándar Euro IV para tecnologías diésel y Euro 3 para la gasolina, porque como se destacó anteriormente, a pesar de que los fabricantes europeos producen actualmente vehículos con estándar Euro VI, la calidad de los combustibles nacionales no es compatible con esta tecnología.

Es relevante la sincronización entre la tecnología del vehículo y la calidad del combustible, en el caso del material particulado PM_{10} se ha comprobado que las emisiones en vehículos con mayor edad son independientes del contenido de azufre en el diésel, por lo que a pesar de que se mejore la calidad del combustible, como con la reducción en el contenido de azufre, si éste se utiliza en un vehículo con mayor edad las emisiones de partículas no disminuyen (Arango, 2009).

En Colombia, la medida que ha tenido los efectos más significativos en la reducción de emisiones de contaminantes criterio ha sido la disminución del contenido de azufre en el combustible para motores diésel (Departamento Nacional de Planeación, 2018). Sin embargo, aún prevalecen dos problemáticas, enfocadas a cómo conservar la calidad del combustible en su transporte desde las refinerías hasta las estaciones de servicio, y la obsolescencia de la tecnología del parque automotor en el país, Euro IV, para motores diésel, y Euro 3, para vehículos a gasolina.

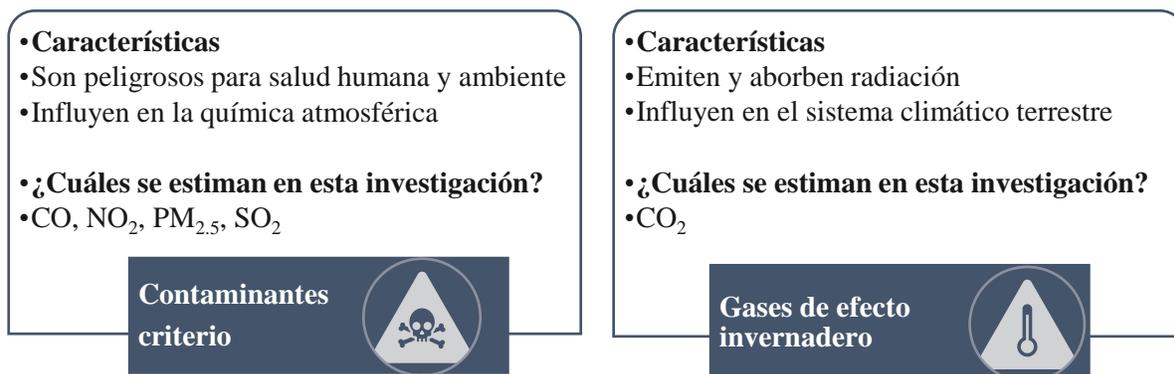
Con el fin de verificar que los niveles de emisión se cumplan por los vehículos nuevos, los fabricantes deben demostrar que el producto ha sido sometido a una prueba dinámica, denominada homologación, en el que se miden las emisiones del tubo de escape mientras se simula un ciclo de conducción. De otra parte, en los vehículos en operación, el mantenimiento preventivo es un factor crucial en la generación de emisiones, acciones como el cambio de los filtros de aire y aceite, la limpieza periódica de los inyectores, la sincronización, entre otros. En este sentido, las autoridades ambientales y de tránsito colombianas desarrollan operativos en vía para la medición directa de contaminantes verificando el acatamiento de los estándares de emisión, es así como el incumplimiento de éstos se traduce en sanciones, cancelación de licencias de conducción e inmovilización del vehículo (Departamento Nacional de Planeación, 2018).

1.3 Gases de efecto invernadero y contaminantes atmosféricos generados por el transporte terrestre por carretera

Las emisiones pueden ser partículas o gases. Los gases son sustancias y compuestos gaseosos que influyen directamente en la atmósfera desencadenando problemáticas en la salud y el ambiente. Mientras que las partículas están constituidas por partículas líquidas y sólidas provenientes de sustancias orgánicas e inorgánicas que están suspendidas en el aire, debido a su compleja naturaleza tiene una amplia variedad de tamaños, formas y composiciones (IDEAM, 2019).

Típicamente las emisiones pueden ser de dos tipos. En primera instancia los contaminantes criterio que tienen influencia directa en la química atmosférica y están presentes en todo lugar por lo que se constituyen en un peligro para la salud humana y el ambiente, de otra parte, se tienen a los gases de efecto invernadero que describen a gases que emiten y absorben radiación influyendo así en el estado del sistema climático terrestre, fenómeno conocido como cambio climático (IDEAM, 2019).

En esta tesis se estiman las emisiones expulsadas por el tubo de escape de seis contaminantes atmosféricos generados por el transporte por carretera, tales como carbono negro, cuatro contaminantes criterio y un gas de efecto invernadero. En la Figura 1-11 se identifican las generalidades de los contaminantes considerados en la investigación, y a continuación, se describen sus características principales.

Figura 1-11. Contaminantes criterio y GEI por fuentes móviles considerados

Fuente. Elaboración propia a partir de (IDEAM, 2019)

1.3.1 Monóxido de carbono (CO)

Se genera en la combustión parcial de combustibles que contienen carbono como la gasolina, el gas natural, el carbón, entre otros. De ahí que la mayor fuente de CO sea el sector transporte, particularmente automóviles, camiones y otros vehículos que para garantizar su operación queman combustibles fósiles continuamente. En el 2014 el sector transporte representó el 27.2% de las emisiones nacionales de CO, y dentro de éstas, el transporte por carretera y la aviación civil fueron los subsistemas que más aportaron, con un 89.3% y 9.1% respectivamente (IDEAM, 2020).

La exposición a CO disminuye la capacidad de transportar oxígeno en el torrente sanguíneo hacia órganos críticos como el corazón y el cerebro, por lo que afecta mayoritariamente a personas con enfermedades del corazón. En tanto, exposiciones prolongadas a altas concentraciones de CO se traducen en mareos, confusión, pérdida del conocimiento y puede desencadenar en la muerte.

1.3.2 Dióxido de nitrógeno (NO₂)

El NO₂ se origina por la quema de combustibles principalmente por parte de automóviles, plantas de energía y equipos de construcción. Este es un gas muy dinámico que reacciona con otras sustancias químicas del aire para crear material particulado y ozono. De las emisiones nacionales de NO₂ para el 2014 (IDEAM, 2020), el sector transporte aportó el 70.7% de éstas, y dentro de este grupo los subsistemas transporte terrestre con un 64.1% y la navegación marítima y fluvial con un 17.2% fueron los modos más críticos.

Los efectos en la salud por la exposición a NO₂ son diversos, desde mareos, dolor de cabeza, náuseas, estados de inconciencia, irritación de vías respiratorias, disminución de la resistencia respiratoria a infecciones, imposibilitar el transporte de oxígeno por la sangre, hasta consecuencias más graves como agravar las enfermedades respiratorias y del corazón, propiciar el desarrollo de bronquitis, asma y pulmonía e incluso causar muertes prematuras.

1.3.3 Material particulado fino (PM_{2.5})

Son partículas con diámetro inferior igual o inferior a 2.5 micras, en otros términos, unas 30 veces más pequeña que el cabello humano promedio. Las partículas se generan básicamente en los procesos de combustión de vehículos a gasolina y diésel y en la combustión de procesos industriales, sin embargo, también puede propiciarse por la resuspensión de material de rodadura con la circulación de los vehículos. Para el 2014 el sector transporte contribuyó en un 4.5% a las emisiones de PM_{2.5} en el país, en tanto el transporte por carretera y la navegación marítima y fluvial fueron los subsistemas con mayor aporte, con un 72.6% y 20.2% respectivamente (IDEAM, 2020).

La exposición a PM_{2.5} se vincula con bajo peso al nacer, mayor propensión a la aparición de enfermedades de diabetes, cardiopatías, neuropatías y enfermedades crónicas de obstrucción pulmonar, así como con la reducción del desarrollo cognitivo de los niños.

1.3.4 Dióxido de azufre (SO₂)

Es un gas incoloro al cual las personas se encuentran expuestas por inhalación o contacto con la piel, las consecuencias en la salud dependen del nivel de concentración, tipo y duración de la exposición. La inhalación en el corto plazo se vincula con dificultad para respirar, opresión en el pecho, agravamiento de enfermedades como asma y enfisema, en tanto el contacto con la piel a corto plazo desencadena enrojecimiento, dolor punzante, irritación en ojos. La inhalación en el largo plazo desencadena náuseas, bronquitis, pérdida del olfato, disminución en fecundidad, entre otros, y el contacto con la piel prolongado ocasiona daño corneal severo.

Para el 2014 el sector transporte contribuyó en un 9.7% a las emisiones de SO₂ en el país, y dentro de este grupo los subsistemas de navegación marítima y fluvial con un 64.7%, la aviación civil con un 20.4% y el transporte terrestre con un 14.8% fueron los modos más críticos (IDEAM, 2020).

1.3.5 Carbono negro (BC)

Es un aerosol que es componente carbonáceo del material particulado, se genera por la combustión incompleta de combustibles fósiles. Debido a que es un aerosol no se vincula al grupo de GEI más sin embargo tiene capacidad de absorción de luz y es relevante en el cambio climático. En el 2014 el sector transporte representó el 15.5% de las emisiones nacionales de BC, y dentro de éstas, el transporte por carretera y la navegación marítima y fluvial fueron los subsistemas que más aportaron, con un 79.1% y 8.5% respectivamente (IDEAM, 2020).

1.3.6 Dióxido de carbono (CO₂)

Gas incoloro e inodoro compuesto por oxígeno y carbono, está presente en la naturaleza sin embargo su incremento en la atmósfera contribuye al desencadenamiento y aceleración del cambio climático, además el CO₂ destaca en los GEI porque puede estar durante décadas en la atmósfera y aumentar la temperatura terrestre.

Los GEI tienen múltiples consecuencias en la vida terrestre pues generan aumento de sequías, olas de calor más frecuentes, aumento del nivel del mar, tormentas más intensas, aumento de enfermedades, traslado o pérdida de plantas y animales por pérdida de hábitats, poniendo en riesgo la continuidad de la raza humana.

1.4 Aproximaciones metodológicas para la construcción de inventarios de emisiones por fuentes móviles

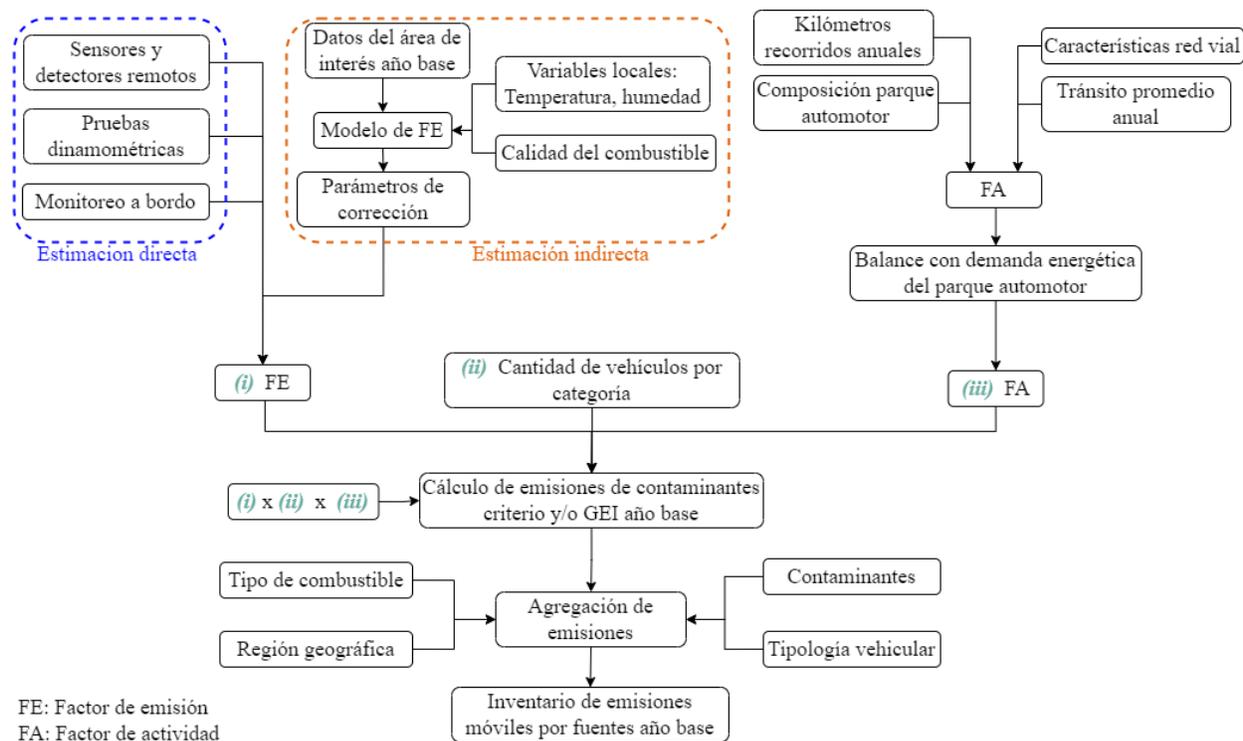
Los inventarios de emisiones son un recuento de la cantidad de contaminantes criterio, GEI o sustancias tóxicas emitidos a la atmósfera producidos por el desarrollo de una actividad o grupo de fuentes de emisión. Con los inventarios de emisiones se pueden identificar las principales fuentes de contaminación del aire y en consecuencia establecer estrategias de reducción y/o mitigación de impactos asociados.

Según la EPA (2022), un inventario de emisiones es la base de datos que lista por fuente emisora la cantidad de contaminantes liberados a la atmósfera durante un período de tiempo. Con esta definición se presenta la importancia de las bases de datos más allá de los informes, pues con el provecho de éstas las autoridades ambientales tienen una amplia oportunidad de comprender la información y hacer análisis de escenarios.

El inventario de emisiones se puede construir desde dos enfoques según la disponibilidad de la información y el propósito del inventario. En la aproximación *Top-Down* se tiene información base a escala macro y se buscan establecer las emisiones para una zona geográfica de menor escala. Mientras que, en el enfoque *Bottom-up*, el punto de partida es información específica con alto nivel de detalle, a escala micro, la cual se agrega para la estimación de emisiones para una zona geográfica más amplia (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017). A partir de lo anterior se establece que la metodología a utilizar en la elaboración de un inventario depende de los datos disponibles, el tamaño de la región objeto de estudio, entre otras.

En la Figura 1-12 se presenta el proceso general para la construcción de un inventario de emisiones por el transporte terrestre. Como primer paso se revisa la disponibilidad de información del área geográfica de interés y se establecen las tipologías vehiculares. Después, se asocia un rendimiento del combustible, factor de emisión y factor de actividad a cada tipología vehicular. Posteriormente se realiza un balance energético, comparando el consumo de combustible (producto del rendimiento de combustible, los kilómetros recorridos, cantidad de vehículos), con las ventas de combustible al sector transporte. Por último, se calculan las emisiones de contaminantes para cada tipología vehicular y se agrega la información según el propósito del inventario.

Los factores de emisión (FE) se definen para cada tipología vehicular establecida en el inventario, según variables como tipo combustible, tecnología del motor, cilindraje, clase del vehículo, entre otros. Los FE se pueden establecer a través de dos mecanismos: estimación indirecta o estimación directa. En la estimación indirecta, los FE se extraen de modelos computacionales con algoritmos de cálculo desarrollados por la EPA o la EEA, en los que se utilizan correlaciones entre las emisiones y variables de interés que afectan los FE. Mientras que, en la estimación directa, los FE se extraen de mediciones de emisiones realizadas directamente en la fuente, con metodologías como el monitoreo a bordo, las pruebas dinamométricas y los sensores remotos.

Figura 1-12. Proceso de construcción de inventario de emisiones por fuentes móviles

Fuente. Elaboración propia

Los factores de actividad (FA) representan la intensidad de la acción que genera las emisiones de contaminantes criterio o GEI. Para el caso particular de fuentes móviles, los FA simbolizan las características de operación del transporte terrestre para un año base. Básicamente los FA de una región se pueden establecer con dos mecanismos, como el producto de los kilómetros recorridos anualmente en promedio por una tipología de vehículo y la cantidad de estos vehículos en la región, o en una segunda aproximación como el producto de la longitud de la red vial de una región y el tránsito promedio diario anual que transita por ésta.

Cuando se tiene información escasa de la actividad de transporte terrestre por carretera la expresión para estimar las emisiones de contaminantes atmosféricos a utilizar es la Ecuación (1.1). De esta manera el factor de actividad se representa con los kilómetros recorridos anualmente por un vehículo, los cuales se pueden establecer con encuestas a conductores, información de centros de diagnóstico automotor, estadísticas de empresas de transporte, información de portales web de venta de vehículos, entre otros.

$$E_{ij} = N_j * FE_{ij} * K_j \text{ (Ecuación 1.1)}$$

Donde:

E_{ij} : Emisiones totales del contaminante i generado por los vehículos de categoría j (gr/año)

N_j : Cantidad de vehículos de categoría j (vehículos)

FE_{ij} : Factor de emisión del contaminante i del vehículo de categoría j (gr/km-veh)

K_j : Kilómetros recorridos anualmente por los vehículos de tipología j (km/año)

De otra parte, si existe información robusta de la actividad de transporte terrestre por carretera en una región, la formulación matemática a emplear será la Ecuación (1.2). En esta aproximación el factor de actividad se construye a partir de datos detallados de tráfico, principalmente el tránsito promedio diario, caracterización de la red vial y días de operación en vía.

$$E_{ij} = FE_{ij} * TPD_{jv} * D_j * L_v \text{ (Ecuación 1.2)}$$

Donde:

E_{ij} : Emisiones totales del contaminante i generado por los vehículos de categoría j (gr/año)

FE_{ij} : Factor de emisión del contaminante i del vehículo de categoría j (gr/km-veh)

TPD_{jv} : Tránsito promedio diario de los vehículos de categoría j en el tipo de vía v (vehículos/día)

D_j : Cantidad de días en que el vehículo de categoría j circula por la red vial (días/año)

L_v : Longitud del tipo de vía v (kilómetros)

1.4.1 Metodología meso para el cálculo emisiones de contaminantes atmosféricos

Debido a que gran parte de los métodos para la estimación de emisiones por fuentes móviles están orientados a países desarrollados solicitando gran esfuerzo de capital humano, alta inversión de recursos económicos y tiempo, en Vietnam (Ho et al., 2014; Ho & Clappier, 2011) se planteó una metodología meso para mejorar la gestión de la calidad del aire principalmente en países en desarrollo. La utilización de esta aproximación genera un inventario de emisiones atmosféricas detallado a partir de pocos parámetros de entrada.

La metodología mesoscópica combina los enfoques *Top-Down* y *Bottom-Up*, para el desarrollo de ésta se clasifican las vías del área geográfica según la velocidad y función de la vía. Es así como a las vías de cada categoría se le asocian características macro constantes como el volumen vehicular (factor de actividad) y un factor de emisión, este último se establece a partir de la composición vehicular en el área de estudio y una velocidad medida en una muestra de vías de cada categoría. A pesar de que se utilicen datos homogéneos para las diferentes vías de una misma categoría, en lugar de caracterizar cada vía en específico, los resultados han mostrado que no hay afectación en la precisión de los resultados. Lo anterior se cumple siempre que la composición vehicular se conserve constante en el tiempo y el espacio (Ho et al., 2014).

En este sentido, al multiplicar el factor de emisión, el volumen vehicular y la longitud de cada tipo de vía se obtienen las emisiones atmosféricas por categoría de vía, y al sumar éstas se tienen las emisiones totales generadas por el transporte terrestre en un área geográfica determinada. De otra parte, es posible realizar una desagregación espacio temporal de las emisiones fragmentando el área geográfica en porciones iguales denominadas celdas, es así como la distribución temporal se realiza a partir de la variación de los flujos vehiculares en el día, mientras que la distribución espacial considera la longitud de vías de cada categoría en cada una de las celdas.

Con el enfoque *Bottom-Up* se estiman emisiones desagregadas partiendo de una gran cantidad de información y en la aproximación *Top-Down* se requiere menos información y los resultados obtenidos son emisiones agregadas, considerando lo descrito anteriormente la metodología meso se define por un carácter mixto al utilizar pocos insumos y generar resultados de emisiones agregadas o desagregadas con bajas incertidumbres. Por tal razón, para el desarrollo de esta tesis se acogió parte de este planteamiento metodológico al estimar los factores de actividad para agrupaciones de departamentos como se presenta con mayor detalle en el capítulo 2.

1.4.2 Modelos para la estimación de factores de emisión por fuentes móviles

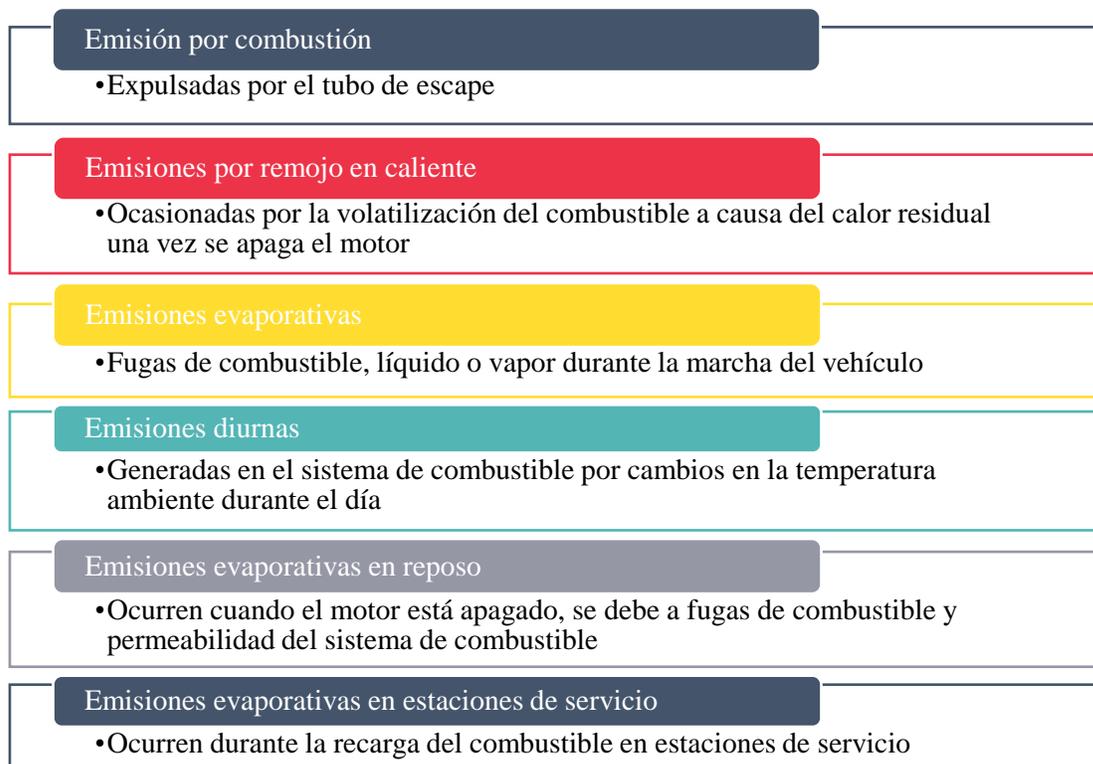
El factor de emisión por fuentes móviles representa la cantidad emitida de cierto contaminante generada por un vehículo durante su desplazamiento, de ahí que sus unidades se expresan en gramos/kilómetro. Mientras que los factores de emisión para los GEI representan las emisiones generadas por el consumo de combustible del vehículo, se representa en unidades de masa por unidad de energía consumida, lo anterior porque un sistema debe alcanzar el balance de materia y

energía, en el que las entradas y las salidas sean equiparables, en el caso del transporte terrestre las entradas son los componentes del combustible, y las salidas son las emisiones.

Las emisiones generadas por los vehículos se distinguen en seis categorías, ver Figura 1-13.

Como se identificó previamente (ver Figura 1-12) los factores de emisión se pueden establecer con estimaciones directas o indirectas. En Colombia se han realizado ejercicios de estimación directa para establecer los factores de emisión por fuentes móviles. Así, en Bogotá se desarrolló una campaña de medición de emisiones, y se establecieron los factores de CO₂, CO, NO_x, THC, PM para 32 categorías vehiculares (Secretaría Distrital de Ambiente, 2010). En tanto, en el Área Metropolitana de Valle de Aburrá (Universidad de Antioquia, 2016, 2018) se definieron los factores de emisión de los contaminantes CO, CO₂, THC, NO_x, PM para vehículos livianos y motocicletas en banco dinamométrico, así como de vehículos pesados con mediciones en ruta.

Figura 1-13. Tipos de emisiones vehiculares



Fuente. Elaboración propia

A nivel nacional, la UPME (2016) desarrolló una herramienta tecnológica denominada calculadora FECOC para facilitar el cálculo de emisiones de GEI, en la que se incorporan factores de emisión

para los combustibles colombianos de uso industrial. Así mismo, en la actualidad la UPME busca establecer los factores de emisión por fuentes móviles en Colombia a través de medición directa en campo, dicha estimación se encuentra en fase de ejecución por tanto sus resultados no se incluyeron en esta investigación.

Para la construcción de inventarios de emisiones se prefiere la consideración de factores de emisión medidos en la región de análisis, debido a que éstos representan adecuadamente la calidad del combustible y las variables locales de la zona. Sin embargo, cuando no se dispone de éstos, la guía colombiana para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas (MADS, 2017a) sugiere la adopción de factores de referencia compilados por agencias ambientales internacionales, como la EPA, la EEA, el IPCC, o utilizar métodos de estimación indirecta.

En la Tabla 1-6 se presentan los modelos principales de estimación indirecta de factores de emisión por fuentes móviles, identificando la descripción general, las ventajas, las desventajas y los contaminantes que permite calcular cada modelo. Es importante destacar que para la aplicación de estos modelos no se realizan mediciones directamente en la fuente de emisión, sino que se realizan aproximaciones con algoritmos de correlación.

1.4.3 Inventarios de emisiones por fuentes móviles en Colombia

En Colombia se han realizado estimaciones de emisiones por fuentes móviles a nivel regional y nacional utilizando diferentes modelos para el cálculo de factores de emisión, variables para establecer los factores de actividad y aproximaciones metodológicas (*Bottom-up*, *Top-Down*). Cabe destacar que la diversidad de métodos para la construcción del inventario de emisiones depende de las particularidades de la flota vehicular, la facilidad de acceso a la información, la financiación disponible, la dimensión de la zona objeto de estudio, entre otros.

Los datos para la construcción de un inventario de emisiones por fuentes móviles varían de acuerdo con el grado de complejidad de la metodología, generalmente la información proviene tanto de entidades públicas como privadas. Dentro de las instituciones públicas están el INVIAS, la ANI, el RUNT, el Ministerio de Transporte, la UPME, las secretarías de movilidad, las corporaciones autónomas regionales, entre otros. En el sector privado se tienen a los centros de diagnóstico automotor (CDA), las ensambladoras de vehículos, los gremios transportadores, las empresas de transporte público, entre otros.

Tabla 1-6. Modelos para el cálculo de factores de emisión por fuentes móviles

MODELO	DESCRIPCIÓN GENERAL	VENTAJAS	DESVENTAJAS	CONTAMINANTES CONSIDERADOS
Mobile 6	Desarrollado por la EPA, considera resultados de pruebas estándar en chasis dinamométrico y mediciones en campo. Calcula emisiones por tubo de escape y evaporativas. Establece ocho categorías vehiculares	<ul style="list-style-type: none"> • Amplia gama de contaminantes • Incorpora factores locales 	<ul style="list-style-type: none"> • Pocas categorías vehiculares • Uso exclusivo para vehículos construidos bajo estándares estadounidenses 	HC, CO, NO _x , CO ₂ , PM, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Zn, SO ₂ , NH ₃ , C ₆ H ₆ , C ₄ H ₆ , CH ₂ O, C ₂ H ₄ O, C ₃ H ₄ O,
MOVES	Desarrollado por la EPA. Considera la tipología, velocidad y pendiente de la vía	Contiene patrones de conducción (ralentí, frenado, entre otros)	Requiere información detallada	HC, CO, NO _x , CO ₂ , PM, SO ₂ , NH ₃ , CH ₄ , N ₂ O
IVE	Desarrollado por la EPA y la Universidad de Riverside como herramienta más ajustada para países en vías de desarrollo. Calcula emisiones de tubo de escape y evaporativas. Clasifica los vehículos en más de 300 categorías e incluye patrones de conducción	<ul style="list-style-type: none"> • Robusta clasificación vehicular • Pertinente para países en vías de desarrollo • Incluye patrones de conducción 	<ul style="list-style-type: none"> • Las experiencias internacionales sugieren que el modelo sobreestima las emisiones • La emisión estimada corresponde al promedio del recorrido 	CO, NO _x , CO ₂ , PM, C ₆ H ₆ , C ₄ H ₆ , CH ₄ , N ₂ O, COV, CHO
COPERT	Desarrollado por la EEA. Calcula emisiones del vehículo por tubo de escape, arranque en frío, evaporación y desgaste de neumáticos y frenos. Clasificación vehicular según estándares de emisiones europeos (normas EURO)	Permite establecer factores para diferentes tipos de emisiones vehiculares	<ul style="list-style-type: none"> • Se diseñó para vehículos fabricados con la legislación europea • Es necesario conocer el estándar EURO del vehículo 	CO, NO _x , CO ₂ , PM, Pb, Cd, Cr, Cu, Ni, Se, Zn, SO ₂ , NH ₃ , CH ₄ , N ₂ O, COV, HAP, COP
HC: Hidrocarburos	CO: Monóxido de carbono	NO _x : Óxidos de nitrógeno	CO ₂ : Dióxido de carbono	PM: Material particulado
Pb: Plomo	Cd: Cadmio	Cr: Cromo	Cu: Cobre	Ni: Níquel
Se: Selenio	Zn: Zinc	SO ₂ : Dióxido de azufre	NH ₃ : Amoniacó	C ₆ H ₆ : Benceno
C ₄ H ₆ : Butadieno	CH ₂ O: Formaldehído	C ₂ H ₄ O: Acetaldehído	C ₃ H ₄ O: Acroleína	CH ₄ : Metano
CH ₄ : Óxido nitroso	COV: Compuestos orgánicos volátiles	CHO: Aldehídos	HAP: Hidrocarburos aromáticos policíclicos	

Fuente. Elaboración propia

A continuación, se describen las aproximaciones realizadas en Colombia a nivel municipal, regional y nacional para la estimación de emisiones por fuentes móviles.

- **Colombia**

A nivel nacional existe el inventario de emisiones atmosféricas 2010-2014 (IDEAM, 2020). La metodología y los factores de emisión fueron extraídos de la guía técnica para la elaboración de inventarios nacionales de emisiones publicada por la EPA, metodología que se exige a los países de la Unión Europea para la presentación de sus informes anuales de contaminación atmosférica y está en concordancia con las directrices del IPCC.

Los insumos utilizados para el enfoque *Top-Down* fueron la cantidad de vehículos por categoría y norma de emisión EURO de los vehículos activos según el RUNT, el consumo anual de combustibles fósiles obtenido del informe de balance energético de la UPME y el kilometraje recorrido anualmente por cada tipología vehicular. Así, se estimaron las toneladas de PM_{2.5}, BC, CO, NO₂ y SO₂, emitidas anualmente por el transporte terrestre para el período 2010-2014.

De otra parte, es importante acotar que actualmente se encuentra en fase de entrega final una tesis de maestría que pretende realizar la desagregación espacio temporal de las emisiones provenientes de fuentes móviles en Colombia para el año base 2017 (Méndez, 2022).

- **Área Metropolitana de Valle de Aburrá (AMVA)**

Desde el 2009 se han construido seis inventarios de emisiones atmosféricas para el AMVA, 2009, 2011, 2013, 2015, 2016 y 2018. En esta región se han actualizado continuamente los inventarios para direccionar las medidas que permitan la reducción de contaminación y así disminuir las alertas rojas de calidad del aire. Tradicionalmente, para la estimación de emisiones por fuentes móviles en el AMVA se ha utilizado el enfoque *Top-Down* y la metodología LEAP. Los factores de emisión se estimaron indirectamente con el modelo IVE y se aplicaron factores de corrección según las condiciones locales. Sin embargo, es importante señalar que en los últimos años se han establecido factores de emisión regionales con mediciones en campo.

Los datos de entrada para el último inventario (2018) fueron la cantidad de vehículos por tipo, tamaño, combustible y tecnología del motor registrados en las diferentes secretarías de tránsito y transporte del AMVA, bases de datos de los CDA del AMVA, vehículos vendidos en el año base, los kilómetros recorridos por cada tipología vehicular establecidos con las bases de datos del

transporte público colectivo e individual, información del gremio de transporte de carga y las ventas de combustibles en la región especificado por la UPME y EPM¹. De esta manera se estableció la contaminación atmosférica ocasionada anualmente por el transporte terrestre, específicamente de los contaminantes VOC, CO, NO_x, PM_{2.5}, NH₃, N₂O, CH₄, CO₂ y SO_x.

De otra parte, en Envigado, uno de los municipios que compone el AMVA, se estimaron las emisiones horarias y diarias de CO, NO_x, SO₂, PM₁₀ y COV provenientes de fuentes móviles para el año 2010 (Londoño et al., 2011). El factor de actividad se calculó a partir de los vehículos matriculados en el municipio, aforos vehiculares y patrones de actividad vehicular. Mientras que los factores de emisión se establecieron con el método IVE y se ajustaron a las condiciones particulares del municipio.

- **Manizales**

Con el enfoque *Top-Down* se realizó la desagregación espacio temporal del inventario de emisiones por fuentes móviles para el año 2014 (Universidad Nacional de Colombia, 2016). Los factores de emisión se estructuraron con el modelo IVE, el cual asigna un nivel de emisión según la potencia específica del motor, y considera las emisiones vehiculares en ruta y aquellas que se ocasionan durante el proceso de encendido del motor.

Los insumos utilizados fueron: i) la cantidad de vehículos establecidos por datos de la Secretaría de Tránsito, los CDA y las empresas de transporte público; ii) las características de la red vial por información de la Secretaría de Planeación, iii) encuestas aplicadas a conductores de vehículos particulares, motos y taxis para establecer las tecnologías vehiculares y los kilómetros recorridos en promedio por día; iv) conteos vehiculares con vídeos y v) patrones de conducción establecidos con datos de sistema de posicionamiento global de recorridos realizados en campañas de campo. Como resultado, se obtuvo la cantidad de toneladas de CO, VOC, NO_x, SO_x, PM₁₀, CO₂, N₂O y CH₄ emitidas por el transporte terrestre en el 2014, y los kilogramos de estos contaminantes emitidos en cada hora del día en la ciudad, con una resolución espacial de un kilómetro cuadrado.

¹ Empresas Públicas de Medellín

- **Bogotá**

En el 2009 (Universidad de los Andes, 2009) se construyó el inventario base para diseñar el plan decenal de descontaminación del aire para Bogotá con el enfoque *Bottom-Up*. Los factores de emisión utilizados se estimaron en una campaña de campo, en la que se realizaron mediciones directas de emisiones en más de 200 experimentos. El factor de actividad utilizado fue los kilómetros recorridos anualmente por los vehículos, los cuales se establecieron con encuestas, aforos vehiculares e información de vehículos en venta de la revista Motor.

Para el 2014 se estimaron las emisiones de CO₂, CO, NO_x, VOC, PM_{2.5} y SO₂ para Bogotá. En este estudio se utilizaron factores de emisión contruidos para la ciudad a partir de la utilización del modelo MOVES que considera características del combustible, perfiles de velocidad y meteorología, los cuales se contrastaron con los factores de emisión establecidos por la Secretaría Distrital de Ambiente. Además, se utilizó información local de la actividad vehicular y características de la composición del parque automotor (Ramírez et al., 2019).

De otra parte, se realizó una estimación de alta resolución de un inventario de emisiones por fuentes móviles en Bogotá para el 2015 (Mangones et al., 2019). Se consideró un modelo de asignación de tránsito que integra un modelo de red vial, matrices de demanda de transporte y datos de tráfico real. Adicionalmente, se utilizó información de composición vehicular, características del combustible, y tres factores de emisión: IVE, COPERT y un modelo desarrollado previamente para Bogotá. Así, se obtuvo la desagregación de emisiones de los contaminantes criterio CO, SO₂, VOC, NO_x y PM₁₀ por tipo de vehículo y hora del día.

Posteriormente se establece el inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de Bogotá (Secretaría Distrital de Ambiente, 2020) para el año base 2018, éste utilizó tanto la aproximación *Bottom-Up* como la *Top-Down*. Algunos factores de emisión considerados se calcularon para Bogotá con uso del software MOVES, y otros se midieron en campo. Los insumos del modelo fueron la composición vehicular, la matriz origen-destino de carga, los reportes de los CDA y la información brindada por los operadores de transporte público. Así, se estableció la distribución espacio temporal de emisiones anuales de CO, NO_x, PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂ y VOC.

- **Cartagena**

En el 2019 se estimaron los factores de emisión asociados a fuentes móviles en varias zonas de Cartagena (Álvarez Narváez et al., 2019). A diferencia de los estudios descritos anteriormente, en los que a partir de factores de emisión y factores de actividad se realiza una aproximación a las emisiones totales, en éste se realizaron mediciones de contaminación atmosférica in situ y utilizando la modelación inversa se establecieron los factores de emisión por fuentes móviles de CO y PM_{2.5}, para lo cual se consideraron las áreas de Cartagena con mayor congestión vial, así como las condiciones meteorológicas y la morfología urbana de la ciudad.

1.5 Proyección de inventarios de emisiones

Un inventario de emisiones presenta la estimación de emisiones GEI o contaminantes criterios generados por una fuente en un período de tiempo específico, generalmente un año al cual se conoce como año base. A pesar de que la información de un año base es valiosa, con frecuencia resulta necesario conocer las emisiones futuras para apoyar la toma de decisiones, es así como el proceso de estimaciones futuras se conoce como proyección de inventarios de emisiones.

Las proyecciones de emisiones, así como los inventarios de emisiones, son el producto de factores de actividad y factores de emisión, en la Ecuación (1.3) se presenta la formulación matemática básica para la proyección de emisiones futuras. En ésta se aplica un factor de crecimiento a la actividad con variables como el PIB, estadísticas de población, uso de combustible, cambios en patrones de uso de la tierra o ingresos anuales, y respecto al factor de emisión, se revisa la pertinencia de mantenerlo constante según los cambios tecnológicos previstos para el futuro. Es importante acotar que por la cantidad de variables que intervienen en la proyección de emisiones por fuentes móviles, no es apropiado aplicar la metodología simple de la Ecuación (1.3).

$$E_n = (FC_n * FA_p) * FE_n \text{ (Ecuación 1.3)}$$

Donde:

En: Emisión estimada para el año proyectado n

FCn: Factor de crecimiento de la actividad desde el año inicial hasta el año proyectado n

FA_p: Factor de actividad para un año histórico seleccionado para el inicio de la proyección

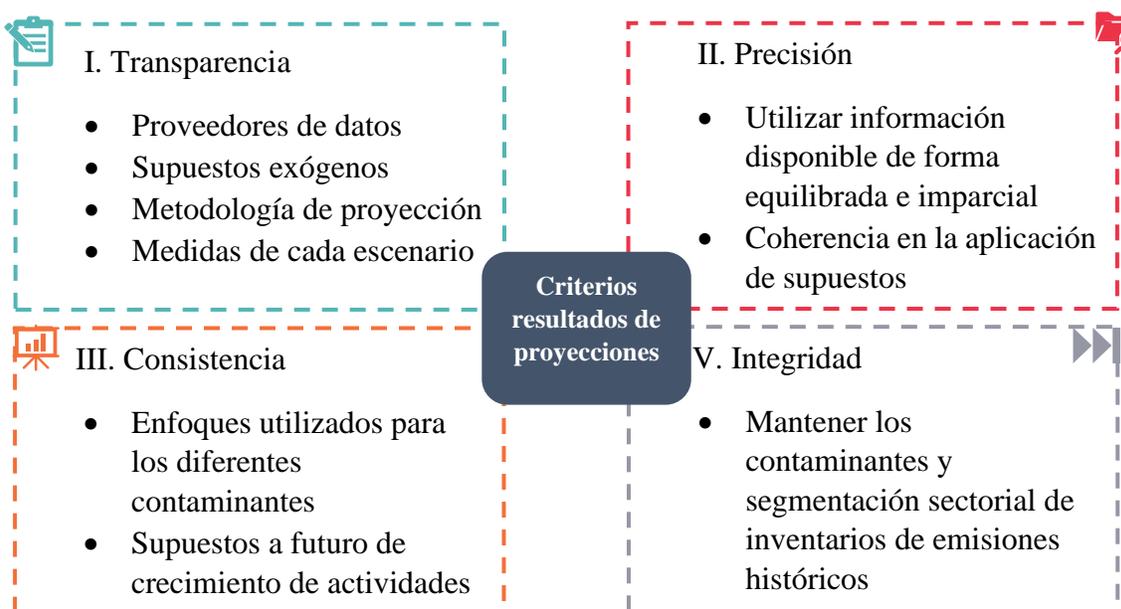
FE_n: Factor de emisión apropiado de la fuente en su conjunto para el año n

En la proyección de inventarios de emisiones futuras frecuentemente se consideran tres elementos:

i) El aumento económico de una región geográfica, puesto que se ha demostrado que tiene consecuencias directas en las emisiones generadas por las actividades de un territorio, ii) El crecimiento demográfico en un área geográfica, porque el aumento de la población implica mayor demanda de bienes y servicios y esto a su vez se traduce en variaciones de las emisiones. iii) Series de tiempo del inventario de contaminantes o de las variables utilizadas para su cálculo, las cuales proporcionan información de las tendencias históricas.

El resultado de las proyecciones es la cantidad de emisiones de GEI o contaminantes criterios generados por una fuente en un área geográfica para un período de tiempo determinado. Es importante garantizar que los resultados de las proyecciones satisfagan los cuatro criterios identificados en la Figura 1-14. La transparencia, que hace referencia a brindar toda la información para la revisión independiente de los datos. La precisión, enfocada a eximir de errores la proyección al validar métodos y supuestos. La consistencia entre las proyecciones y los datos históricos. La integridad orientada a conservar la desagregación de las emisiones históricas.

Figura 1-14. Criterios de los resultados de las proyecciones de inventarios de emisiones



Fuente. Elaboración propia a partir de (EEA, 2019)

La Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2019) ha establecido recomendaciones para desarrollar la proyección de inventarios de emisiones, así:

- No sobreestimar ni subestimar las estimaciones para años individuales ni las tendencias históricas.
- Estimación coherente, lo cual se refiere a utilizar la misma metodología o fuentes de datos comparables en todos los años, en caso contrario se considera una buena práctica la documentación detallada de los cambios en métodos y bases de datos.
- Se debería conservar el mismo nivel de desagregación para toda la serie de tiempo, lo anterior para preservar la coherencia y permitir la comparación entre los años que componen una serie de tiempo.
- En términos generales se considera que los factores de emisión no se modifican con el tiempo y por tanto se utiliza al último factor de emisión histórico en las proyecciones futuras, a menos que se den avances tecnológicos, regulaciones ambientales o variaciones en los componentes del combustible que propicien un ajuste a los FE.
- Las estimaciones a futuro deben extrapolarse a partir de los datos disponibles, y éstas deben realizarse con los datos estadísticos que mejor expliquen las variaciones temporales según la fuente de emisión.
- Para los casos en que no se tenga información histórica de una variable y se requiera acudir a datos sustitutos, es pertinente confirmar la relación entre los datos disponibles y los sustitutos a través de una correlación estadísticamente significativa.
- Cuando las series de tiempo tengan datos faltantes, éstos se pueden aproximar para los casos en los que se identifican tendencias estables, a través de extrapolación lineal, extrapolación no lineal u otras técnicas.
- En el caso de que se tengan datos faltantes en una serie de datos y se identifica alta variación de un año a otro, la recomendación será acudir a conjuntos de datos sustitutos.
- Generalmente en los planes del gobierno se tienen proyecciones oficiales que permitirían proyectar los factores de actividad, en caso de no contar con estos, se requieren adecuadas estimaciones y de ser posible el criterio de expertos.

- Las proyecciones no se catalogan como predicciones, por esto no se espera que las proyecciones coincidan rigurosamente con los inventarios futuros, a no ser que todas las consideraciones utilizadas en cada escenario se hagan realidad.
- Se prefieren los conjuntos de datos del gobierno nacional sobre otras fuentes nacionales o internacionales de información, adicionalmente, la complejidad de las proyecciones dependerá de la disponibilidad de los datos y de la capacidad técnica del equipo.
- Cuando no se disponga de factores de emisión, tal es el caso de las tecnologías emergentes, estos se aproximarán considerando la opinión de expertos o se asumirán los valores límites regulados en la industria.

1.5.1 ¿Cómo estructurar los escenarios de proyección?

Las proyecciones de los inventarios de emisiones constituyen una herramienta esencial en la evaluación de que sucedería ante diversas circunstancias. Las emisiones proyectadas deberían reflejar impactos de estrategias y políticas para valorar su alcance en la reducción de emisiones.

Por lo anterior, las proyecciones incluyen una serie de supuestos concernientes con impactos de tecnologías emergentes, niveles de actividad, crecimiento económico, reducción de impuestos, crecimiento industrial, entre otras medidas y políticas a nivel nacional o internacional, a cada agrupación de supuestos se le denomina escenario.

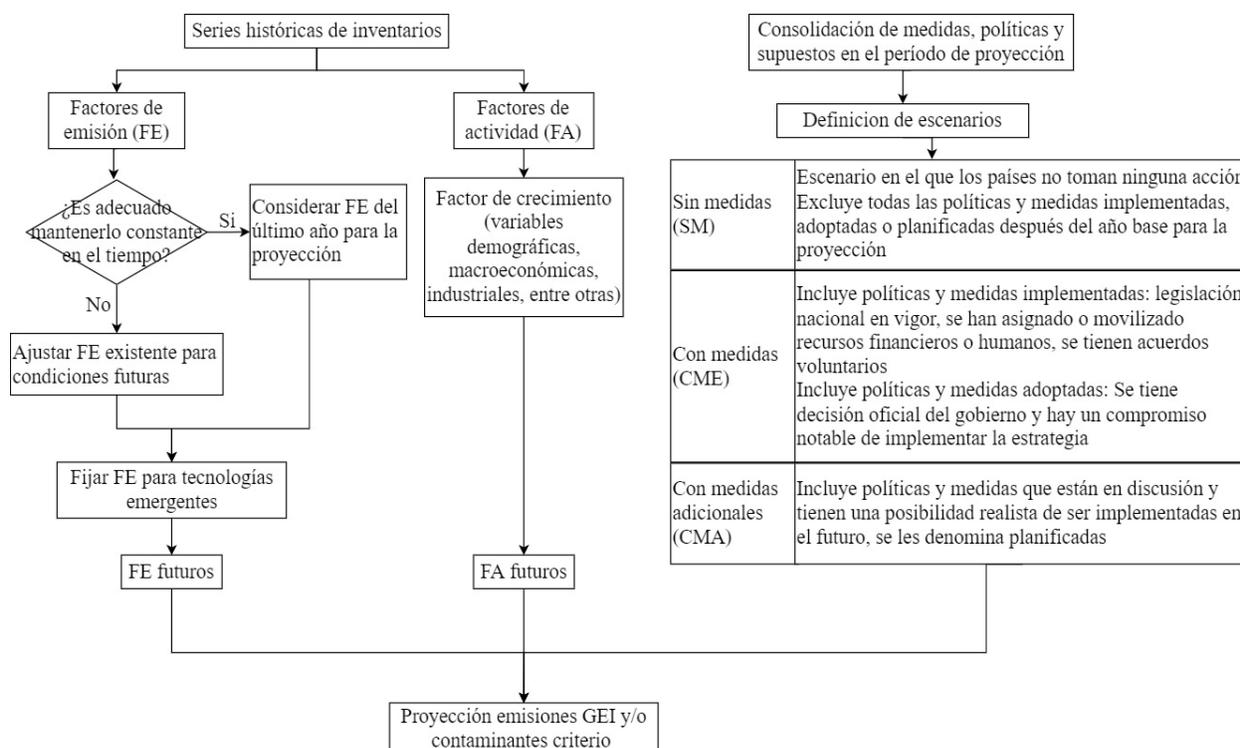
En la estructuración de escenarios es vital revisar las políticas y medidas a vincular, las cuales podrán ser: i) planificadas, que aún no están registradas en la legislación formal, pero están en discusión; adoptadas como las políticas y medidas que han sido convenidas y están documentadas en la política formal; ii) implementadas, medidas con las que se ha tomado alguna acción.

En la Figura 1-15 se presenta la estructura metodológica básica para la proyección de emisiones a futuro en diferentes escenarios. Se entiende por series históricas al conjunto global de datos de aquellas variables que permitieron la estimación de inventarios de emisiones. De otra parte, se consideran como factores de crecimiento de la actividad a las proyecciones económicas y/o demográficas exógenas de un área geográfica, tales como el producto interno bruto, el crecimiento poblacional, aumento flota vehicular, los ingresos anuales, entre otros.

1.5.2 ¿Cuáles son las particularidades de proyección de emisiones para el transporte terrestre por carretera?

Como se destacó anteriormente, para las emisiones por fuentes móviles no es pertinente utilizar la metodología simplificada de proyección de emisiones que se presentó en la Ecuación 1.3. Típicamente los modelos de emisiones asociados con el sector transporte terrestre están vinculados a variables macroeconómicas y demográficas de un país, las cuales son difíciles de sintetizar en un único factor de crecimiento. Adicionalmente, se requiere una coherencia entre las proyecciones nacionales de emisiones GEI y contaminantes criterio, para lo cual se deben considerar las mismas proyecciones oficiales con los conjuntos de datos históricos de actividad.

Figura 1-15. Estructura metodológica para la proyección de emisiones



Fuente. Elaboración propia a partir de (EEA, 2019)

A continuación, se presentan las particularidades a considerar en las proyecciones de emisiones por tubo de escape del sector transporte terrestre establecidas a partir de las recomendaciones de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2019).

- Parque automotor: Composición, distribución por edades y tasas de supervivencia
 - i) Se deben considerar los datos históricos de venta de vehículos nuevos y los registros de matrículas vehiculares y así establecer: Vida útil o tasa de supervivencia, variación

en las tasas de supervivencia vehicular con la edad, distribución del parque automotor por edad promedio.

- ii) Es relevante considerar medidas adicionales nacionales que puedan interferir con el desarrollo del parque automotor, tales como incentivos a la chatarrización, zonas geográficas para circulación de vehículos con bajas emisiones, entre otras.
- Parque automotor: Proyecciones de ventas de vehículos nuevos
 - i) Es adecuado considerar la cantidad total de vehículos nuevos vendidos, la tecnología y combustibles de éstos.
 - ii) Las proyecciones de esta variable podrían estimarse con factores macroeconómicos (PIB, aumento de renta disponible de hogares), factores demográficos (población, número de hogares) o tendencias históricas de la venta de vehículos nuevos.
 - iii) Las ventas de vehículos deben considerarse para cada categoría de vehículo establecido en el inventario de emisiones base (agregación de clases), más no para la cantidad de clases establecida en la base de registro de matrículas vehiculares.
 - iv) La proyección en ventas vehiculares de combustible y tecnología nuevos se puede realizar a partir de datos de PIB per cápita, incentivos gubernamentales implementados u oferta de infraestructura de recarga de vehículos eléctricos.
 - v) En un mayor nivel de detalle, es pertinente evaluar el potencial de reemplazo de energías convencionales de vehículos antiguos por tecnologías de baja emisión de vehículos nuevos.
- Factor de actividad: Kilometraje del vehículo
 - i) Se puede asumir que el kilometraje recorrido anualmente por un vehículo de cierta categoría vehicular (según la agregación del inventario para el año base) no tendría variaciones en los años futuros.
 - ii) El total de kilómetros recorridos por categoría vehicular variará con la cantidad de vehículos de cada categoría en el parque automotor.
- Factor de actividad: Kilometraje del vehículo por edad
 - i) Generalmente el kilometraje recorrido anualmente disminuye con la edad del vehículo.
 - ii) La mayor actividad de vehículos en carretera se concentra en aquellos más nuevos.

- iii) El cambio relativo en el kilometraje con la edad del vehículo se puede establecer con datos estadísticos de programas nacionales de inspección de vehículos como la revisión vehicular mecánica y gases o revisión técnico mecánicas reglamentada en el país.
- Factor de actividad: Proyección de ventas de combustibles
 - i) Es una guía importante respecto a los cambios en actividades vehiculares futuras, considerando el equilibrio energético descrito anteriormente se pueden calibrar los valores de kilómetros recorridos anualmente por un vehículo.
 - ii) Típicamente se supone que todo el combustible reportado por la entidad oficial de energía como vendido se consume al interior del territorio nacional, lo cual puede ser crítico en países con fronteras terrestres extensas y concurridas.
 - Factor de emisión: Tecnologías vehiculares actuales y convencionales
 - i) Prevalecerán los factores de emisión establecidos en el área geográfica objeto de análisis, sin embargo, en ausencia de éstos se acudirá a métodos de estimación indirecta con herramientas producidas por instituciones internacionales con trascendencia investigativa como la EPA, la EEA o el IPCC.
 - ii) Permanecerán constantes para las proyecciones, excepto en los casos en los que existan razones tecnológicas para actualizarlos.
 - Factor de emisión: Tecnologías de vehículos alternativas y no convencionales
 - i) Los vehículos eléctricos de batería o enchufables y aquellos que utilizan pila de combustible de hidrógeno no tienen emisiones de escape, sin embargo, durante su operación se generan emisiones de partículas que no se vinculan con el tubo de escape.
 - ii) En el caso de vehículos híbridos, se debe revisar la utilización de cada tecnología y establecer un factor de proporción, el cual se asociará al factor de emisión de la tecnología convencional. Es decir, si un vehículo híbrido utiliza la tecnología alternativa un 30% del tiempo y el restante (70%) hace uso de la tecnología convencional, a este vehículo se le puede asociar un factor que corresponda al 70% del factor de emisión de la tecnología convencional del vehículo, lo anterior porque se consideraría que en un 70% del desarrollo de las actividades diarias del vehículo se generarían emisiones por tubo de escape.

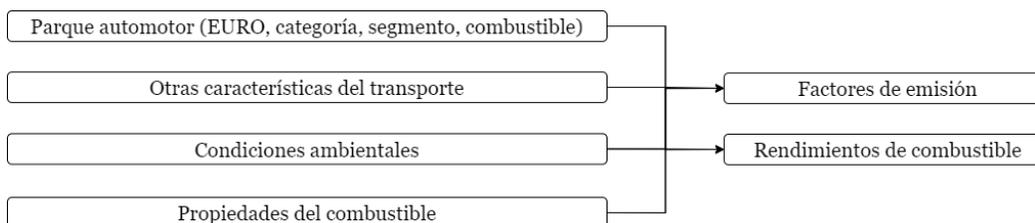
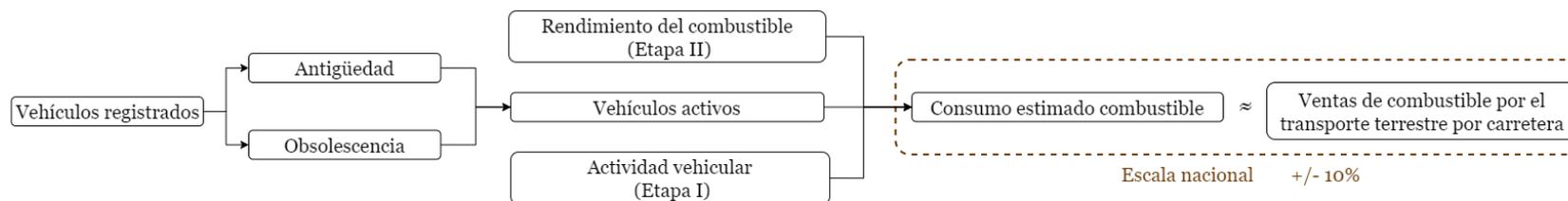
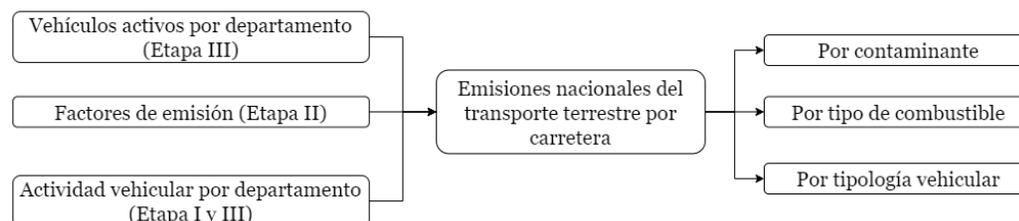
2. Emisiones del transporte terrestre por carretera en Colombia año base 2019

En este capítulo se cuantifican las emisiones de contaminantes atmosféricos y GEI generadas por el transporte terrestre por carretera en Colombia para el año base 2019 a partir de la aproximación metodológica de la Ecuación (1.1). En la Figura 2-1 se relacionan las cuatro etapas que constituyen la estructura metodológica para la construcción del inventario.

En la primera etapa se estiman los factores de actividad del sector transporte, a partir de fuentes de información alternativas como los registros de los portales web de venta de vehículos e información de las revisiones técnico mecánicas realizadas en los centros de diagnóstico automotor (numeral 2.1). Luego, se estiman los factores de emisión por departamento según características del transporte, condiciones ambientales y propiedades del combustible (numeral 2.2).

En una tercera etapa se realiza una aproximación a los vehículos activos. Además, junto con la actividad vehicular y los rendimientos de combustible estimados en COPERT se calcula el consumo nacional de combustibles fósiles, y al comparar este con las cifras oficiales de ventas (conciliación consumo y ventas) se validan los factores de actividad y el stock vehicular (numeral 2.3). Por último, en la cuarta etapa confluyen los factores de emisión, la actividad vehicular y la cantidad de vehículos activos (previamente validados) para establecer las emisiones de los contaminantes analizados por departamento, las cuales se compilan para establecer las emisiones nacionales del transporte terrestre por carretera (numeral 2.4).

El capítulo 2 se estructura en cuatro subcapítulos: primero se relaciona el método utilizado para establecer la actividad del transporte terrestre por carretera a nivel departamental. En la segunda parte se determinan los factores de emisión de CO, NO₂, PM_{2.5}, SO₂, CO₂ y BC para las tipologías vehiculares considerando el software COPERT v.5.5.1. Luego se estructura la caracterización del parque automotor registrado en Colombia y la aproximación a vehículos activos, además se validan los resultados con la conciliación de consumos y ventas de los combustibles fósiles. Finalmente se identifican las emisiones nacionales generadas por la operación del transporte terrestre por carretera para el año 2019 cuantificadas por tipo de combustible, categoría vehicular y contaminante.

Figura 2-1. Estructura metodológica para la estimación de las emisiones generadas por el transporte terrestre por carretera**Etapa I: Estimación actividad****Etapa II: Factores de emisión****Etapa III: Stock vehicular y validación****Etapa IV: Cálculo de emisiones**

Fuente. Elaboración propia

2.1 Factores de actividad

Como se destacó en el capítulo 1 los factores de actividad representan la intensidad de acción de la fuente que genera las emisiones, particularmente para la estimación del inventario de emisiones por el transporte terrestre por carretera en Colombia se eligió el producto de los kilómetros recorridos anualmente por una tipología vehicular y la cantidad de vehículos activos.

Para la escala nacional se podría establecer un único valor de kilómetros recorridos anualmente por cada tipología vehicular e imputar estos datos a todos los departamentos, sin embargo, esta estrategia se respalda en un argumento grueso de que todos los vehículos del país independientemente de la región presentan la misma actividad. También se podrían determinar los kilómetros recorridos anualmente por un vehículo en cada departamento, no obstante, se requiere una gestión ardua para obtener la información a ese nivel de detalle.

Por lo anterior, se considera que la aproximación más factible para la obtención de factores de actividad en la construcción de un inventario nacional de emisiones se obtiene al realizar agrupaciones de pequeñas unidades de estudio con características homogéneas entre sí, y determinar los kilómetros recorridos anualmente por tipología vehicular para cada uno de estos grupos, así los departamentos que formen parte de un grupo tendrán el mismo factor de actividad, esta estrategia se conoce como clusterización y se describe en los siguientes numerales.

2.1.1 Variables de clusterización

En la clusterización se deben incluir variables de los elementos relacionadas con el problema en cuestión, así, para el caso de las emisiones se consideraron características del transporte y variables socioeconómicas de los departamentos. A continuación, se describen las variables utilizadas en la clusterización siendo estas la red vial, los vehículos registrados, la población y las ventas de combustible, en el Anexo A se presentan sus valores.

- **Red vial**

La red vial nacional fue extraída de la plataforma OpenStreetMap (OSM), que es un proyecto colaborativo a nivel mundial existente desde 2004 para la creación de mapas editables y libres, el cual cuenta actualmente con 7.8 millones de usuarios registrados y 1.6 millones de usuarios colaboradores. Los mapas se construyen utilizando información geográfica que ha sido capturada

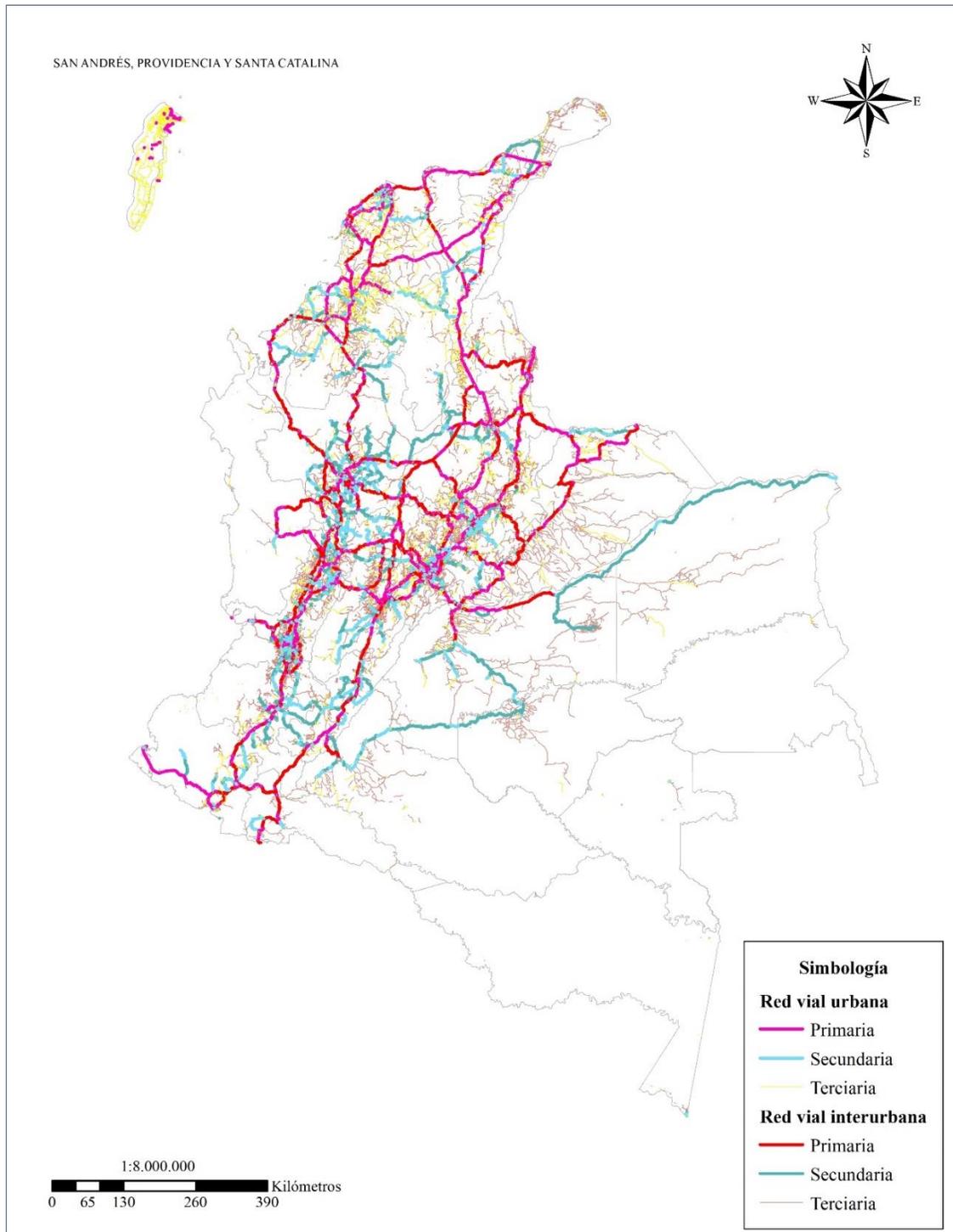
por la comunidad principalmente con sistemas de posicionamiento global (GPS) móviles y ortofotografías para crear y corregir datos vectoriales en las herramientas de edición. Los datos vectoriales de la base de datos de OSM son de uso libre por lo que la información disponible se distribuye con licencia abierta de bases de datos, por esto OSM se constituye como un gran repositorio de conocimiento local con información de gran utilidad para el desarrollo de proyectos.

La herramienta OSM permite la extracción de subconjuntos locales de información para un área geográfica específica, los datos se conservan en formato WGS84 tipo punto, polilínea o polígono con diferentes atributos que representan características asociadas al tipo de información. Los datos de OSM se pueden descargar desde su portal web o a través de los sistemas de información geográfica (SIG) como QGIS con el plugin *QuickMapServices* y ArcGIS con la extensión *ArcGIS Editor For OSM*. Al utilizar los SIG, los datos vectoriales de OSM pasan por un proceso de conversión interno para obtener como resultado un *shapefile* (formato geográfico estándar en SIG).

La información de red vial de Colombia se obtuvo utilizando un *shapefile* de departamentos y sectores urbanos en el plugin *QuickMapService* de QGIS obteniendo una red vial interurbana y urbana por departamento con la categorización de OSM, en la que cada línea representa una calzada de la vía. A partir de la jerarquía vial considerada por OSM y las características de la red vial colombiana se realiza un proceso de homologación el cual se presenta en el Anexo B, definiendo así cuatro categorías de red vial: primaria, secundaria, terciaria y urbana. De esta forma en la Figura 2-2 se identifica la red vial y en la Tabla 2-1 se presenta la longitud por categoría y departamento.

La longitud de la red vial de Colombia extraída y depurada como se identifica en la Tabla 2-1 está en concordancia con las estadísticas oficiales, pues en el informe estadístico Transporte en Cifras Vigencia 2019 (Ministerio de Transporte, 2019), para ese año Colombia contaba con 205,379 kilómetros de carretera de los cuales 17,958 corresponden a la red primaria. Con la depuración de información de OSM se obtuvo una red vial total de 171,799.4 kilómetros y una red primaria de 16,864.2 kilómetros, las cuales varían en un 16.4% y 6.1% respectivamente de las cifras oficiales del Ministerio. Es importante acotar que la diferencia en la red vial total se debe en parte a la incertidumbre de la red vial terciaria, de ahí que las instituciones del país estén trabajando en la consolidación de un inventario de red terciaria a nivel nacional (Departamento Nacional de Planeación, 2020; Observatorio Nacional de Logística, Transporte, 2022).

Figura 2-2. Red vial urbana e interurbana de Colombia



Fuente. Elaboración propia a partir de (OpenStreetMap, 2022)

Tabla 2-1. Red vial interurbana y urbana por departamento (kilómetros)

DEPARTAMENTO	RED INTERURBANA				RED URBANA				TOTAL GENERAL
	Primaria	Secundaria	Terciaria	Total interurbana	Primaria	Secundaria	Terciaria	Total urbana	
Amazonas	-	2.4	124.1	126.4	-	9.8	67.4	77.1	203.6
Antioquia	1,433.1	1,789.3	4,089.6	7,311.9	683.0	727.3	5,026.6	6,436.9	13,748.8
Arauca	157.7	68.4	1,054.0	1,280.0	167.4	70.5	876.4	1,114.3	2,394.3
Archipiélago de San Andrés y Providencia	-	-	-	-	5.3	0.2	211.1	216.6	216.6
Atlántico	134.2	131.1	689.7	954.9	281.2	193.7	3,196.2	3,671.0	4,625.9
Bogotá	5.1	30.6	416.8	452.5	838.1	474.0	6,087.7	7,399.8	7,852.2
Bolívar	252.5	132.3	1,813.3	2,198.1	267.8	153.1	3,535.1	3,956.0	6,154.1
Boyacá	738.5	241.5	5,606.1	6,586.1	377.2	326.2	2,429.4	3,132.8	9,718.9
Caldas	220.7	397.7	1,262.6	1,880.9	113.5	412.4	1,254.8	1,780.7	3,661.6
Caquetá	42.5	157.1	1,884.9	2,084.4	9.4	133.1	643.9	786.3	2,870.7
Casanare	279.2	13.2	4,292.0	4,584.4	84.9	24.4	1,166.4	1,275.7	5,860.1
Cauca	324.6	604.0	3,883.1	4,811.6	177.4	257.8	1,267.9	1,703.0	6,514.6
Cesar	312.1	71.5	1,435.4	1,818.9	547.3	197.1	3,146.3	3,890.6	5,709.6
Chocó	110.9	3.0	434.9	548.8	121.7	24.2	322.2	468.0	1,016.8
Córdoba	254.5	252.2	3,508.3	4,015.0	224.9	301.2	2,793.8	3,319.9	7,334.9
Cundinamarca	1,013.2	419.9	7,488.5	8,921.6	630.6	340.5	3,541.9	4,513.0	13,434.6
Guainía	-	-	34.7	34.7	-	-	56.1	56.1	90.8
Guajira	114.8	171.3	3,336.1	3,622.1	276.3	82.4	1,700.0	2,058.7	5,680.8
Guaviare	-	194.8	1,529.7	1,724.6	-	9.5	170.6	180.1	1,904.7
Huila	222.9	412.1	1,867.5	2,502.6	174.4	309.6	1,514.2	1,998.3	4,500.9
Magdalena	190.7	68.2	1,745.6	2,004.4	262.0	176.7	2,627.5	3,066.2	5,070.6
Meta	205.1	742.2	5,369.3	6,316.5	169.1	156.6	1,691.3	2,017.0	8,333.5
Nariño	209.6	121.4	1,555.9	1,886.9	329.1	218.6	1,382.6	1,930.3	3,817.2
Norte de Santander	454.2	32.9	2,575.9	3,063.1	307.4	54.3	2,032.1	2,393.8	5,456.9
Putumayo	227.1	9.0	749.4	985.4	78.2	84.0	342.4	504.6	1,490.0
Quindío	94.8	53.2	832.2	980.2	79.6	134.2	760.4	974.3	1,954.5
Risaralda	181.8	96.4	1,449.8	1,728.0	166.1	82.6	1,033.6	1,282.2	3,010.2
Santander	621.1	354.5	4,701.9	5,677.5	484.4	283.0	2,773.8	3,541.2	9,218.6
Sucre	101.7	91.2	1,363.1	1,556.0	199.7	109.7	2,446.4	2,755.8	4,311.8
Tolima	417.8	390.1	4,910.8	5,718.7	282.7	408.5	2,506.7	3,198.0	8,916.7
Valle del Cauca	775.3	513.6	7,028.4	8,317.3	430.3	497.5	5,089.4	6,017.2	14,334.6
Vaupés	-	-	97.3	97.3	-	-	31.1	31.1	128.4
Vichada	-	480.9	1,485.3	1,966.1	-	32.4	263.6	295.9	2,262.1
Total	9,095.4	8,045.7	78,616.1	95,757.1	7,768.8	6,284.8	61,988.7	76,042.3	171,799.4

Fuente. Elaboración propia a partir de Anexo B y (OpenStreetMap, 2022)

- **Vehículos registrados**

De la base de vehículos registrados en Colombia al año 2019 (15,428,671 registros), lo cual se presenta con mayor detalle en el numeral 2.2, se extrae el tamaño del parque automotor de cada departamento.

- **Población**

Los datos de población total por departamento se extrajeron de las proyecciones poblacionales 2018-2050 del Departamento Administrativo Nacional de Estadística estimadas con los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda – CNPV - 2018, en el que se estableció que para el 2019 la población colombiana era de 49,395,678 habitantes.

- **Ventas de combustibles**

La información de ventas de gasolina y diésel para el sector transporte fue suministrada por la UPME, a partir de lo contenido en la categoría de distribuidor minorista del Sistema de Información Minero Colombiano (SIMCO). Así, para el 2019 la UPME registró ventas al sector transporte de 1,993,535,024 galones de gasolina y 1,709,537,412 galones de diésel.

2.1.2 Clusterización de departamentos

Los clústeres o categorías permiten la agrupación de individuos con características similares. Así, se clasifican los departamentos en categorías, aquellos que pertenezcan a una misma categoría serán similares entre sí respecto a las variables utilizadas para la conformación de los clústeres, conservarán homogeneidad al interior de la categoría y heterogeneidad respecto a las otras categorías. Las variables por considerar en la clusterización dependen de la finalidad del estudio, para el caso de emisiones por fuentes móviles, las categorías se conforman con datos departamentales de parque automotor, consumo de combustible, entre otros.

Para determinar el número óptimo de categorías en las que se podrían agrupar los departamentos se utiliza el Índice de Silueta que representa el número ideal de clústeres (Maulik et al., 2011; Rousseeuw, 1987). Éste es una medida de qué tan apropiada ha sido la agrupación de los datos y numéricamente es la media del coeficiente de silueta (S_i) de cada objeto de la muestra, el cual se obtiene con la Ecuación (2.1). Así, S_i tiene un rango de $[-1, 1]$, un valor cercano a la unidad indica que el individuo es similar a los demás objetos de la categoría (a_i pequeño) y no similar a los individuos del clúster más cercano (b_i grande), un S_i próximo a cero representa que el individuo

está en la frontera de dos categorías, y valores negativos indican que el individuo debería asignarse al clúster contiguo.

$$S_i = \frac{b - a}{\text{máximo}(a, b)} \quad (\text{Ecuación 2.1})$$

Donde: S_i : Coeficiente de silueta de cada objeto i

a: Distancia media entre el individuo y los demás elementos de la misma categoría

b: Distancia media entre el individuo y todos los otros elementos de la categoría más próxima

Considerando las variables a escala departamental de red vial total de OpenStreetMap, vehículos registrados en el RUNT, población total del DANE, ventas de diésel y gasolina al sector transporte reportadas por la UPME, se estableció el índice de silueta en caso de que los departamentos se agrupen en 2 hasta 8 categorías, cuyos resultados están en la Tabla 2-2. La presencia de S_i negativos indica que ese departamento se asigna incorrectamente a un clúster, por lo que la agrupación en ese número de clústeres es artificial para el conjunto de datos. Por lo que la agrupación en 2, 5, 6 o 7 categorías parece adecuada, la agrupación en 2 clústeres ofrece el índice de silueta más alto, sin embargo, la segmentación es técnicamente inapropiada por la agrupación de datos muy heterogéneos (pocos clústeres), por tanto, se elige la clusterización en seis categorías.

Tabla 2-2. Indicadores de silueta para diferentes números de categorías

NÚMERO DE CATEGORÍAS	2	3	4	5	6	7	8
Índice de silueta de agrupación de datos	0.72	0.45	0.48	0.46	0.47	0.39	0.42
¿Hay índices de silueta individuales negativos?	No	Si	Si	No	No	No	Si

Fuente. Elaboración propia

A partir de lo anterior, se realiza la clusterización espacial en la que además de las variables de interés se pondera la distancia euclidiana entre los centroides de los departamentos, técnica utilizada para ajustar los grupos por fronteras y cercanía entre sí. Los seis clústeres en los que se agrupan los departamentos tienen las características que se presentan en la Tabla 2-3 relacionando el valor promedio de las variables de los departamentos que hacen parte de cada clúster.

Tabla 2-3. Características de los clústeres departamentales

CLÚSTER	DEPARTAMENTOS	RED VIAL (KM)	VENTA GASOLINA (GALONES)	VENTA DIÉSEL (GALONES)	POBLACIÓN	VEHÍCULOS
---------	---------------	---------------	--------------------------	------------------------	-----------	-----------

A	Caldas, Cauca, Casanare, Huila, La Guajira, Magdalena, Sucre, Nariño	5,910	35,831,790	26,303,666	1,112,863	256,292
B	Cundinamarca, Valle del Cauca	16,480	176,958,136	168,975,515	3,796,145	1,647,908
C	Amazonas, Arauca, Archipiélago de San Andrés, Caquetá, Chocó, Guainía, Guaviare, Putumayo, Quindío, Risaralda, Vaupés, Vichada	1,676	11,893,518	6,583,008	292,338	88,103
D	Atlántico, Bolívar, Cesar, Norte de Santander	5,407	70,183,788	72,032,495	1,896,606	331,556
E	Antioquia, Bogotá D.C.	6,952	314,906,252	251,024,400	7,071,539	2,578,020
F	Boyacá, Córdoba, Meta, Tolima, Santander	10,689	59,938,913	58,396,434	1,532,875	508,604

Fuente. Elaboración propia

2.1.3 Aproximación a la actividad anual

Para la estimación de los kilómetros recorridos anualmente por el transporte terrestre por carretera en Colombia se utilizaron fuentes alternativas de información, como portales web de ventas vehiculares y revisiones técnico mecánicas realizadas por los centros de diagnóstico automotor.

Con la técnica de *web scraping* se extrajo la información del portal web de ventas de vehículos nuevos y usados Tu Carro en la que se identifica la categoría del vehículo, el modelo y la lectura del odómetro. Se eliminaron los registros de vehículos nuevos (modelos superiores a 2019) y valores atípicos para las categorías vehiculares, se estableció la actividad vehicular anual promedio para las tipologías automóvil, camioneta, campero y motocicleta por clúster como el cociente del kilometraje acumulado y la edad del vehículo (diferencia entre 2019 y modelo del vehículo).

En tanto para establecer la actividad de las tipologías buses, microbuses, busetas, camiones, volquetas, taxis y tractocamiones se acudió a información de los formatos uniformes de resultados (FUR) de las revisiones técnico mecánicas realizadas a los vehículos, información que fue suministrada por los centros de diagnóstico automotor y las corporaciones autónomas regionales. La actividad anual se calculó como el cociente entre la lectura del odómetro al instante la revisión técnico-mecánica y la antigüedad del vehículo.

En las Figura 2-3 y Figura 2-4 se presentan los resultados de la actividad media anual estimada por tipología vehicular y combustible en los diferentes clústeres. En términos generales se

identifica que la tipología con menor actividad es la motocicleta con unos 8,000 km/año, y los tractocamiones, taxis y buses tienen la actividad vehicular más alta con cerca de 50,000 km/año.

Es importante acotar que los órdenes de magnitud de las estimaciones de actividad según tipología vehicular están en armonía con los resultados de estudios a nivel regional desarrollados recientemente en el país, ver Tabla 2-4.

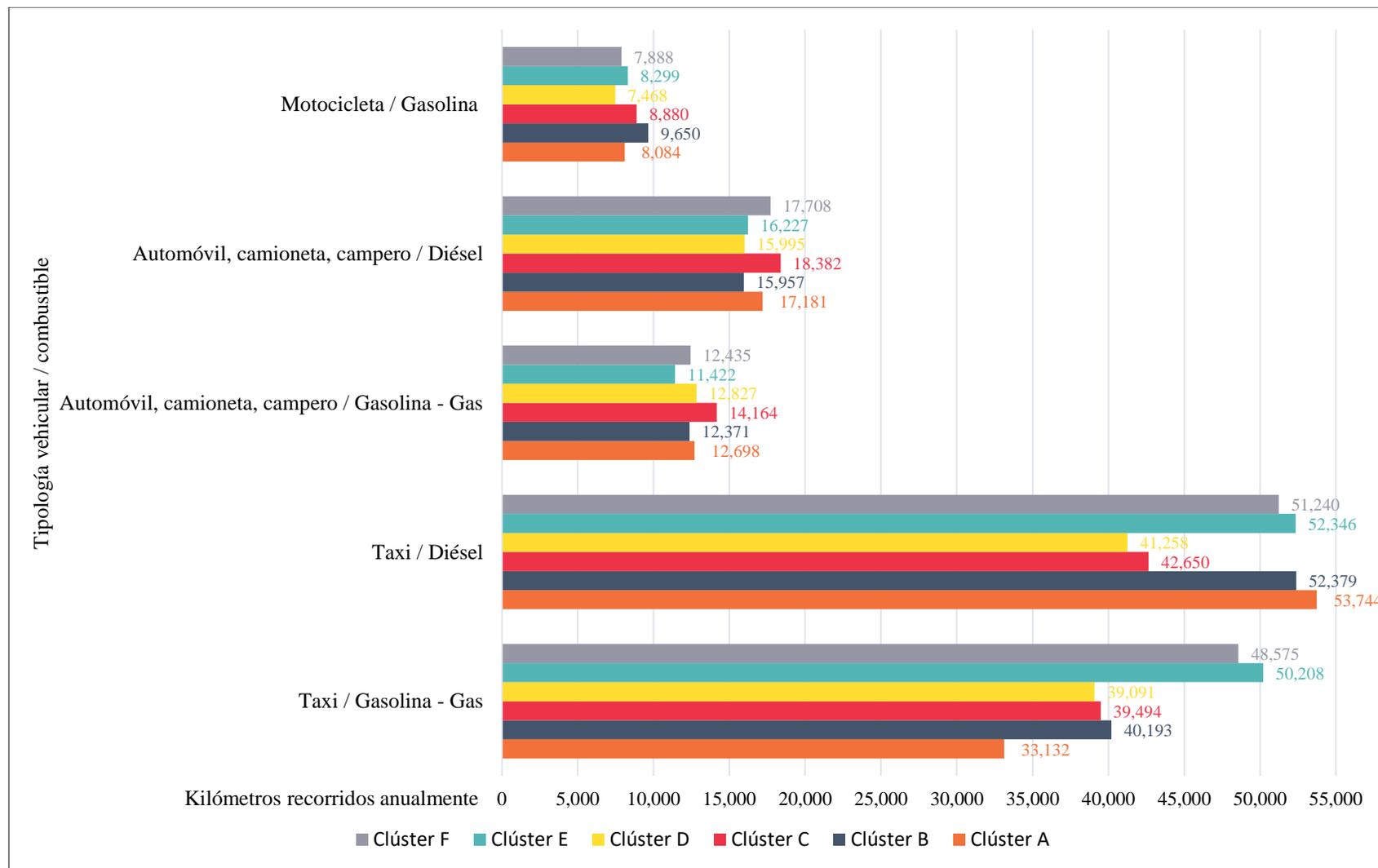
Tabla 2-4. Valores de actividad de referencia (km/año-veh)

TIPOLOGÍA VEHICULAR	INVENTARIO DE EMISIONES VALLE DE ABURRÁ - 2018			INVENTARIO DE EMISIONES BOTTOM-UP DE BOGOTÁ – 2019*	
	GNV	Gasolina	Diésel		
Autos	25,000	10,500	14,500	Autos	17,920
Camiones	GNV	Gasolina	Diésel	Camiones grandes	55,697
	50,000	32,000	47,667	Camiones pequeños	72,091
Motos		11,500		Motos	19,078
Taxis	GNV	Gasolina	Diésel	Taxis	64,866
	65,000	48,000	50,000		
Metroplús	GNV		Diésel	Alimentador	80,037
	63,333		44,000	Transmilenio	82,148
Buses	GNV	Gasolina	Diésel	SITP	48,410
	48,333	47,667	47,667		
Buses servicio especial	GNV	Gasolina	Diésel	Buses no SITP	30,967
	66,000	35,000	68,000		

*Para Bogotá se estimó el factor de actividad únicamente por tipología vehicular, asumiendo que los vehículos de una tipología tienen la misma actividad independientemente del tipo de combustible

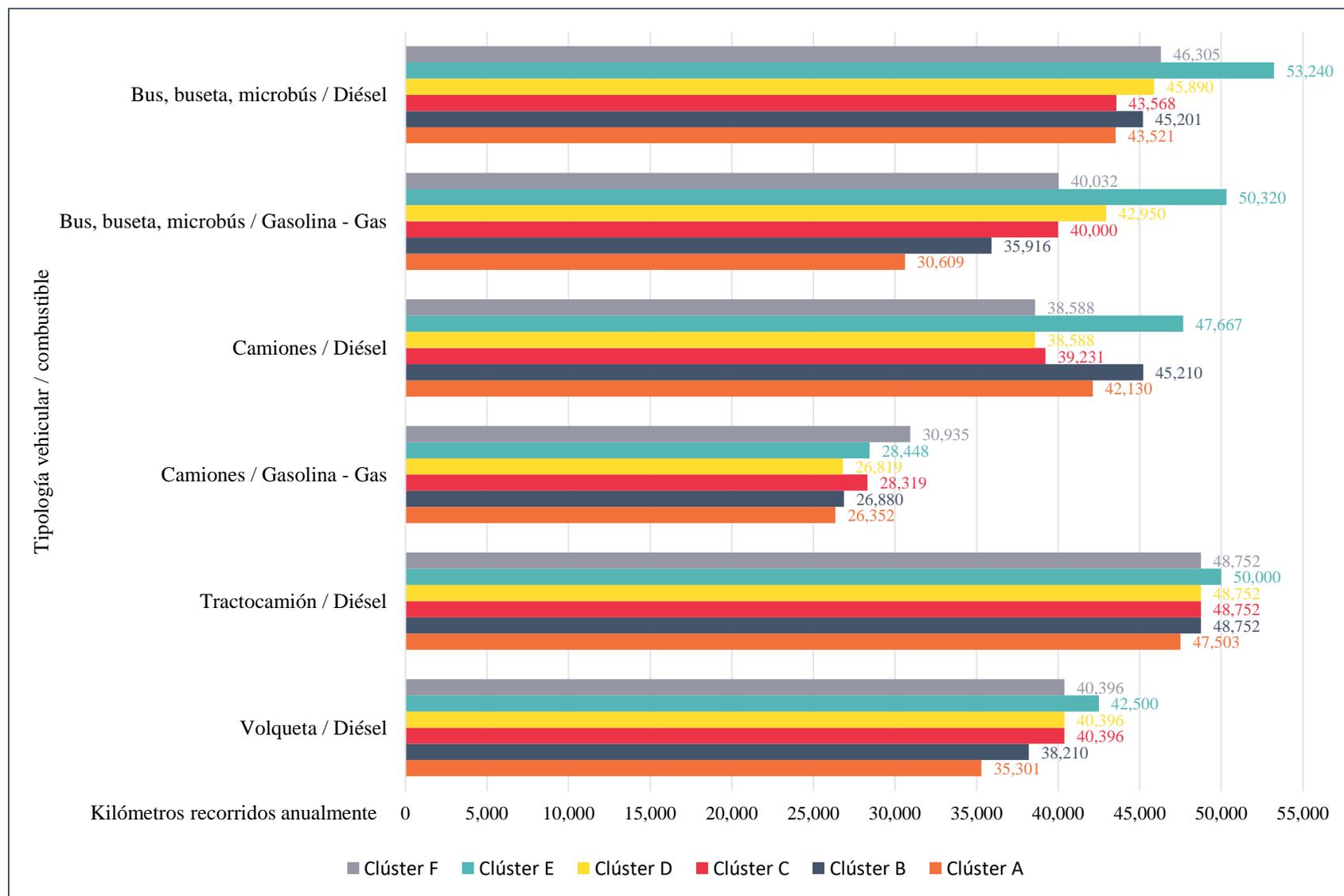
Fuente. Elaboración propia a partir de (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2019) (Jaime, 2022)

Figura 2-3. Actividad anual de motocicletas, automóviles y taxis por clúster (km/año-veh)



Fuente. Elaboración propia

Figura 2-4. Actividad anual de buses, camiones, tractocamiones y volquetas por clúster (km/año-veh)



Fuente. Elaboración propia

2.2 Factores de emisión

El factor de emisión es un indicador de las cargas ambientales producidas por el consumo de combustible de los vehículos y representa la emisión de un contaminante por unidad de energía consumida o de distancia recorrida, se expresa en unidades de gramos/kilómetro.

Aunado a lo descrito en el numeral 1.4.2, en el que se destacaba la importancia de contar con factores de emisión pertinentes para el área de interés, el MADS en sus documentos para las Naciones Unidas emite recomendaciones enfocadas a la necesidad de contar con factores de emisiones de GEI y contaminantes criterio que sean locales, confiables y representativos (Universidad de los Andes & MADS, 2014). La EEA en su guía para la construcción de inventarios de emisiones, la cual adapta las directrices del IPCC, relaciona la pertinencia de utilizar los factores de emisiones más puntuales que se hayan recopilado en los contextos adecuados, haciendo hincapié en que la información más reciente suele ser más precisa (EEA, 2019).

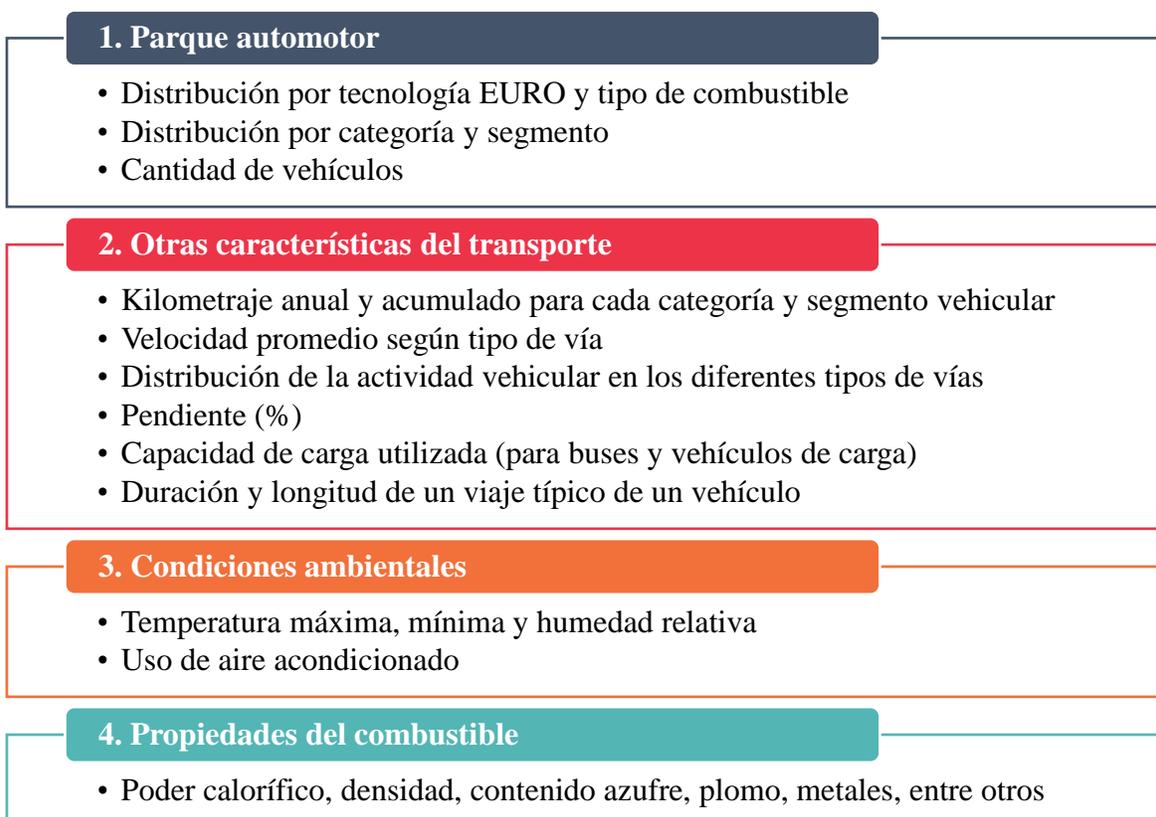
En este sentido, se revisaron las estimaciones de factores de emisión por fuentes móviles más recientes en Colombia, las cuales fueron desarrolladas en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Universidad de Antioquia, 2017, 2019). En estos estudios se establecieron los factores de emisión para vehículos livianos y motocicletas a través de la metodología de banco dinamométrico, mientras que los factores para vehículos pesados fueron medidos en ruta. Sin embargo, se consideró poco pertinente utilizar estos factores de emisión porque si bien fueron medidos en el territorio nacional únicamente se establecieron para los vehículos más representativos de una región, por lo que no se definió un factor de emisión para cada una de las tipologías vehiculares que componen el parque automotor registrado en Colombia.

La guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas de Colombia (MADS, 2017a) sugiere que cuando no se dispone de factores de emisión representativos a nivel local o regional se deberían utilizar factores de emisión de referencia establecidos por agencias internacionales, como la EPA, la EEA o el IPCC. En esta investigación se utilizan los factores de emisión COPERT 5.5.1 estimados con el nivel de información más detallado (Tier 3) tanto en insumos como en el procesamiento interno del software, definidos en la guía de inventarios de emisiones de contaminantes atmosféricos de la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA, 2019).

El modelo *Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport* o COPERT (por sus siglas en inglés) permite estimar factores de emisión para varios de tipos de emisiones vehiculares entre éstas las generadas por el tubo de escape. En esta aproximación metodológica la emisión por kilómetro (g/km) ocasionada por la operación de un automóvil depende entre otras cosas de la categoría, el tipo de combustible, el estándar EURO y la velocidad media de circulación del vehículo. COPERT permite estimar emisiones y factores de emisión de GEI, contaminantes criterio, compuestos orgánicos volátiles (COV), metales, compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVM).

En la Figura 2-5 se relacionan los insumos de COPERT que se desarrollan en los siguientes numerales para finalmente establecer los factores de emisión por segmento vehicular y departamento.

Figura 2-5. Insumos del modelo COPERT – Factores de emisión



Fuente. Elaboración propia

2.2.1 Composición del parque automotor según COPERT

La composición del parque automotor es relevante para establecer los factores de emisión, pues estos dependen de la tecnología vehicular, el combustible, las condiciones operativas del vehículo como la velocidad promedio y los kilómetros recorridos anualmente, entre otras. Para utilizar COPERT es importante asignar a cada vehículo un estándar EURO, una categoría vehicular y un segmento. A continuación, se describe el detalle de esta homologación, en el Anexo B se presenta el stock vehicular para 2019 según categoría, segmento, combustible y estándar EURO.

- **Estándar EURO**

En primera instancia se definió el estándar EURO para cada vehículo considerando el calendario de introducción de tecnologías vehiculares al país, además se validó la disponibilidad de un factor de emisión para cada tecnología EURO según tipo de combustible, categoría y segmento vehicular en COPERT. En este sentido a partir de la revisión de una tesis de maestría (Trejos, 2021) y de las políticas de tecnología vehicular en el país (Resolución 005 de 1996; Resolución 1048 de 1999, Resolución 910 de 2008, Resolución 2604 de 2009, Resolución 1111 de 2013, Ley 1972 de 2019) se construye la Tabla 2-5 en la que a partir de la categoría, el combustible, el tipo de servicio y el modelo del vehículo se asigna el estándar EURO.

A partir de la homologación de tecnología se construye la Figura 2-6 con la distribución de tecnología EURO por tipo de vehículo y combustible en Colombia. Se identifica que en los vehículos de carga la característica más dominante es el combustible tipo diésel con tecnología convencional. La mayoría de los automóviles funcionan con gasolina y tecnología ECE 15/04. La mayoría de los autobuses operan con diésel y tecnología Euro I. En taxis la tecnología más frecuente es Euro 3 y gasolina. La mayoría de las motos son a gasolina y con Euro 2. En términos generales la moto exhibe las tecnologías de emisiones más deficientes, en tanto los vehículos de carga y autobuses evidencian las tecnologías de emisiones más exigentes.

Es importante destacar que lo reflejado en el presente documento es resultado de la aproximación al estándar EURO con información secundaria ante la ausencia de información primaria como bases de datos (por ejemplo vehículos registrados en el RUNT) que contengan dicha información.

Tabla 2-5. Homologación de las tecnologías vehiculares en Colombia

CATEGORIA	COMBUSTIBLE / TIPO SERVICIO	1990 y antes	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
		Automóviles y taxis	Diésel / Privado	CONVENTIONAL															EURO 2			EURO 4									
Diésel / Público	CONVENTIONAL															EURO 4															
Gasolina	ECE 15/04					EURO 1										EURO 2		EURO 3			EURO 4										
Gas Natural Vehicular (GNV)	EURO 4																														
Gasolina - Eléctrico	EURO 6																														
Vehículos de transporte de carga*	Diésel / Privado	CONVENTIONAL						EURO I						EURO II			EURO IV		EURO V												
	Diésel / Público	CONVENTIONAL						EURO I						EURO V																	
	Gasolina	CONVENTIONAL					EURO 1										EURO II		EURO III			EURO IV									
Autobuses**	Diésel / Privado	CONVENTIONAL						EURO I						EURO II		EURO IV			EURO V												
	Diésel / Público	CONVENTIONAL						EURO I						EURO IV							EURO V										
	Gas Natural Vehicular (GNV) / Privado	EURO I															EURO II		EURO IV												
	Gas Natural Vehicular (GNV) / Público	EURO I															EURO IV														
	Diésel - Eléctrico	EURO VI																													
Motos***	Gasolina	CONVENTIONAL															EURO 2														

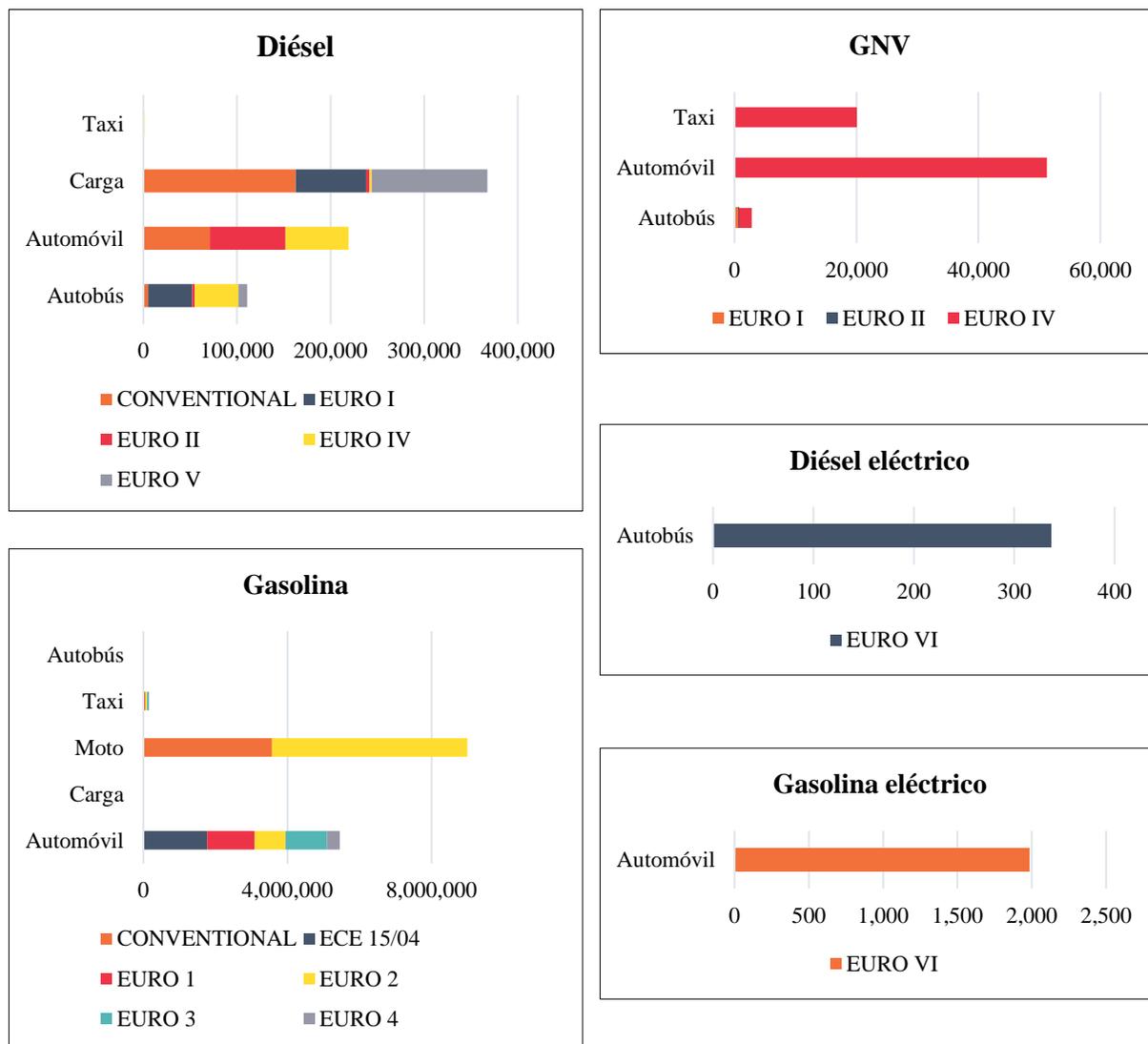
* Camiones, volquetas, tractocamiones

** Microbuses, busetas, buses

*** Motocicletas, mototriciclos, motocarros, ciclomotores, cuadriciclos, cuatrimotos

Fuente. Elaboración propia a partir de (Trejos, 202; Resolución 005 de 1996; Resolución 1048 de 1999, Resolución 910 de 2008, Resolución 2604 de 2009, Resolución 1111 de 2013, Ley 1972 de 2019)

Figura 2-6. Distribución de tecnología EURO por tipo de vehículo y combustible en Colombia (vehículos)



Fuente. Elaboración propia

- **Categorías y segmentos**

Con la guía de COPERT y la información disponible se estableció la categoría y segmento que se adecúa para cada vehículo como se presenta a continuación.

Los vehículos livianos (incluye taxis) se asignaron a la categoría de *passenger cars*. En cuanto al segmento fue indispensable conocer el cilindraje, información que se encuentra en la base de datos del RUNT, para los vehículos con valores atípicos o sin información de cilindraje se les asignó el segmento *small* que corresponde a cilindrajes mayores a 1200 cc e inferiores a 1600 cc.

Para las diferentes variaciones de vehículos de dos ruedas diferentes a motocicletas se les asignó la categoría *L-Category* y el segmento de *Quad & ATVs*.

A las motocicletas se les imputó la categoría *L-Category*, en tanto para asignar el segmento fue necesario conocer el cilindraje y el tipo de motor. El cilindraje se acogió de la base de datos del RUNT, para registros sin información o con valores de cero se imputó cilindraje de 51 cc y así se asoció la unidad de transporte a un segmento intermedio. El tipo de motor se asignó con dos estrategias, para modelos superiores a 2009 se consideró de 4 tiempos (Trejos, 2021), para modelos inferiores a 2009 se asignó el tipo de motor relacionado en las fichas técnicas según marca y línea.

Los microbuses, busetas y buses se asignaron a la categoría de buses. En cuanto al segmento, aquellos con combustible tipo gas natural vehicular o diésel eléctrico se asignan a los segmentos de buses urbanos correspondientes. Para los buses a diésel se consideró el cilindraje (CORPONOR, 2022) como una aproximación para establecer el peso bruto del vehículo y así definir el segmento, por último los buses con cilindraje superior a 6,000 CC se asignaron al segmento de *Coaches*, y en función de la cantidad de ejes se definió si corresponden al tipo estándar o articulado.

En cuanto a los vehículos de carga se realizaron dos procesos en función del tipo de combustible. Para los camiones a gasolina, los cuales tienen un cilindraje inferior a 2,200 cc se les asignó la categoría de *Light Commercial Vehicles* y el segmento correspondiente.

Para asignar los vehículos de carga con combustible diésel a un segmento es necesario conocer el peso bruto vehicular (PBV), así que se estableció una relación entre el cilindraje del vehículo (según el RUNT) y el PBV reportado en la tabla de estandarización del Ministerio de Transporte (2022). La Tabla 2-6 presenta la relación que permitió la clasificación de los vehículos de carga.

Tabla 2-6. Relación de peso bruto vehicular y cilindraje para los vehículos de carga

CLASE	PBV	CILINDRAJE MÍNIMO (CC)	CILINDRAJE MÁXIMO (CC)
Camión - Volqueta	<= 7.5 t	2,200	5,000
Camión - Volqueta	7.5 - 12 t	5,001	6,400
Camión - Volqueta	12 - 14 t	6,401	7,300
Camión - Volqueta	14 - 20 t	7,301	8,200
Camión - Volqueta	20 - 26 t	8,201	11,000
Camión - Volqueta	26 - 28 t	11,001	-
Tractocamión	28 - 34 t	-	14,000
Tractocamión	50 - 60 t	14,001	-

Fuente. Elaboración propia

En la Tabla 2-7 se relaciona la clase vehicular registrada en la base de datos del RUNT, la categoría y segmento de COPERT, así como las reglas de clasificación utilizadas para homologar la información de los vehículos.

Tabla 2-7. Reglas para la asignación de categoría y segmento

CLASE RUNT	CATEGORÍA	SEGMENTO	REGLAS DE CLASIFICACIÓN
Automóvil, camioneta, campero	Passenger cars ²	Mini Small Medium Large-SUV-Executive	Cilindraje \leq 1,200 cc Cilindraje \leq 1,600 cc Cilindraje \leq 2,000 cc Cilindraje $>$ 2,000 cc
Mototriciclo, motocarro, ciclomotor, cuatriciclo, cuatrimoto	L-Category ³	Quad & ATVs	--
Motocicletas	L-Category	Mopeds 2-stroke $<$ 50 cm ³	Cilindraje \leq 50 cc Tipo de motor = 2 tiempos
		Mopeds 4-stroke $<$ 50 cm ³	Cilindraje \leq 50 cc Tipo de motor = 4 tiempos
		Motorcycles 2-stroke $>$ 50 cm ³	Cilindraje $>$ 50 cc Tipo de motor = 2 tiempos
		Motorcycles 4-stroke $<$ 250 cm ³	50 cc $<$ Cilindraje \leq 250 cc Tipo de motor = 4 tiempos
		Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm ³	250 cc $<$ Cilindraje \leq 750 cc Tipo de motor = 4 tiempos
		Motorcycles 4-stroke $>$ 750 cm ³	Cilindraje $>$ 750 cc Tipo de motor = 4 tiempos
Microbús, buseta, bus	Buses	Urban CNG Buses	Tipo combustible = GNV
		Urban Buses Diesel Hybrid	Tipo combustible = Diésel eléctrico
		Urban Buses Midi \leq 15 t	Tipo combustible = Diésel Cilindraje \leq 3,000 cc
		Urban Buses Standard 15–18 t	Tipo combustible = Diésel 3,000 cc $<$ Cilindraje \leq 6,000 cc
		Coaches Standard \leq 18 t	Tipo combustible = Diésel Cilindraje $>$ 6,000 cc Cantidad de ejes \leq 3 ejes
		Coaches Articulated $>$ 18 t	Tipo combustible = Diésel Cilindraje $>$ 6,000 cc Cantidad de ejes \geq 4 ejes

² Vehículos utilizados para el transporte de pasajeros y que no tengan más de ocho asientos además del asiento del conductor

³ Vehículos de dos ruedas de motor térmico

CLASE RUNT	CATEGORÍA	SEGMENTO	REGLAS DE CLASIFICACIÓN
Camiones	Light Commercial Vehicles ⁴	N1-III	Tipo combustible = Gasolina Cilindraje < 2,200 cc
Camiones - Volquetas	Heavy Duty Vehicles	Rigid <= 7.5 t	Tipo combustible = Diésel 2,200 cc ≤ Cilindraje ≤ 5,000 cc
		Rigid 7.5 - 12 t	Tipo combustible = Diésel 5,001 cc ≤ Cilindraje ≤ 6,400 cc
		Rigid 12 - 14 t	Tipo combustible = Diésel 6,401 cc ≤ Cilindraje ≤ 7,300 cc
		Rigid 14 - 20 t	Tipo combustible = Diésel 7,301 cc ≤ Cilindraje ≤ 8,200 cc
		Rigid 20 - 26 t	Tipo combustible = Diésel 8,201 cc ≤ Cilindraje ≤ 11,000 cc
		Rigid 26 - 28 t	Tipo combustible = Diésel Cilindraje ≥ 11,001 cc
Tractocamiones	Heavy Duty Vehicles	Articulated 28 - 34 t	Tipo combustible = Diésel Cilindraje ≤ 14,000 cc
		Articulated 50 - 60 t	Tipo combustible = Diésel Cilindraje ≥ 14,001 cc

Fuente. Elaboración propia

2.2.2 Características del transporte

Las emisiones de contaminantes atmosféricos del transporte terrestre dependen entre otras cosas, del parque automotor y las características de operación de éste. En este numeral se describen las consideraciones utilizadas para el kilometraje anual y acumulado, la velocidad de operación, la capacidad de carga utilizada, la pendiente, duración y longitud de un viaje típico. COPERT considera otras variables como la distribución de la actividad vehicular en los diferentes tipos de vía de los departamentos para lo que se acogió la información del inventario nacional de emisiones año base 2017 desarrollado en una tesis de maestría previa (Méndez, 2022).

- **Kilometraje anual y acumulado**

El kilometraje anual de cada tipología vehicular utilizado para la estimación de los factores de emisión corresponde a lo presentado en el numeral 2.1.3. En tanto el kilometraje acumulado se estableció a partir de los registros del odómetro en el instante de la revisión técnico-mecánica (información brindada por corporaciones autónomas regionales) obteniendo el kilometraje

⁴ Vehículos utilizados para el transporte de mercancías cuyo peso máximo no exceda de 3.5 toneladas

acumulado por tipología vehicular. Para los vehículos que aún no les corresponde realizar esta revisión, el kilometraje acumulado se aproximó como el producto de la actividad anual estimada y la antigüedad del vehículo, esta última como la diferencia entre el año base (2019) y el año de inserción de la tecnología al país según la Tabla 2-5. En el Anexo B se relaciona el kilometraje acumulado para cada categoría vehicular.

- **Velocidad de operación**

El modelo COPERT solicita la velocidad vehicular promedio en cuatro condiciones de operación, tales como vía urbana en hora pico, vía urbana en período valle, vías rurales (vías secundarias y terciarias) y autopistas (vías primarias).

Las velocidades se consultan en el histórico de velocidades de Big-Data de Google, esta permite indagar por las velocidades de circulación en tramos viales a partir de la información histórica recolectada por Google de los usuarios, que a través de sus dispositivos móviles vía GPS reportan activa y pasivamente sus tiempos de recorrido.

La herramienta permite predecir la velocidad de operación esperada a futuro en ciertas condiciones particulares, como tipo de día, hora del día, el sistema de transporte (privado o público), el tipo de estimación (mejor aproximación, optimista, pesimista) a partir de la ponderación de los datos de tráfico históricos y predicción de datos de Google. Para la consulta de velocidades se utilizaron dos API⁵, ver Figura 2-7, *Roads* API que permite identificar la carretera más cercana que mejor se ajusta al trazado consultado con base en datos GPS, y *Directions* API que da indicaciones para desplazarse en los sistemas de transporte entre varias ubicaciones suministradas por el usuario.

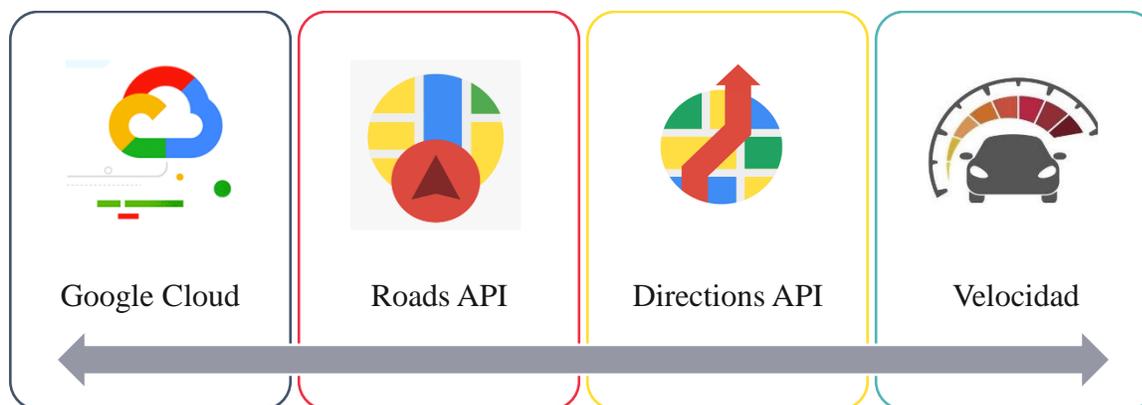
Para la consulta de velocidades se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- Tipo de estimación *Best Guess* o mejor aproximación.
- El día por consultar corresponde a un día y mes típico, jueves 11 de agosto de 2022.
- Se utiliza la hora de 7:00 para consultar velocidades en las vías urbanas en período pico.
- Se considera la hora de 22:00 para consultar la velocidad en vía urbana período valle.

⁵ Interfaz de programación de aplicaciones: Subrutinas, funciones y procedimiento para ser utilizada como una capa de abstracción de información

- Se analiza la información suministrada por la ANI de flujos vehiculares horarios en peajes estableciendo que en el período de 20:00 a 21:00 el flujo horario que cruza por la mayoría de los peajes se asemeja al flujo horario promedio diario, así pues, considerando el flujo como una variable proxy de la velocidad se define que en las vías interurbanas la hora de 20:00 representa condiciones medias de operación y por tanto se utiliza esta hora para consultar la velocidad en vías rurales (secundarias y terciarias) y autopistas (primarias).
- El sistema de transporte consultado es el transporte privado, entre otras cosas por la poca disponibilidad de información de Google del transporte público en el país.
- A partir de la red vial nacional depurada de OpenStreetMap (mayor detalle en numeral 2.1.1.1 Red vial) compuesta por 394,699 arcos se realiza un muestreo estratificado aleatorio con ayuda de XLSTAT⁶, con lo que se construye un *shapefile* de red vial para realizar las consultas de velocidades compuesto por 11,752 links urbanos, 275 links de vías interurbanas primarias y 2,975 links de vías interurbanas secundarias o terciarias distribuidos espacialmente en los departamentos de Colombia.

Figura 2-7. Procedimiento de consulta de las velocidades Big-Data de Google



Fuente. Elaboración propia

Con lo anterior se estableció la velocidad media de operación en vía urbana en hora pico, vía urbana en período valle, vías rurales (vías secundarias y terciarias) y autopistas (vías primarias) en cada departamento de Colombia, en el Anexo B se precisan las velocidades establecidas.

⁶ Componente de análisis estadístico de datos para Excel

- **Capacidad de carga utilizada**

En las categorías *Light Commercial Vehicles* y *Heavy Duty Vehicles*, que corresponden a vehículos de carga, se consideró un factor de carga de 0.5, lo cual representa que el vehículo se moviliza con una carga equivalente a la mitad de su capacidad. En otros términos, la mitad de los desplazamientos se realizan a plena capacidad de carga y los kilómetros restantes se recorren en vacío, lo cual concuerda con el panorama de América Latina, región en la que en promedio un vehículo tiene un rango de kilómetros en vacío de alrededor del 40%, particularmente para Colombia esto se explica, entre otros aspectos, por la diferencia entre las toneladas de importación y la menor magnitud de las toneladas de exportación (BID, 2021).

- **Pendiente**

La pendiente es un factor determinante en el rendimiento del combustible y en consecuencia en la generación de emisiones, especialmente en los vehículos pesados (buses y de carga), cuando se obvia este factor conservando la pendiente en 0% se tienen vehículos altamente eficientes en términos de rendimiento de combustible, situación que es poco representativa para las características topográficas del territorio colombiano. En este sentido, se realizó un proceso iterativo identificando que con una pendiente del 2% se tienen rendimientos aproximados a los reportados en estudios de campo. Así pues, en COPERT se utiliza una pendiente del 2%, además en el numeral 2.3.2.2 se presenta el análisis de los rendimientos de combustibles.

- **Duración y longitud de un viaje típico**

En el algoritmo de COPERT se utilizan las características del viaje, especialmente la longitud y duración de un viaje típico. La longitud del viaje se estimó como el cociente de la actividad anual de automóviles y motos entre los 365 días de un año, y considerando que se realizan dos viajes por día. A partir de la longitud del viaje y la velocidad media de operación se estimó la duración. En la Tabla 2-8 se presenta la duración y longitud de un viaje típico para los clústeres departamentales.

Tabla 2-8. Duración y longitud de un viaje típico

ÍTEM / CLÚSTER	A	B	C	D	E	F
Longitud (km)	17.33	17.34	18.92	16.57	16.41	17.37
Duración (minutos)	0.63	0.62	0.78	0.60	0.72	0.60

Fuente. Elaboración propia

2.2.3 Condiciones ambientales

COPERT usa información de las condiciones ambientales para establecer índices de ajuste a los factores de emisión, pues las emisiones dependen del parque automotor y de las características del entorno en el que opera el vehículo. Específicamente el modelo COPERT solicita información de la humedad relativa, la temperatura máxima y mínima para cada mes del año base. Adicionalmente para cada categoría y segmento vehicular se requiere el porcentaje de vehículos que hacen uso del aire acondicionado. A continuación, se presenta la estimación de estas variables y en el Anexo B se presentan los valores estimados.

- **Temperatura máxima, mínima y humedad relativa**

Dentro de los insumos de COPERT se tienen las condiciones meteorológicas del área de estudio tales como la temperatura máxima, la temperatura mínima y la humedad relativa en cada mes del año base. Mediante la exploración de los datos disponibles en el portal DHIME⁷ (IDEAM, 2022), se estimaron las variables meteorológicas para cada departamento, las cuales se contrastaron con los mapas de los boletines climatológicos mensuales del 2019 del IDEAM evidenciando similitud y validando así los insumos a utilizar en COPERT.

- **Uso de aire acondicionado**

La utilización del aire acondicionado se realiza para ajustar los factores de emisión porque esto puede contribuir a un aumento del consumo de combustible traduciéndose en más emisiones. Se supone que a 15°C los vehículos no hacen uso del aire acondicionado, mientras que a 32°C todos los vehículos con este sistema lo utilizan, bajo esta premisa se estima el porcentaje de vehículos que usan el aire acondicionado considerando la temperatura media anual del año base de cada departamento, la cual se estimó con información disponible en el portal DHIME (IDEAM, 2022).

2.2.4 Propiedades de los combustibles

El modelo COPERT solicita las propiedades de los combustibles utilizados en la región de análisis, para lo cual se adoptó la información de contenido de energía, densidad y azufre de una tesis de maestría (Trejos, 2021), ver Tabla 2-9. El modelo solicita otras características de los combustibles

⁷ Sistema de Información para la gestión de datos Hidrológicos y Meteorológicos

como contenido de metales y relaciones atómicas para lo cual se asumieron los datos que trae por defecto el modelo.

Tabla 2-9. Propiedades de los combustibles

ÍTEM / COMBUSTIBLE	GASOLINA	DIÉSEL	GAS NATURAL VEHICULAR
Contenido de energía (MJ/kg)	45.02	43.98	47.12
Densidad (kg/m ³)	736.36	863.11	0.823
Azufre (S) (ppm wt)	173.89	26.34	0.1

Fuente. Elaboración propia a partir de (Trejos, 2021)

2.2.5 Consideraciones adicionales

Algunas tecnologías vehiculares presentes en Colombia (ver Figura 2-14) no se consideraron para la estimación de las emisiones por tubo de escape generadas por el transporte terrestre por carretera en Colombia, como:

- Vehículos eléctricos: Los vehículos eléctricos hacen parte del mercado de vehículos de emisión cero de gases o ZEV (*zero emission vehicles*) por sus siglas en inglés (Walsh, 2009). Un vehículo 100% eléctrico produce cero emisiones por tubo de escape, así para efectos de la tesis se asume que estos no generan emisiones. Sin embargo, es frecuente que la energía que estos vehículos consumen provenga de una fuente con impactos ambientales, con una mirada integral un vehículo eléctrico será totalmente de cero emisiones cuando se garantice que la energía utilizada para la carga proviene de energías renovables como la energía solar, eólica, entre otras (Mendez, 2020).
- Vehículos con combustible tipo hidrógeno: El hidrógeno es una fuente secundaria de energía, durante su combustión térmica al interior de un motor únicamente se genera energía y agua puesto que este combustible no contiene carbono, sin embargo, la combustión en el aire puede generar nitrógeno molecular y óxidos de nitrógeno en pequeñas cantidades (Schlapbach, 2009). La masificación de este combustible en el transporte se ha obstaculizado porque al ser un gas requiere grandes sistemas de almacenamiento que restan eficiencia operativa al vehículo, es así como en el país apenas ocho funcionan con este combustible. De otra parte, los vehículos con combustible de hidrógeno no generan emisiones por tubo de escape.

- Vehículos con combustible tipo etanol: El etanol es un suplemento o sustituto de los biocombustibles derivado de la caña de azúcar, maíz u otros cultivos. Una práctica muy frecuente es la extracción del etanol de la caña y su mezcla con gasolina, lo cual reduce las emisiones de contaminantes atmosféricos, pues a mayor contenido de etanol en la gasolina regular disminuyen las emisiones de monóxido de carbono (Melo et al., 2012). A pesar de que la utilización de etanol como combustible genera menos emisiones que un vehículo a gasolina, la expansión del etanol en la industria automotriz se ha limitado por la baja disponibilidad de éste a nivel mundial y escasa consolidación de industrias robustas de producción y comercialización, por esto se ha preferido la adición de etanol en bajas proporciones a la gasolina. Bajo las premisas anteriores y aunado que para el 2019 apenas se tenían 11 vehículos registrados con combustible etanol, esta tecnología se considera poco influyente en la estimación de emisiones objeto de la tesis.
- Vehículos con combustible tipo GLP: El gas licuado de petróleo o GLP es una mezcla de propano y butano, los cuales son recuperados del gas natural y del proceso de refinación del petróleo. El GLP es un combustible alternativo poco contaminante, pues al no tener plomo y poco azufre se tiene una combustión completa y limpia reduciendo un 90% la emisión de partículas y menores emisiones de contaminantes atmosféricos respecto a los combustibles tradicionales (Ortiz, 2010; UPME, 2013).
El GLP es uno de los combustibles alternativos más utilizados en el mundo debido al mantenimiento económico, buena relación energía/masa en el proceso de combustión, pero requiere una inversión significativa para convertir un vehículo a esta tecnología. En el país existen 13 vehículos registrados a GLP, se considera que el aporte de estos a las emisiones por tubo de escape es mínimo y no se cuantifican en esta investigación.

2.2.6 Factores de emisión COPERT aproximados para Colombia

Como se ha presentado los factores de emisión dependen básicamente de la composición del parque automotor, las características de operación de éste, las condiciones ambientales y las propiedades de los combustibles. Después de obtener los insumos como se describió anteriormente, se ingresan estos valores por departamento al software COPERT 5.5.1 con lo que se obtienen los factores de emisión por departamento, categoría y segmento vehicular, tecnología

del motor y tipo de combustible para los contaminantes evaluados en esta investigación, obteniendo así 15,357 factores de emisión que se utilizan para la estimación de emisiones.

De otra parte, se estimaron los factores de emisión por categoría vehicular y combustible característicos de cada departamento como el promedio ponderado en función del número de vehículos por segmento y tecnología vehicular. Así en el anexo D se relacionan los factores de emisión de CO, NO₂, PM_{2.5}, SO₂, CO₂ y BC por categoría vehicular, combustible y departamento.

2.3 Características de la flota vehicular en Colombia

Las particularidades del parque automotor en Colombia se establecieron a partir de la base de vehículos registrados en la plataforma tecnológica del Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT) con corte a febrero del año 2020, la cual es una gran base de datos centralizada que contiene información de todos los vehículos en el país, toda vez que un vehículo debe estar registrado en esta plataforma para efectuar cualquier trámite de tránsito y transporte.

Este numeral se subdivide en dos ítems. En el primero de estos se realizan los análisis de los vehículos registrados en Colombia considerando un parque automotor de 15,428,671 vehículos. En tanto en el segundo ítem se realiza una aproximación a los vehículos registrados activos a partir de una conciliación entre el consumo y las ventas de combustibles, así como con la aplicación de factores de obsolescencia, a partir de esto se obtienen 10,675,062 vehículos activos con los cuales se realiza la estimación de emisiones generadas por el transporte terrestre por carretera.

2.3.1 Vehículos registrados

En la categoría de vehículos registrados se consideran los registros de la base del RUNT después de aplicar criterios básicos para la limpieza de base de datos en función de políticas instauradas y valores atípicos, en los siguientes apartados se desarrolla el proceso de limpieza de base de datos y la estadística descriptiva enfocada en las variables de clase, modelo y combustible.

- **Limpieza base de datos**

Para tener una base de datos de registros vehiculares pertinente para el año 2019, se realizaron las siguientes acciones, con las que se eliminaron 101,991 registros como se presenta en la Tabla 2-10.

- Suprimir registros de microbús, bus, buseta, camioneta o automóvil de servicio público de modelo inferior a 1999. Esto porque en el Artículo 6 de Ley 105 de 1993 y en el

Artículo 8 de la Resolución 5412 de 2019 se establece una vida útil máxima de veinte (20) años para los vehículos terrestres de servicio público de pasajeros. Así que no deberían existir vehículos de servicio público con modelo anterior a 1999, si se tiene que en el período 2019-2020 se debería dar la reposición de vehículos modelo 1999.

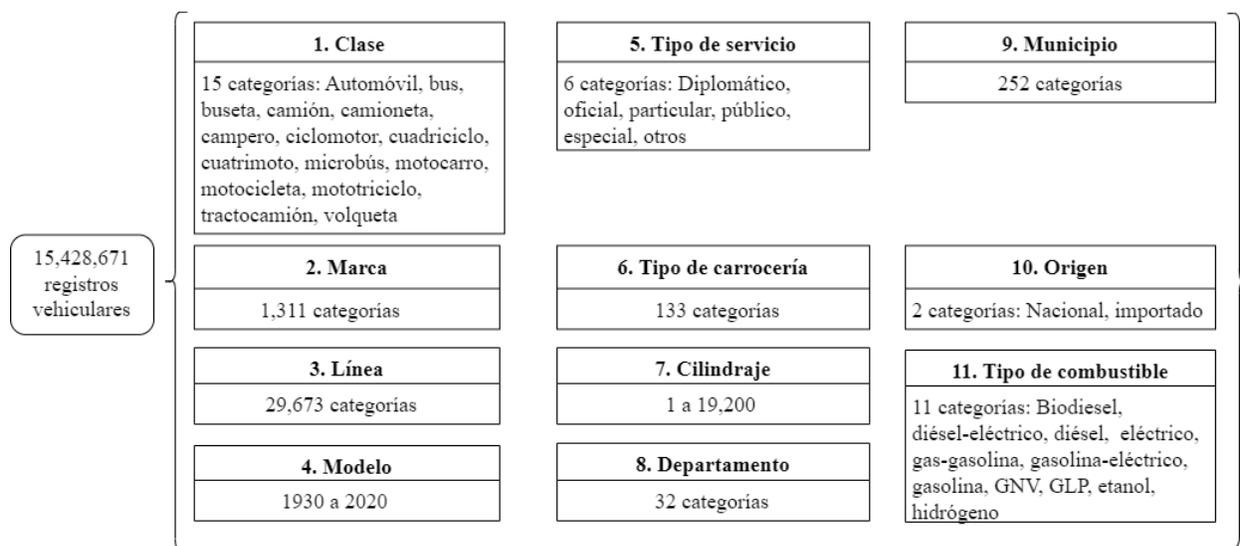
- Eliminar registros de tractocamiones, volquetas y camiones de modelo inferior a 1930 por considerarse *outliers* de su clase.
- Suprimir registros de mototriciclos, motocarros, ciclomotores, cuadríciclos, cuatrimotos, camperos y motocicletas de modelo inferior a 1950 por considerarse *outliers* de su clase.
- Eliminar registros de microbuses, buses, busetas, camionetas o automóviles de servicio diferente a público de modelo inferior a 1950 por considerarse *outliers* de su clase.

Tabla 2-10. Resumen limpieza base de datos RUNT

CRITERIO	REGISTROS ELIMINADOS	REGISTROS BASE DE DATOS DEPURADA
Registros originales	-	15,530,662
Buses de servicio público modelo inferior a1999	28,543	15,502,119
Microbuses de servicio público modelo inferior a1999	20,110	15,482,009
Busetas de servicio público modelo inferior a 1999	10,068	15,471,941
Camiones de modelo inferior a 1930	18	15,471,923
Volquetas de modelo inferior a 1930	3	15,471,920
Camperos de modelo inferior a 1950	1,233	15,470,687
Camionetas de servicio público modelo inferior a1999	2,496	15,468,191
Camionetas de servicio diferente a público modelo inferior a 1950	4,311	15,463,880
Vehículos de servicio público modelo inferior a 1999	24,234	15,439,646
Vehículos de servicio diferente a público modelo inferior a 1950	10,123	15,429,523
Motocicletas de modelo inferior a 1950	843	15,428,680
Mototriciclos de modelo inferior a 1950	2	15,428,678
Motocarros de modelo inferior a 1950	6	15,428,672
Cuatrimotos de modelo inferior a1950	1	15,428,671

Fuente. Elaboración propia

Con el proceso de limpieza de información descrito se consolidó la base de datos de vehículos registrados con 15,428,671 registros cuya estructura se presenta en la Figura 2-8.

Figura 2-8. Estructura base de datos vehículos registrados

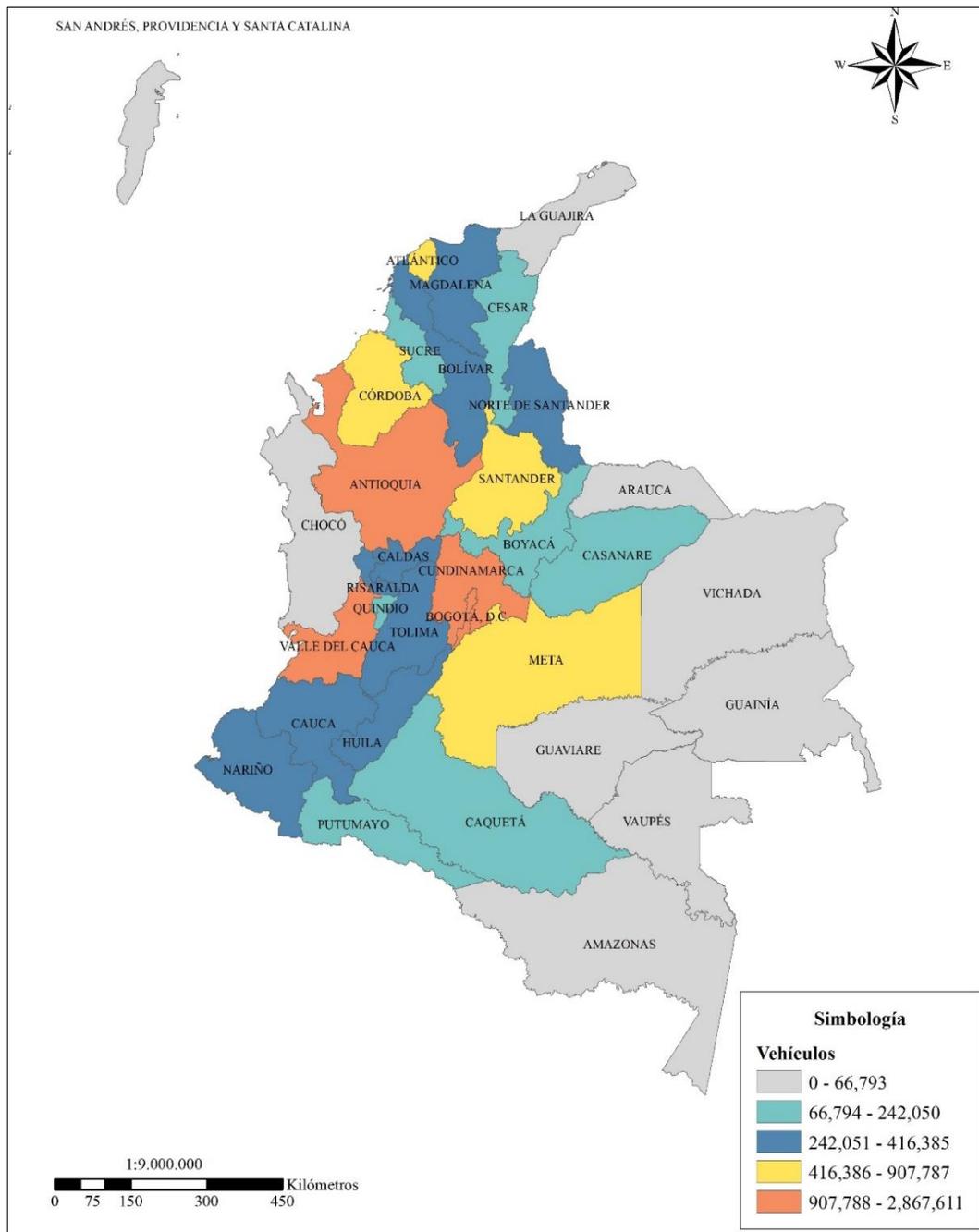
Fuente. Elaboración propia

Los 15,428,671 vehículos registrados en Colombia para el año 2019 se distribuyen en el territorio nacional como se ve en la Figura 2-9. Los departamentos de Cundinamarca, Bogotá D.C., Valle del Cauca y Antioquia tienen más de un millón de vehículos registrados, sin embargo, la capital colombiana destaca ampliamente con 2,867,611 unidades de transporte registradas, lo cual representa el 18,6% del parque automotor en Colombia. Mientras que los departamentos con menor cantidad de vehículos registrados (inferior a 30,000 vehículos) corresponden a La Guajira, Archipiélago de San Andrés, Amazonas, Vichada y Guainía. Es importante destacar el caso de Vaupés, departamento colombiano que no tiene registros vehiculares.

Para evidenciar las características principales del parque automotor en Colombia para el año 2019, en los siguientes apartados se describen aspectos como la clase, el modelo y el tipo de combustible.

- **Clase**

El parque automotor en Colombia está constituido en su mayoría por automóviles y motocicletas, ver Figura 2-10. Las motocicletas representan más de la mitad de los vehículos registrados en Colombia, 8,913,217 unidades que equivalen al 58%, esto se debe principalmente a su bajo costo de adquisición. La segunda clase vehicular con mayor participación en el país es el automóvil, con 3,817,470 unidades de transporte, sin embargo, si se consideran las clases camioneta y campero como un automóvil esta cifra asciende a 5,912,999 unidades (38%). En este sentido, las clases motocicletas, automóvil, campero y camioneta representan el 96% del parque automotor.

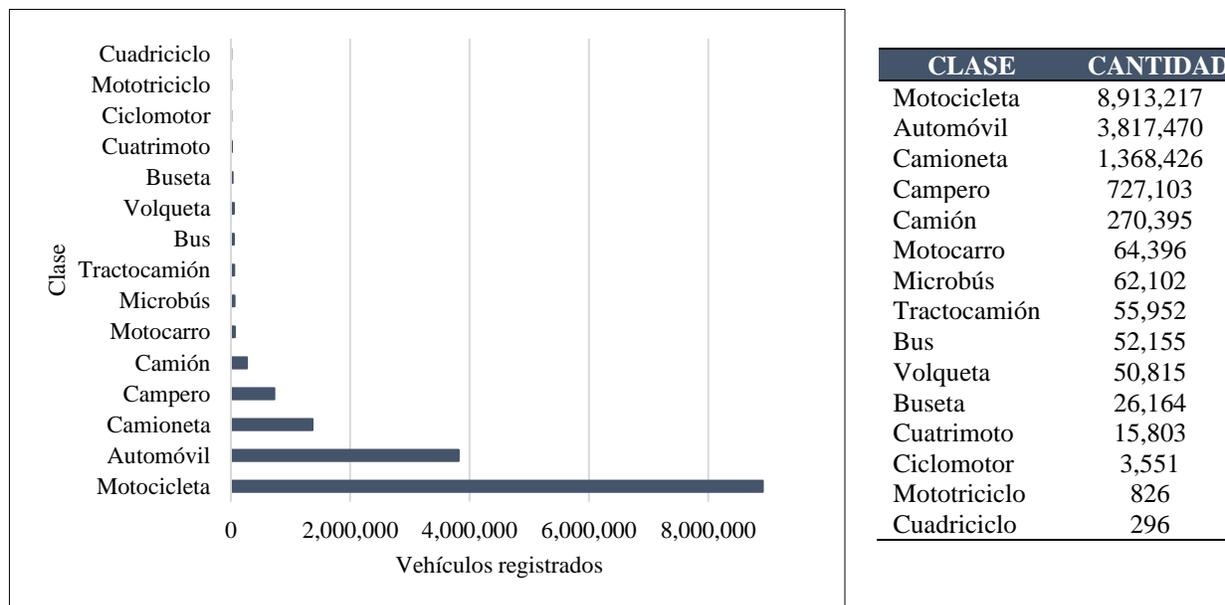
Figura 2-9. Vehículos registrados por departamento (vehículos)

Fuente. Elaboración propia

Los vehículos de carga tipo tractocamión, camión y volqueta, representan el 2.4% (377,162 unidades) de la flota vehicular, y de estos la clase camión es la más predominante con un 1.8%. De los vehículos de transporte colectivo de pasajeros, buseta, bus y microbús, este último corresponde a la clase más representativa con 62,102 unidades que representan un 0.4% de la flota.

Las clases con menor participación en el parque automotor de Colombia son cuatrimoto, ciclomotor, mototriciclo y cuatriciclo⁸, las cuales en su conjunto representan un 0.13% de la flota.

Figura 2-10. Parque automotor en Colombia al 2019 - Clase de vehículo (vehículos)



Fuente. Elaboración propia

Al revisar las clases de vehículos por departamento, se construye la Tabla 2-11. A partir de ésta se ratifica que la motocicleta es el vehículo más predominante en Colombia, toda vez que en 31 de los 32 departamentos es la tipología que más predomina dentro del parque automotor registrado. Así, en ocho departamentos, Amazonas, Arauca, Caquetá, Chocó, Córdoba, Guaviare, Putumayo, Vichada, más del 90% del parque automotor registrado corresponden a motocicletas. De otra parte, Bogotá D.C. es el único departamento en el que la motocicleta no predomina, ya que el automóvil tiene una participación más alta, es así como del total del parque automotor en la ciudad, un 54.9% (1,573,563 unidades) son automóviles, una cantidad tres veces más alta que la motocicleta, 18.2% (522,406 unidades). Adicionalmente, sin considerar las motocicletas en el parque automotor de Colombia, en 27 de los 32 municipios predominaría la clase automóvil.

⁸ Motocarro: Vehículo automotor de tres ruedas con estabilidad propia, tiene componentes mecánicos de motocicleta, se utiliza para el transporte de pasajeros o mercancías, capacidad útil hasta 770 kilogramos

Ciclomotor: Vehículo automotor de dos ruedas, provisto de un motor de combustión interna con cilindraje inferior a 50 cm³, o motor eléctrico con potencia nominal inferior a 4 kW

Cuatriciclo: Vehículo automotor de cuatro ruedas con estabilidad propia, provisto de un motor de combustión interna con cilindraje superiora 50 cm³, o motor eléctrico con potencia nominal inferior a 15 kW

Mientras que, en Amazonas, Chocó, Guainía, predominaría el motocarro, y en Putumayo y Vichada predominaría la cuatrimoto.

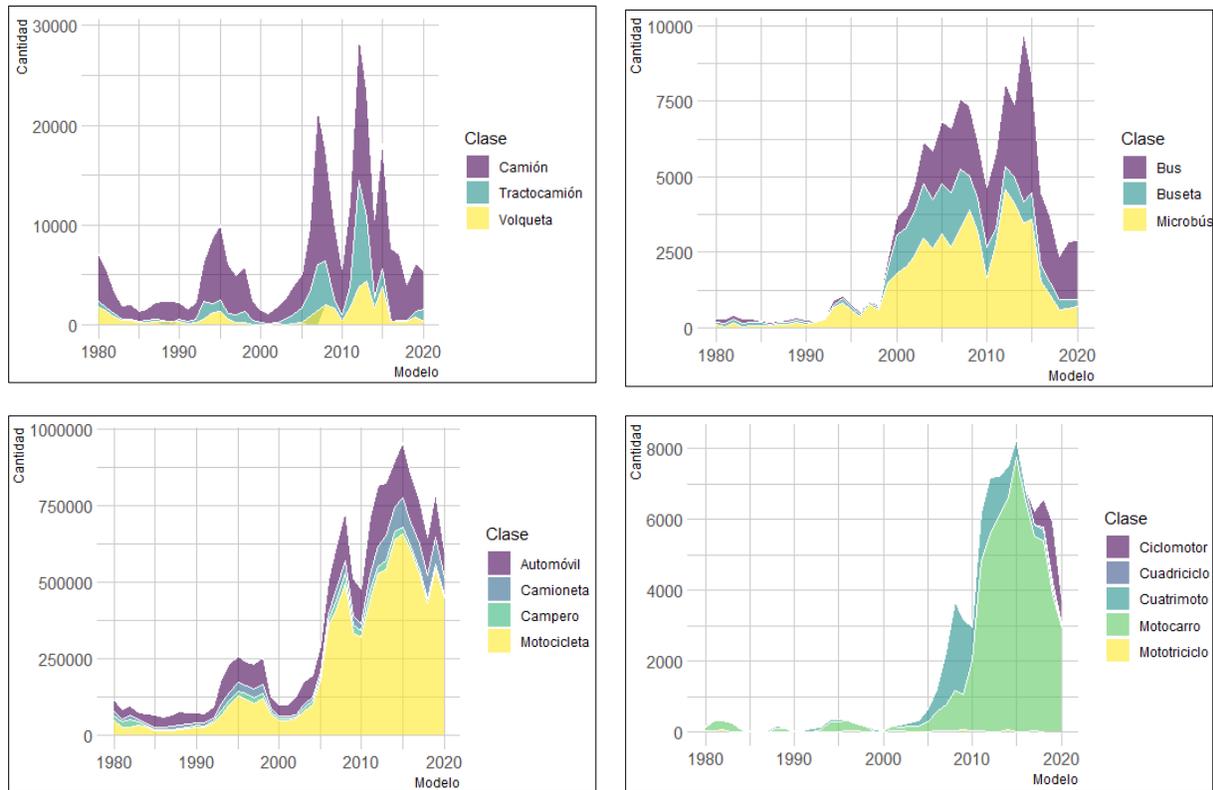
En la Figura 2-11 se identifica la cantidad de vehículos registrados anualmente según la clase vehicular. En la imagen superior izquierda se tienen a los vehículos dedicados al transporte de carga, se evidencia un comportamiento similar independientemente de la clase, en el período 2010-2015 se tuvo el ápice de registros y del 2015-2020 se ha presentado una reducción.

En la imagen superior derecha se tienen los vehículos de transporte colectivo de pasajeros, con una concentración importante de registros en el período 2000-2020, destacando la participación del microbús en esta categoría. Respecto a las clases automóvil, camioneta, campero y motocicleta (imagen inferior izquierda) se tienen comportamientos similares en cuanto al incremento o reducción de registros independientemente de la clase, sin embargo, se destaca la preponderancia significativa de la motocicleta, doblando hasta casi triplicando los registros de otras clases. Por último, en la imagen inferior derecha se representan a la gama de vehículos con menos de cuatro ruedas diferente a la motocicleta, se destaca una mayor presencia de motocarros y el surgimiento en los últimos años del ciclomotor. Por lo anterior, se identifica que a finales del período 2010-2015 se dio el pico de registros de vehículos en Colombia.

Tabla 2-11. Distribución vehicular por clases en los departamentos (vehículos)

Departamento / Clase	A	B	BS	C	CT	CM	CL	CD	CR	MB	MC	MT	MTR	T	V	
Amazonas	153	0	10	16	153	29	5	0	4	10	312	17,366	77	0	5	
Antioquia	518,058	7,641	2,834	41,219	170,025	113,916	665	103	5,553	7,618	12,244	1,391,869	93	8,259	8,332	
Arauca	1,596	78	38	230	991	533	9	0	9	109	160	62,862	1	8	169	
Archipiélago de San Andrés y Providencia	1,725	37	45	176	2,623	191	8	0	72	53	31	19,758	1	1	27	
Atlántico	142,735	4,767	1432	12,882	53,626	20,486	36	2	662	2154	10,469	234,739	130	1,743	1,669	
Bogotá D.C.	1,573,563	14,784	2,623	23,060	444,623	272,591	35	161	2,256	7,621	1,640	522,406	89	782	1,377	
Bolívar	59,367	1,315	679	4,224	22,372	8,789	611	5	201	1,357	3,591	252,689	8	630	793	
Boyacá	60,518	1,563	908	12,358	29,171	17,346	25	0	155	2,477	465	109,020	17	4,926	3,101	
Caldas	79,330	627	708	4,470	23,444	20,299	40	3	391	1,079	612	231,071	5	354	1,108	
Caquetá	3,680	33	80	425	1,670	1,907	4	0	21	60	817	159,520	0	83	191	
Casanare	9,704	52	124	984	5,737	2,420	43	0	68	327	623	87,827	0	98	497	
Cauca	31,254	262	507	3,480	14,590	8,313	33	0	148	1,200	556	247,104	12	594	1,210	
Cesar	23,368	207	138	2,641	12,395	4,397	5	0	129	295	2,125	125,677	10	592	327	
Chocó	482	6	10	35	260	150	0	0	3	48	740	38,743	1	3	45	
Córdoba	21,982	296	304	2,404	11,444	9,196	119	0	212	318	2,490	465,928	5	194	613	
Cundinamarca	241,880	9,109	5,044	75,108	185,129	64,557	588	3	910	17,944	2,749	837,357	8	22,833	14,758	
Guainía	0	0	0	0	0	0	8	0	1	0	807	2,706	0	0	0	
Guaviare	399	5	2	29	158	212	1	0	21	4	209	30,375	1	2	36	
Huila	52,270	397	275	5,668	28,237	12,556	50	0	131	1,240	1,406	312,352	8	688	1,107	
La Guajira	3,660	337	110	649	2,907	563	0	0	29	53	24	18,075	0	98	49	
Magdalena	24,730	285	553	2,643	10,455	4,757	36	0	317	810	4,766	225,700	20	466	217	
Meta	42,017	304	814	5,382	23,998	12,350	141	1	379	1,308	4,027	394,137	13	791	1,565	
Nariño	59,945	843	616	8,202	27,946	13,329	17	0	41	1,001	1,225	270,710	13	1,318	1,448	
Norte de Santander	47,312	386	636	4,298	19,986	5,829	15	0	278	1,762	877	226,233	9	319	1,816	
Putumayo	1,084	49	48	291	1,270	591	75	0	13	77	673	133,084	12	62	211	
Quindío	48,959	623	451	3,618	14,529	9,843	26	1	104	807	417	143,414	8	392	407	
Risaralda	79,336	910	723	3,932	25,209	13,991	89	3	275	1,080	1,571	207,840	16	618	1,141	
Santander	176,646	2,995	3,456	20,689	74,073	30,071	99	5	386	3,515	1,907	584,070	30	5,886	3,959	
Sucre	13,114	160	89	1,339	6,203	4,669	23	0	65	278	58	137,292	3	44	344	
Tolima	66,952	544	993	6,307	27,190	16,191	34	0	190	1,112	1,275	267,858	39	779	986	
Valle del Cauca	431,568	3,536	1,913	23,618	127,921	57,004	709	9	2,779	6,379	5,521	1,150,002	197	3,387	3,295	
Vichada	83	4	1	18	91	27	2	0	0	6	9	5433	0	2	12	
A: Automóvil	B: Bus	BS: Buseta	C: Camión	CT: Camioneta	CM: Campero	CL: Ciclomotor	CD: Cuadriciclo									
CR: Cuatrimoto	MB: Microbús	MC: Motocarro	MT: Motocicleta	MTR: Mototriciclo	T: Tractocamión	V: Volqueta										

Fuente. Elaboración propia

Figura 2-11. Evolución de registros vehiculares por clase vehicular (vehículos)

Fuente. Elaboración propia

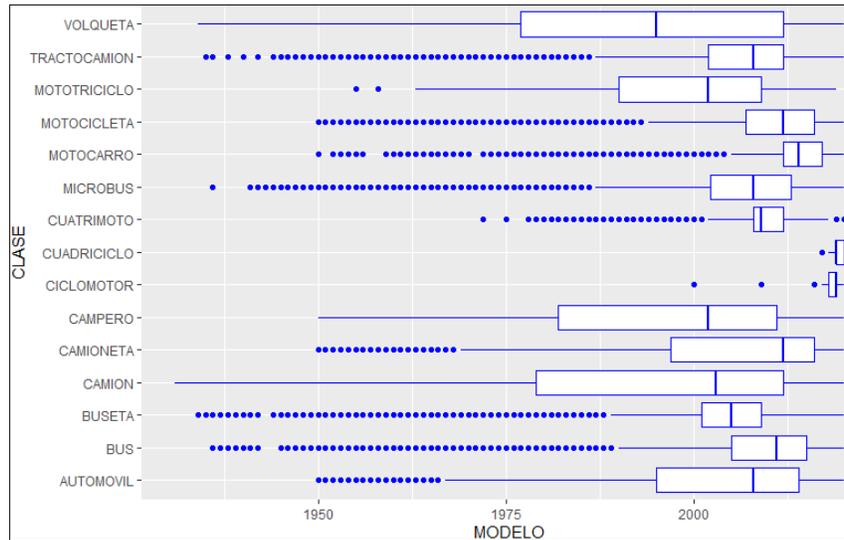
- **Modelo**

El modelo representa el año en el cual se registró oficialmente el vehículo al parque automotor del país, éste se puede relacionar directamente con el inicio de operación en vía de la unidad de transporte. A partir de la base de datos se establece que para el 2019 el modelo promedio de un vehículo en Colombia es 2007.

La Figura 2-12 permite dilucidar la distribución del modelo según la clase del vehículo. Las clases cuadríciclo y ciclomotor presentan una baja dispersión de datos respecto al modelo, adicionalmente sus unidades se concentran en modelos recientes. En tanto que, la volqueta es la clase de vehículo con el modelo promedio más antiguo y tiene la dispersión de modelo más alta dentro de todas las clases. Se puede establecer que las clases con el modelo promedio desde los más antiguos a los más recientes son: Volqueta, campero, mototriciclo, camión, buseta, automóvil, microbús, tractocamión, cuatrimoto, bus, camioneta, motocicleta, motocarro, ciclomotor, cuadríciclo.

Es relevante que la clase de vehículo más predominante en el país, motocicleta, tenga un modelo promedio reciente, de otra parte, los vehículos de carga tipo volqueta, tractocamión y camión están dentro de las clases con mayor antigüedad.

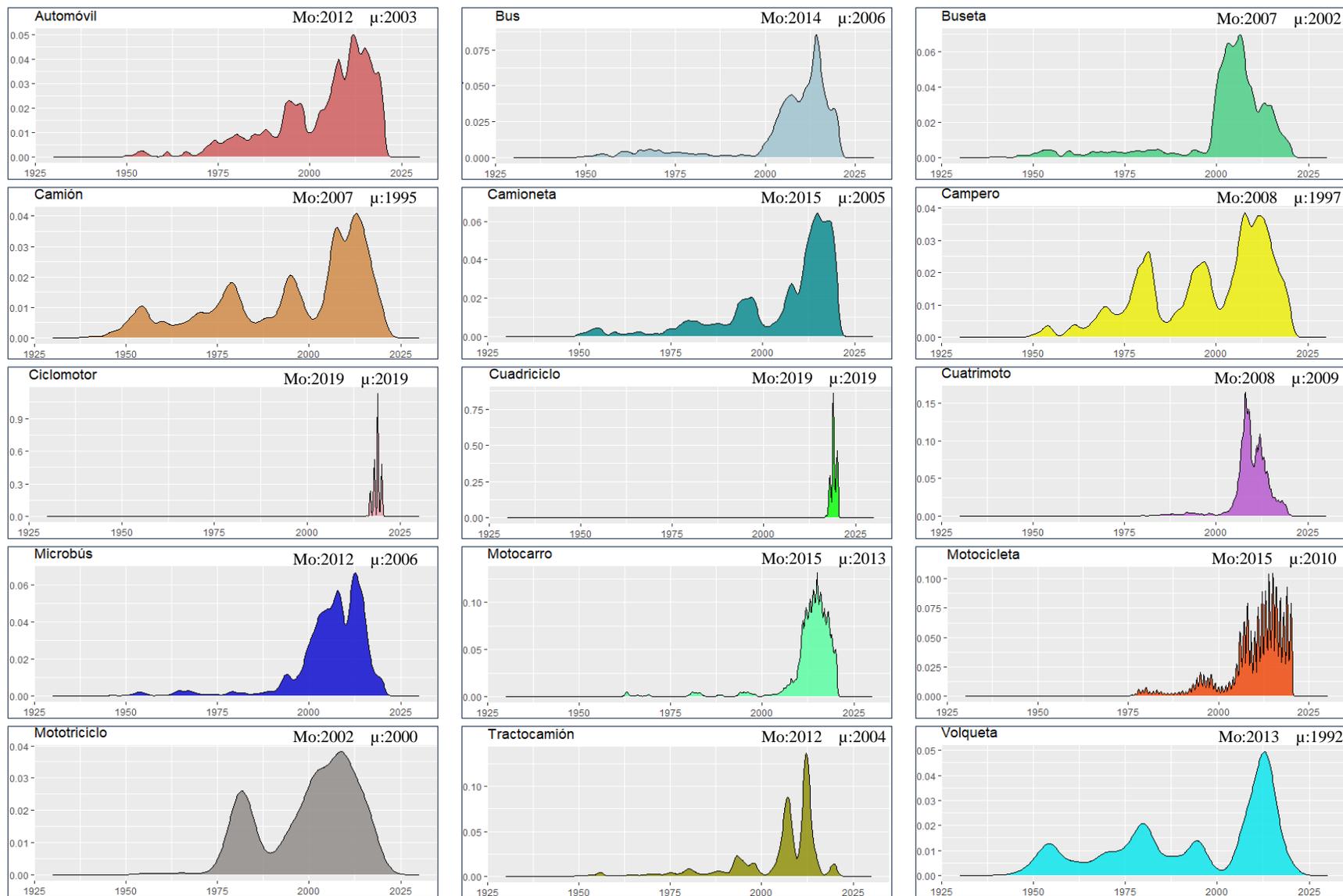
Figura 2-12. Clase y modelo del parque automotor en Colombia



Fuente. Elaboración propia

En la Figura 2-13 se presenta el diagrama de densidad de frecuencia del modelo por clase vehicular, el eje X representa el modelo del vehículo y el eje Y la densidad, así un valor de 0.05 representa una participación del 5%. En la parte superior derecha de cada gráfico está la moda (M_o) y la media (μ) del modelo para la clase de vehículo. En automóviles, camperos, camionetas, camiones, volquetas y mototriciclos se identifica una participación relevante de modelos antiguos (inferiores al año 2000). Mientras que la motocicleta, que es el vehículo con mayor participación en el parque automotor del país, tiene un parque automotor relativamente moderno pues la mayor concentración de modelos de estos vehículos se da en el período 2000-2020.

Figura 2-13. Diagramas de densidad del modelo por clase del vehículo



Fuente. Elaboración propia

A partir de la base de datos de vehículos registrados se estima la edad promedio por cada clase vehicular en Colombia para el 2019, ver Tabla 2-12. Los vehículos de transporte de carga especialmente la volqueta y el camión tienen una elevada edad promedio pues actualmente no existe una regulación a la vida útil máxima de vehículos de carga, a pesar de que por ejemplo para un vehículo de transporte público de pasajeros la nación establece una vida útil máxima de 20 años. En tanto se identifican clases vehiculares modernas o con baja edad promedio como el motocarro, el ciclomotor y el cuadriciclo, lo cual puede deberse a la reglamentación de su registro y circulación establecido por el Ministerio de Transporte en la Resolución 160 de 2017.

Tabla 2-12. Edad promedio del parque automotor en Colombia 2019

CLASE	EDAD PROMEDIO	CLASE	EDAD PROMEDIO	CLASE	EDAD PROMEDIO
Volqueta	27 años	Automóvil	16 años	Cuatrimoto	10 años
Camión	24 años	Tractocamión	15 años	Motocicleta	9 años
Campero	22 años	Camioneta	14 años	Motocarro	6 años
Mototriciclo	19 años	Microbús	13 años	Ciclomotor	1 año
Buseta	17 años	Bus	13 años	Cuadriciclo	1 año

Fuente. Elaboración propia

De esta manera, la edad promedio de los vehículos de carga (camión, tractocamión, volqueta) en el país es de 22 años. En América Latina y el Caribe la edad promedio de los vehículos de transporte de carga es de 15 años, mientras que Chile es el país con la menor antigüedad de estos vehículos con 11 años (BID, 2017). A partir de lo anterior, es posible asegurar que Colombia tiene una de las flotas de transporte de carga más antiguas en la región, en consecuencia, predominan vehículos menos eficientes lo que se traduce en importantes impactos ambientales (BID, 2021).

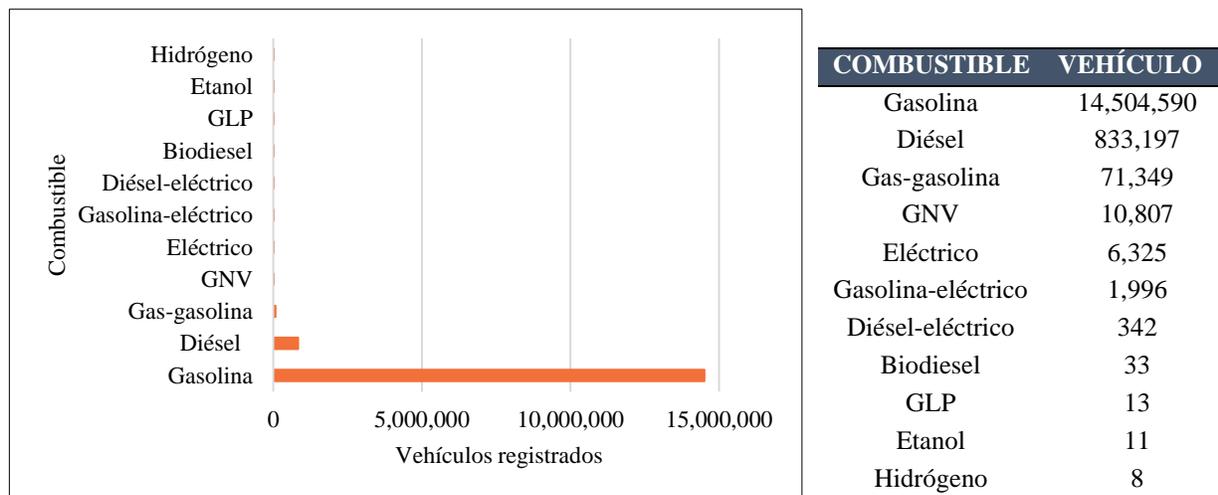
- **Combustible**

Los combustibles más representativos del parque automotor terrestre de Colombia son la gasolina y el diésel, con una participación de 94% y 5.4% respectivamente, ver Figura 2-14. Es importante destacar que la presencia del diésel se concentra en los vehículos de carga y aquellos vehículos de transporte colectivo, tales como bus, buseta, camión, microbús, tractocamión y volqueta. Mientras que la gasolina predomina en los vehículos livianos y motocicletas.

En el parque automotor colombiano se tiene presencia de energías alternativas, la cual representa el 0.6% de la flota total. El gas natural vehicular, el sistema eléctrico y los sistemas híbridos son las tecnologías alternativas más arraigadas en el país. La presencia de estos combustibles está

distribuida en las diferentes clases vehiculares, ver Tabla 2-13, particularmente en los ciclomotores y cuadríciclos, cuya vocación principal es la prestación no formal del servicio colectivo de pasajeros, prevalece el tipo de combustible eléctrico.

Figura 2-14. Parque automotor Colombia - Tipo de combustible (vehículos)



Fuente. Elaboración propia

En los vehículos de carga se tiene una escasa presencia de tecnologías alternativas, esto se debe principalmente a la reducida oferta de estos vehículos en el mercado y al elevado costo lo que impulsa a continuar con el uso de vehículos de combustión convencional. De otra parte, actualmente hay vehículos de tecnologías alternativas para el transporte de mercancías con eficiencias (potencia, autonomía) que sorprenden y mucho, demostrando que la escasa eficiencia no es un obstáculo para que los vehículos de carga migren a nuevas tecnologías.

Tabla 2-13. Distribución del combustible por clase vehicular (vehículos)

CLASE / COMBUSTIBLE	Gs	G-G	D	GNV	G-E	E	Et	H	B	D-E	G
Automóvil	3,758,410	37,740	16,434	2,855	1,100	925	3	2	1	0	0
Bus	4,483	118	46,623	591	0	1	0	0	3	336	0
Buseta	4,344	35	21,647	136	0	1	0	0	0	1	0
Camión	8,374	434	261,554	30	0	0	0	0	3	0	0
Camioneta	1,246,299	12,994	107,954	157	881	130	1	0	1	1	8
Campero	613,511	16,878	96,002	693	4	3	2	1	8	0	1
Ciclomotor	4	0	0	0	0	3,547	0	0	0	0	0
Cuadríciclo	21	0	0	0	0	275	0	0	0	0	0
Cuatrimoto	15,736	5	53	5	1	3	0	0	0	0	0
Microbús	9,894	495	51,548	152	0	9	0	0	4	0	0
Motocarro	62,730	45	1,510	26	1	83	0	0	0	0	1

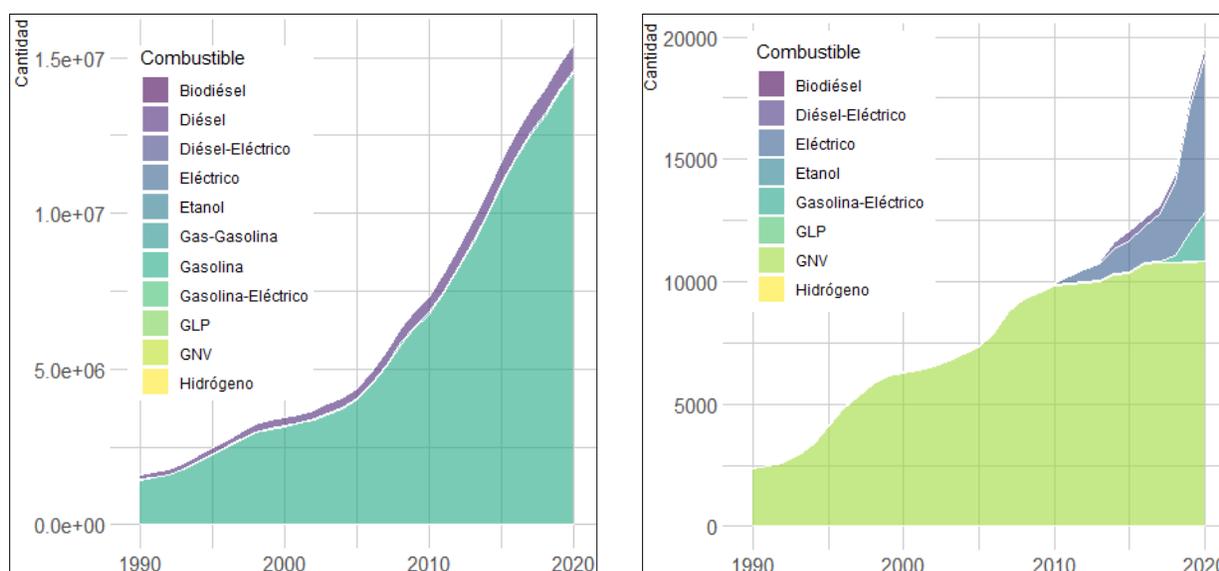
CLASE / COMBUSTIBLE	Gs	G-G	D	GNV	G-E	E	Et	H	B	D-E	G
Motocicleta	8,772,058	2,493	131,473	5,834	9	1,337	4	5	1	0	3
Mototriciclo	817	1	6	0	0	2	0	0	0	0	0
Tractocamión	2,230	31	53,513	161	0	8	0	0	8	1	0
Volqueta	5,679	80	44,880	167	0	1	1	0	4	3	0

Gs: Gasolina G-G: Gas-gasolina D: Diésel GNV: Gas natural vehicular G-E: Gasolina-eléctrico
E: Eléctrico Et: Etanol H: Hidrógeno B: Biodiésel D-E: Diésel-eléctrico G: Gas licuado del petróleo

Fuente. Elaboración propia

La variedad de combustibles que hace presencia en el país ha cambiado en los últimos años. En la Figura 2-15 se identifican la distribución del parque automotor según el tipo de combustible en el período 1990-2020. En la ilustración de la izquierda se identifica a la gasolina y el diésel como los combustibles más representativos del país, comportamiento que parece no cambiar a lo largo del tiempo toda vez que en el período 1990-2020 se evidencia un crecimiento continuo de estos combustibles en el parque automotor colombiano.

Figura 2-15. Distribución del combustible del parque automotor colombiano (vehículos)



Fuente. Elaboración propia

Mientras que en la Figura 2-15, especialmente en la ilustración de la derecha con la exclusión de las categorías diésel y gasolina, se identifica como el gas natural vehicular tuvo un auge y crecimiento continuo en el período 1990-2010, y a partir del 2010 su crecimiento se estancó y permanece estable. De otra parte, las tecnologías de tipo eléctrico y gasolina-eléctrico han tenido un crecimiento exponencial en la última década, lo cual puede deberse a los incentivos a vehículos híbridos o eléctricos instaurados en el país como: eliminación del arancel y reducción del IVA

(MinCIT, 2019), reducción del impuesto a la propiedad y eliminación de la restricción a la movilidad con estrategia de pico y placa para estos vehículos (Congreso de la República, 2019).

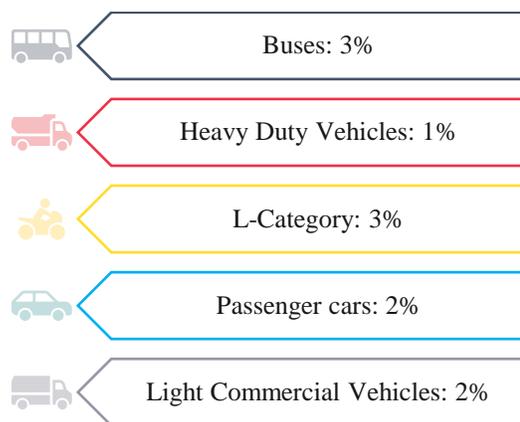
2.3.2 Aproximación a vehículos activos

En el numeral anterior se relacionó la información de los vehículos registrados en Colombia, en un caso hipotético de utilizar estos registros directamente para la estimación de emisiones habría un alto grado de incertidumbre, pues se tendría un supuesto y es que todo vehículo registrado está activo, es decir circula por las vías colombianas. En pro de disminuir la incertidumbre en la estimación de emisiones se realizan diversas acciones para alcanzar una aproximación a los vehículos activos en Colombia para el 2019.

En primera instancia se suprimen los registros vehiculares con modelo inferior a 1990 al considerar que son unidades de transporte muy antiguas para seguir circulando en el territorio nacional, o en el caso de que algunos de estos vehículos aún existan la actividad es inferior a la actividad media que se estimó en el numeral 2.1, debido a la filosofía de estimación enfocada a vehículos activos. De esta manera el stock de vehículos registrados de 15,428,671 unidades, en una primera etapa se consolida en 13,893,744 vehículos activos.

En una segunda etapa se suprimen los registros vehiculares de aquellas tecnologías vehiculares que no se consideran para la estimación de las emisiones por tubo de escape, tal y como se relacionó en el numeral 2.2.5, con la aplicación de este filtro se obtiene un stock de parque automotor de 13,887,419 vehículos activos.

Por último, bajo la connotación de que los vehículos siguen activos además de su antigüedad también por las condiciones funcionales y operativas adecuadas de la unidad de transporte, se asocia un factor de obsolescencia por categoría vehicular. Este factor representa aquellos vehículos que han salido de circulación por fallas mecánicas propias de la obsolescencia de la tecnología del vehículo, además por factores externos como siniestros viales o desvalijamiento del vehículo por comercio al menor de repuestos. En la Figura 2-16 se relacionan los factores de obsolescencia utilizados para Colombia, es importante acotar que se realizó un proceso iterativo de sus valores hasta identificar la mejor aproximación.

Figura 2-16. Factores de obsolescencia por categoría vehicular

Fuente. Elaboración propia

Con la aplicación de este último filtro se tiene una aproximación a vehículos activos en Colombia para el 2019 de 10,675,062 unidades de transporte. Para evaluar si el parque automotor activo estimado representa pertinentemente las características vigentes del sector transporte, en el siguiente numeral se realiza la conciliación entre el consumo y las ventas de gasolina y diésel.

- **Conciliación consumo y ventas de combustibles**

Previo a la cuantificación de las emisiones es importante validar que la información estimada de la actividad del transporte y el stock vehicular activo este en concordancia con cifras oficiales de consumo de energía. En este proceso de conciliación entre el consumo y las ventas de combustible es importante acotar que el enfoque principal es el de prueba y error, ajustando los kilómetros recorridos anualmente en pro de obtener una similitud entre los consumos calculados y las estadísticas disponibles en la región de análisis (EMEP & EEA, 2019).

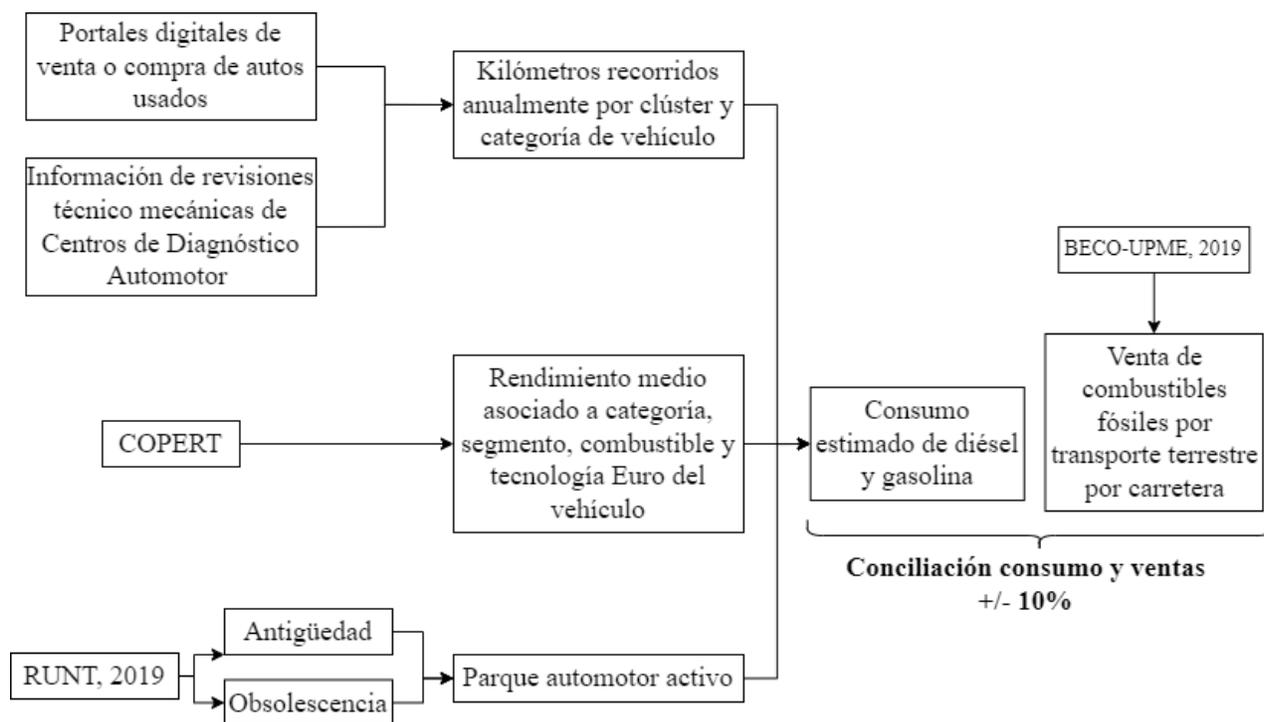
Para el transporte terrestre por carretera se contraponen por un lado las cifras de venta de combustibles fósiles al transporte terrestre por carretera a nivel nacional para el 2019, información extraída del balance energético nacional (BECO) que emite la UPME, y de otra parte el consumo estimado de combustible.

La estimación de consumo de combustible se obtiene al ingresar en COPERT los datos por departamento relacionados con insumos de factores de emisión (numeral 2.2), la actividad vehicular (numeral 2.1) y el stock del parque vehicular activo (numeral 2.3.2). De esta forma COPERT estima el rendimiento de combustible para cada combinación de categoría, segmento,

combustible y tecnología EURO. El producto del rendimiento del combustible, la actividad del vehículo y la cantidad de vehículos se constituye en el consumo de combustible.

Se realiza la conciliación consumo y ventas de combustible tipo gasolina y diésel a nivel nacional según la estructura metodológica de la Figura 2-17. Para esta investigación, se consideró aceptable una variación del 10% por exceso o defecto entre el consumo estimado y las ventas reportadas por las entidades ambientales considerando que la escala de análisis es nacional. En contraste en el inventario regional de emisiones del Valle de Aburrá para el año base 2018 se calibró el balance energético con un rango de diferencia de $\pm 5\%$ respecto al valor de la demanda energética real (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2019).

Figura 2-17. Estructura metodológica del balance energético del transporte terrestre por carretera

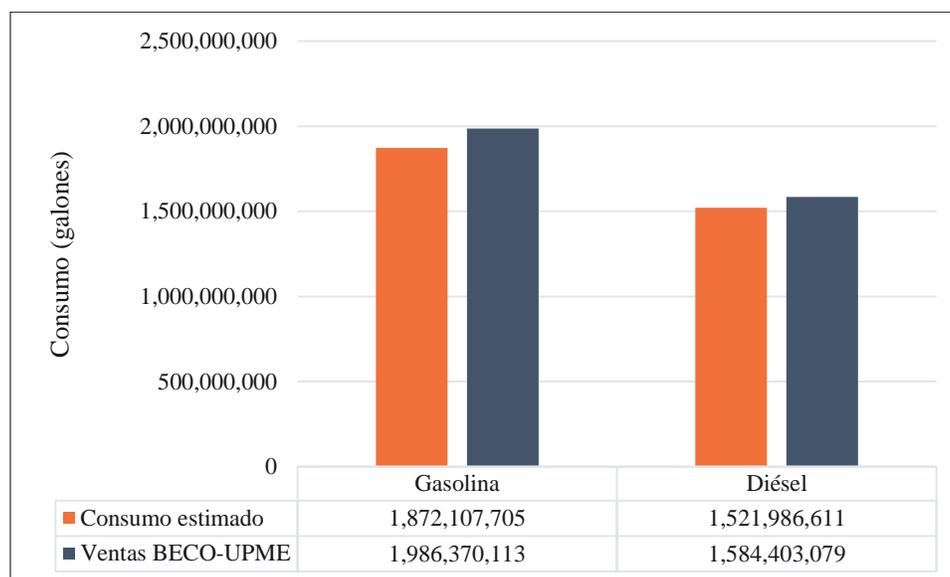


Fuente. Elaboración propia

En la Figura 2-18 se presentan los resultados de los consumos y ventas de gasolina y diésel para el transporte terrestre por carretera en el año 2019, con lo que se evidencia una conciliación entre consumo y ventas del 5.8% por defecto para la gasolina, mientras que para el diésel se tiene un 3.9% por defecto. Con esto se valida que tanto la actividad estimada del transporte terrestre por

carretera como la aproximación a vehículos activos se asemeja a las cifras oficiales de consumo energético, disminuyendo así la incertidumbre en la cuantificación de emisiones.

Figura 2-18. Conciliación consumo y ventas de gasolina y diésel por el transporte terrestre por carretera a nivel nacional para el 2019 (galones)



Fuente. Elaboración propia

- **Rendimientos de combustible**

Como se describió en el numeral anterior con los diferentes insumos ingresados a COPERT se obtiene el rendimiento de combustible para cada combinación de categoría, segmento, combustible y tecnología EURO. En este sentido, se estimaron los rendimientos de combustible para cada departamento y categoría vehicular como el promedio ponderado de los rendimientos individuales y la composición del stock. En la Tabla 2-14 se presentan los rendimientos por categoría y departamento, así como el promedio nacional.

Tabla 2-14. Rendimientos de combustible (km/gal)

DEPARTAMENTO / CATEGORÍA	BUSES	HEAVY DUTY VEHICLES	L-CATEGORY	LIGHT COMMERCIAL VEHICLES	PASSENGER CARS
Amazonas	10.1	18.8	119.5	-	45,4
Antioquia	7.9	13.2	101.3	19.9	38,1
Arauca	9.5	12.7	114.2	19.8	43,3
Archipiélago de San Andrés, Providencia	8.9	15.5	103.3	-	34,7
Atlántico	7.8	14.1	97.1	17.8	38,1
Bogotá D.C.	7.4	13.9	92.4	19.8	35,7

DEPARTAMENTO / CATEGORÍA	BUSES	HEAVY DUTY VEHICLES	L-CATEGORY	LIGHT COMMERCIAL VEHICLES	PASSENGER CARS
Bolívar	8.1	13.2	103.1	18.3	45,3
Boyacá	8.6	10.7	99.0	20.0	37,6
Caldas	8.4	14.7	102.7	18.1	39.7
Caquetá	8.6	11.7	106.3	-	40.6
Casanare	9.7	14.6	127.9	20.7	41.4
Cauca	9.0	12.8	104.0	18.1	39.8
Cesar	8.7	12.7	103.9	17.0	40.9
Chocó	8.3	12.0	93.7	17.3	37.1
Córdoba	8.6	13.9	107.3	17.9	40.8
Cundinamarca	8.9	13.0	103.1	17.5	36.8
Guainía	-	-	101.5	-	-
Guaviare	9.9	18.6	112.2	20.6	41.9
Huila	9.2	13.7	104.0	18.1	38.3
La Guajira	7.5	12.2	105.9	--	40.0
Magdalena	9.1	13.5	102.3	18.8	38.0
Meta	9.4	13.0	98.3	19.6	37.0
Nariño	8.5	13.0	105.9	18.6	40.3
Norte de Santander	8.9	13.1	102.9	18.0	38.2
Putumayo	8.7	11.4	105.9	17.2	37.0
Quindío	8.8	13.5	101.8	18.6	38.9
Risaralda	8.4	13.4	102.8	18.7	39.7
Santander	8.4	12.3	100.4	19.7	37.8
Sucre	9.0	14.8	108.3	18.9	40.6
Tolima	8.6	14.4	102.6	20.6	38.8
Valle del Cauca	8.9	14.6	103.1	18.8	39.4
Vichada	9.5	11.5	111.1	-	40.1
Promedio nacional	8.8	13.6	104.6	18.8	39.4

Fuente. Elaboración propia

Es importante acotar que como se describió en el numeral 2.2.2.4 para el uso de COPERT se utilizó una pendiente del 2%. Los rendimientos obtenidos con el desarrollo de esta tesis se compararon con rendimientos promedio de combustibles a nivel nacional reportados en el Primer balance de energía útil para Colombia y cuantificación de las pérdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética, resumen ejecutivo BEU sector transporte (UPME, 2019), identificando una aproximación para las diferentes categorías vehiculares.

2.4 Cuantificación de emisiones por el transporte terrestre por carretera

En la última etapa de la estructura metodológica para estimación de emisiones por el transporte terrestre por carretera (Figura 2-1) se calculan las emisiones para el 2019, a partir de la información de vehículos activos por departamento (numeral 2.3.2 y Anexo C), factores de emisión (numeral 2.2 y Anexo C) y actividad vehicular por departamento (numeral 2.1.3). Lo anterior para los contaminantes CO, NO₂, PM_{2.5}, SO₂, CO₂ y BC.

A continuación, se relacionan las emisiones estimadas para Colombia desagregadas por contaminante, tipología vehicular y combustible. Luego se presentan las emisiones por departamento en el que se realizan análisis según la población y parque automotor activo. Finalmente, se contraponen los resultados obtenidos en el presente estudio con emisiones estimadas en otros proyectos recientes.

2.4.1 Emisiones nacionales

Las emisiones generadas por el transporte terrestre por carretera en Colombia para el año 2019 se distribuyen como se presenta en los siguientes apartados.

- **Emisiones por contaminante criterio o GEI**

Los contaminantes evaluados en esta tesis se componen por gases de efecto invernadero (CO₂), contaminantes criterio (NO₂, SO₂, PM_{2.5}, CO) y carbono negro (BC). En la Tabla 2-15 se relacionan las emisiones nacionales de estos para el año base 2019. En Colombia, la mayor cantidad de emisiones del transporte terrestre por carretera corresponden al dióxido de carbono, seguido por el monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, material particulado fino, carbono negro y finalmente con las menores emisiones dentro de los contaminantes considerados el dióxido de azufre.

Tabla 2-15. Emisiones nacionales por el transporte terrestre por carretera - Año base 2019

CONTAMINANTE	NO ₂	SO ₂	PM _{2.5}	CO ₂	CO	CARBONO NEGRO
Emisión (Ton/año)	16,446.41	2,078.15	4,556.28	34,184,852.86	774,636.97	2,352.12

Fuente. Elaboración propia

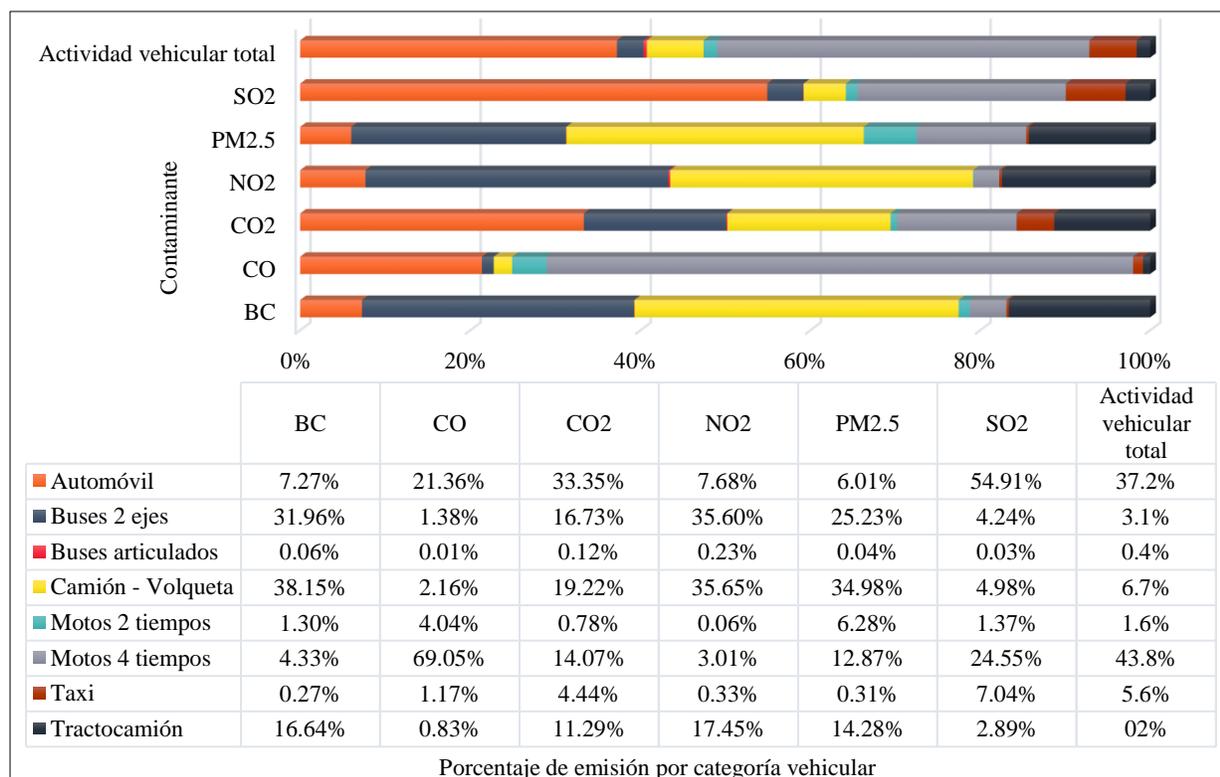
Para el 2019 el contaminante emitido en mayor cantidad por el transporte terrestre por carretera en Colombia es el dióxido de carbono representando el 97.7% de las emisiones. Mientras que si se consideran aisladamente los contaminantes criterio, los cuales son nocivos para la salud humana, el monóxido de carbono tiene la mayor participación con un 97.1%.

- **Emisiones por tipología vehicular**

Se analiza el aporte a las emisiones de cada contaminante por tipología vehicular como se presenta en la Figura 2-19, adicionalmente para contrastar los resultados se incorpora la actividad vehicular total por tipología vehicular que corresponde al producto del stock vehicular y el factor de actividad por tipología.

Los vehículos de carga (camiones, volquetas y tractocamiones) corresponden a la tipología vehicular que más aporta a las emisiones nacionales, pues aporta más del 53% a las emisiones de BC y NO₂, y alrededor del 49% de las emisiones de PM_{2.5}. A pesar de que esta tipología vehicular presenta baja actividad vehicular total (8.2%) en el total nacional, los resultados están en armonía con lo descrito previamente (numeral 2.3.1.3) cuando se destacó que Colombia tiene una de las flotas de transporte de carga más antiguas en la región predominando así vehículos menos eficientes.

Figura 2-19. Distribución de las emisiones por categoría vehicular para cada contaminante



Fuente. Elaboración propia

Las motocicletas que representan alrededor del 58% del parque automotor registrado y tienen la actividad vehicular más alta del país (43.8%) resulta ser la tipología vehicular que más contribuye

a las emisiones de CO, el cual se genera en la combustión parcial de combustibles que contienen carbono, además la exposición humana a este contaminante disminuye la capacidad de transportar oxígeno en el torrente sanguíneo hacia órganos críticos como el corazón y el cerebro y puede desencadenar en la muerte.

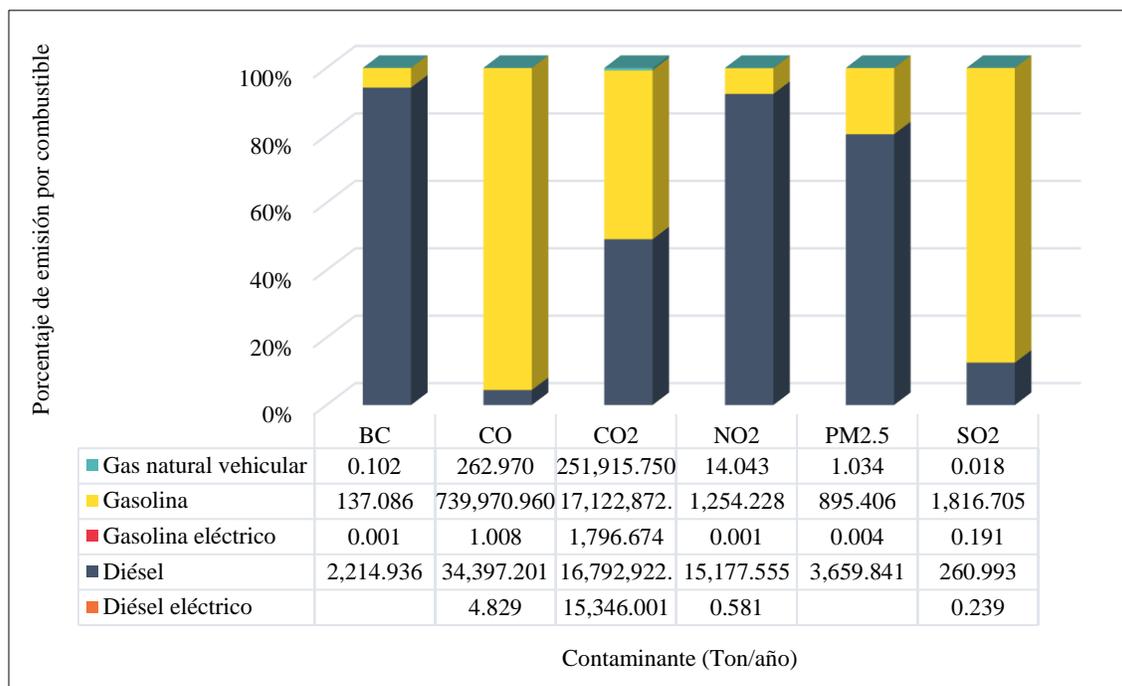
Respecto al GEI analizado en el estudio correspondiente al CO₂ se identificó que el automóvil (autos, camionetas y camperos) es la tipología que más aporta a éste, lo cual resulta coherente con su actividad vehicular (37.2% del total nacional), así que en Colombia el automóvil es la tipología que más contribuye en el desencadenamiento y aceleración del cambio climático.

En cuanto al material particulado fino (PM_{2.5}), que es uno de los contaminantes criterio más analizados por su vinculación con enfermedades respiratorias y cardiovasculares, se identificó que en Colombia éste es mayormente producido por buses y vehículos de carga, con un aporte de 25.3% y 49.3%, respectivamente.

En el caso del transporte terrestre por carretera la emisión de SO₂ se relaciona estrechamente con el contenido de azufre del combustible, recordando que la gasolina es el combustible en Colombia con mayor contenido de azufre con un promedio de 173.89 ppm resulta coherente que los automóviles y motocicletas, tipologías con mayor uso de gasolina, sean las que más participen en las emisiones de SO₂ con un aporte de 54.9% y 25.9%, respectivamente.

- **Emisiones por tipo de combustible**

Como resultado de la actividad del transporte terrestre por carretera en Colombia se estima que para el 2019 éste consumió aproximadamente 1,872 millones de galones de gasolina, 1,521 millones de galones de diésel y 121 millones de metros cúbicos de gas natural vehicular. En la Figura 2-20 se relacionan las emisiones de cada contaminante según el tipo de combustible.

Figura 2-20. Emisiones por tipo de combustible para cada contaminante (ton/año)

Fuente. Elaboración propia

Como se destacaba previamente la mayoría del parque automotor registrado en Colombia utiliza gasolina o diésel, con un 94% y 5% de participación respectivamente. El consumo de gasolina aporta en las emisiones el 95.5% de CO, el 50.1% de CO₂ y el 87.4% de SO₂. Mientras que el consumo de diésel contribuye en un 94.2% a las emisiones de BC, un 92.3% a las de NO₂ y un 80.3% a las de PM_{2.5}. Así, es importante señalar que basados en los contaminantes evaluados en esta tesis, la gasolina es el combustible que más aporta a las emisiones de GEI y contaminantes criterio generados por la actividad del transporte terrestre por carretera, en tanto el diésel es el combustible que representa las mayores emisiones de material particulado fino y de BC.

2.4.2 Emisiones departamentales

Como se destacó en el numeral 2.4 se estimaron las emisiones de los contaminantes por departamento las cuales se relacionan en la Tabla 2-16. Se identifica a los departamentos de Bogotá y Cundinamarca como los que más aportan a las emisiones nacionales generadas por la actividad del transporte terrestre por carretera, pues Bogotá aporta el 27.9% de SO₂, 20.5% de CO₂ y 14.9% de CO, en tanto Cundinamarca es el emisor principal de NO₂, PM_{2.5} y BC con el 28.3%, 23.5% y 26.0% respectivamente.

Tabla 2-16. Emisiones por departamento – Año 2019 (ton/año)

DEPARTAMENTO	NO2	SO2	PM2.5	CO2	CO	CARBONO NEGRO
Amazonas	2	1	3	11,798	1,139	1
Antioquia	2,511	301	663	5,247,170	109,632	341
Arauca	21	5	11	57,654	4,190	3
Archipiélago de San Andrés	12	3	7	36,461	1,782	2
Atlántico	761	80	182	1,435,401	22,706	102
Bogotá, D.C.	2,085	579	505	7,023,345	115,064	295
Bolívar	278	40	80	600,382	16,874	39
Boyacá	733	40	184	1,072,282	11,869	106
Caldas	229	40	81	555,518	18,038	37
Caquetá	33	12	19	130,744	10,042	6
Casanare	63	9	19	147,703	4,794	8
Cauca	188	26	76	383,939	16,540	35
Cesar	101	18	33	241,586	8,553	15
Chocó	8	3	6	34,480	3,256	2
Córdoba	129	37	79	430,835	29,929	23
Cundinamarca	4,653	218	1,073	6,624,530	80,157	611
Guainía	0	0	0	2,447	184	0
Guaviare	4	2	3	17,798	1,701	1
Huila	260	40	83	605,239	21,315	39
La Guajira	41	4	9	65,833	1,319	5
Magdalena	138	24	53	338,319	15,086	25
Meta	296	44	96	682,348	28,204	43
Nariño	397	42	120	715,159	19,738	60
Norte de Santander	194	36	79	475,029	14,940	34
Putumayo	31	9	19	108,474	8,441	6
Quindío	203	28	70	422,553	12,537	35
Risaralda	289	45	110	662,209	18,101	54
Santander	1,220	116	328	2,216,674	47,956	173
Sucre	55	13	31	161,742	9,803	10
Tolima	289	40	95	607,011	19,326	47
Valle del Cauca	1,220	221	441	3,065,735	101,057	195
Vichada	2	0	1	4,455	365	0
Total	16,446	2,078	4,556	34,184,853	774,637	2,352

Fuente. Elaboración propia

De otra parte, cabe señalar que los departamentos de Antioquia, Bogotá, Cundinamarca, Santander y Valle del Cauca en su conjunto son los causantes de más de la mitad de las emisiones nacionales de los contaminantes evaluados generados por el transporte terrestre por carretera, aportando particularmente el 71.1% de NO₂, 69.1% de SO₂, 66.0% de PM_{2.5}, 707% de CO₂, 58.6% de CO y 68.7% de BC. Lo anterior está en armonía con otras características sociodemográficas de estos cinco departamentos, pues en estos se alberga el 48.6% de la población colombiana, se encuentran matriculados el 60.1% de los vehículos del país y aportaron un 62.5% al PIB nacional del 2019.

Se ha destacado la congruencia entre los departamentos con más vehículos registrados y población con aquellos con la mayor generación de emisiones netas. Sin embargo, es importante realizar un análisis per cápita y por vehículo para identificar en primera instancia las poblaciones con mayor concentración de emisiones por persona, lo cual repercute directamente en la salud pública de la comunidad, y de otra parte señalar las regiones del país en las que el atraso tecnológico de la flota hace que la emisión promedio por vehículo sea crítica.

En el Anexo E se presentan los mapas de los índices poblacionales y vehiculares de emisión por departamento. Los indicadores se estimaron como el cociente entre la emisión neta por departamento y la población departamental reportada por el DANE para el 2019 según las proyecciones poblacionales 2018-2050, y el cociente de la emisión neta entre los vehículos activos por departamento (numeral 2.3.2 y Anexo C). A partir de la información relacionada en los mapas se construye la Tabla 2-17 que relaciona para cada contaminante el departamento que registró la mayor emisión neta, así como los departamentos con los índices de emisión per cápita y por vehículo más elevados en Colombia.

Tabla 2-17. Departamentos con mayores emisiones por contaminante

CONTAMINANTE	EMISIÓN NETA	EMISIÓN PER CÁPITA	EMISIÓN POR VEHÍCULO
BC	Cundinamarca	Cundinamarca	Cundinamarca, Boyacá
CO	Bogotá	Archipiélago de San Andrés, Cundinamarca, Bogotá, Meta, Caquetá, Putumayo	Archipiélago de San Andrés, Chocó, Vichada
CO ₂	Bogotá	Cundinamarca	Cundinamarca, Boyacá
SO ₂	Bogotá	Cundinamarca, Bogotá	Cundinamarca, Bogotá, Boyacá, Atlántico
NO ₂	Cundinamarca	Cundinamarca	Cundinamarca, Boyacá
PM _{2.5}	Cundinamarca	Cundinamarca	Cundinamarca, Boyacá

Fuente. Elaboración propia

Las emisiones de BC, NO₂ y PM_{2.5} se dan en mayor proporción en vehículos grandes (buses, carga) con diésel, por lo cual Cundinamarca y Boyacá son los más críticos en cuanto al índice por vehículo, pues en estos un 10.9% y 9.1% respectivamente del parque automotor registrado corresponde a vehículos grandes. Para el SO₂, los departamentos más emisores por vehículo resultan ser aquellos con mayor registro de vehículos a gasolina, pues las emisiones de SO₂ están estrechamente relacionadas con el contenido de azufre del combustible. En cuanto al CO, los

departamentos con índices más altos de contaminación por vehículos son aquellos con mayor participación de motocicletas en su parque automotor, pues esta es la categoría que más emite CO.

2.4.3 Contexto emisiones nacionales con resultados de otros inventarios nacionales e internacionales

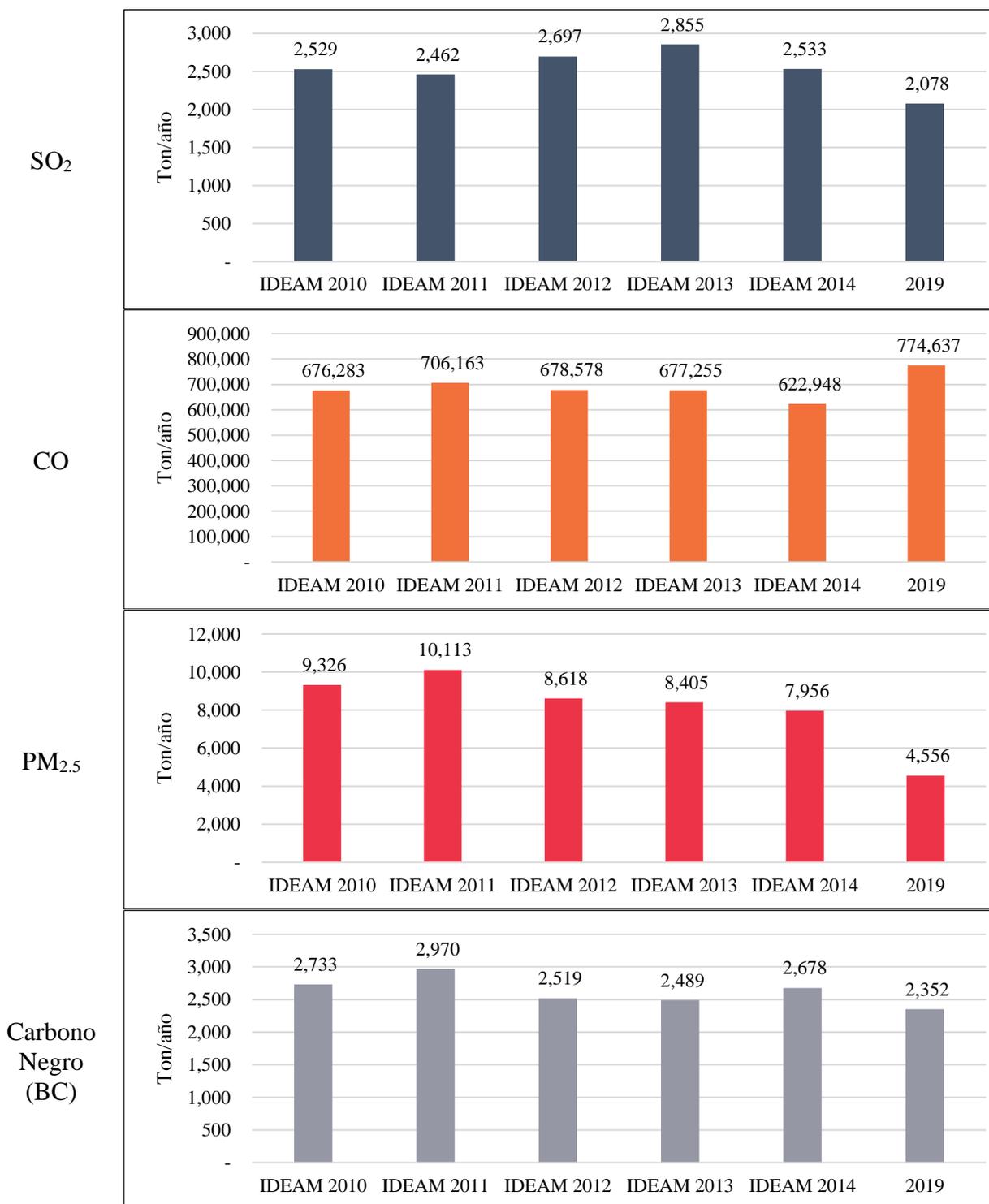
En el capítulo 1 se destacó que Colombia se comprometió a reducir las emisiones de GEI en un 51% para el 2030, para tener la línea base de medición de metas el IDEAM realizó el primer inventario nacional de emisiones para el período 2010-2014. En este sentido, en la Figura 2-21 se contraponen los resultados obtenidos por el IDEAM respecto a las emisiones generadas por el transporte terrestre por carretera y los resultados de la presente investigación para el año 2019.

Para todos los contaminantes se identifica coherencia en cuanto a los órdenes de magnitud de las emisiones netas de cada contaminante. Al considerar como línea base de comparación los resultados del 2010, se tiene que al 2019 han disminuido las emisiones de algunos contaminantes, de SO₂ en un 17.8%, de PM_{2.5} en un 51.5% y de BC en un 13.9%, sin embargo, las emisiones de CO han aumentado en un 14.5%.

La reducción de las emisiones de contaminantes criterio (SO₂ y PM_{2.5}) y de carbono negro han disminuido básicamente por la renovación del parque automotor a tecnologías más limpias, pues como se destacó en el numeral 2.2.1.1 la normatividad colombiana exige en la mayoría de las categorías vehiculares tecnología Euro IV, mientras que la mejor tecnología disponible en el mercado es Euro VI.

De otra parte, la emisión de CO ha aumentado por el incremento de registros vehiculares de motocicletas, recordando que a 2019 éstas constituían el 58% de las unidades de transporte registradas en el país y que son la categoría vehicular más emisora de CO, adicionalmente para este segmento la regulación no ha sido tan rigurosa de ahí que para el 2019 se exigiera tecnología Euro 2 mientras que en el mercado el estándar ha avanzado hasta Euro 5.

Figura 2-21. Emisiones nacionales del transporte terrestre por carretera IDEAM e inventario año base 2019 (ton/año)



Fuente. Elaboración propia

Además de analizar la reducción de las emisiones nacionales netas es importante evaluar la racionalidad de los indicadores respecto a resultados de estudios recientes en el contexto nacional e internacional, en la Tabla 2-18 se relacionan las emisiones atmosféricas del transporte terrestre por carretera per cápita de los contaminantes evaluados.

Tabla 2-18. Emisiones atmosféricas per cápita por el transporte terrestre por carretera en varias regiones de Latinoamérica (kg/año-habitante)

PAÍS / REGIÓN	AÑO INVENTARIO	FUENTE	PM _{2.5}	SO ₂	CO	CARBONO NEGRO	NO ₂	CO ₂
Colombia	2019	Propio	0.09	0.04	15.68	0.05	0.33	692.06
Colombia	2014	(IDEAM, 2020)	0.17	0.06	13.58	0.06	-	-
Colombia - Bogotá	2019	(Jaime, 2022)	0.19	0.16	54.31	-	-	1,261.36
Colombia - Área Metropolitana del Valle de Aburrá	2018	(Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2019)	0.67	-	143.59	-	-	801.14
Colombia - Bogotá	2018	(Secretaría Distrital de Ambiente, 2020)	0.27	-	54.86	-	-	-
México	2013	(INECC, 2014)	0.58	0.31	27.73	-	-	1,257.72
Chile	2020	(Osses et al., 2021)	0.09	-	4.37	0.062	-	1,367.05

Fuente. Elaboración propia

Respecto al contexto internacional, enfáticamente los resultados de Chile y México, se tiene que para el GEI de CO₂, Colombia es el de menor índice per cápita debido entre otras cosas a que la tasa de motorización de Chile y México duplica y excede la de Colombia (numeral 1.2.3). México presenta la situación más crítica per cápita del PM_{2.5}, mientras que Colombia y Chile conservan un índice de alrededor del 15% del estimado para México. En cuanto al CO México presenta el indicador per cápita más alto, seguido de Colombia y Chile, esto se debe principalmente al auge de la motocicleta en los países de América Latina, sin embargo, el indicador bajo de Chile responde a que la mayoría de motocicletas que ingresan al país cumplen la norma Euro 4 (Osses et al., 2021).

En el ámbito nacional al comparar los índices per cápita de contaminación del IDEAM para el 2014 y los obtenidos en el presente estudio para el 2019, se tiene que en cinco años se registra una reducción del 47% de PM_{2.5}, del 33% de SO₂ y del 17% de BC, en tanto para el CO se registra un incremento del 15%. En términos generales las emisiones del transporte terrestre por carretera por

habitante en Colombia han disminuido en los últimos cinco años, sin embargo, el incremento de las motocicletas ha limitado la reducción de emisiones de CO.

En el contexto de los resultados obtenidos en estudios recientes para las regiones de Colombia, siendo estas Bogotá y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se tiene que en ambas regiones los indicadores per cápita de los contaminantes evaluados son más altos que los obtenidos a nivel nacional.

3. Proyección de emisiones por el transporte terrestre por carretera en Colombia

En el capítulo anterior se establecieron las emisiones nacionales y departamentales de contaminantes atmosféricos generadas por la operación del transporte terrestre por carretera en Colombia para el año 2019, lo cual representa las condiciones particulares de ese año base. Sin embargo, el interés general de la sociedad por el cambio climático y la urgencia de iniciar acciones encaminadas a su mitigación hacen del análisis de emisiones futuras una herramienta imprescindible para tomadores de decisiones.

En este capítulo se abordará el último objetivo específico de la investigación enfocado a proyectar las emisiones de contaminantes criterio, gases de efecto invernadero y carbono negro producidas por el transporte terrestre por carretera en Colombia, en pro de responder una de las preguntas orientadoras que motivó el desarrollo de esta investigación siendo esta cómo cambiarán las emisiones nacionales generadas por el transporte terrestre por carretera a futuro.

La estructura del capítulo 3 se conforma por cinco subcapítulos. Primero se relacionan lineamientos asociados para la proyección de emisiones. Luego se destacan los métodos utilizados para calcular el crecimiento del parque automotor. A continuación, se estiman las emisiones a futuro para el escenario sin políticas o medidas adicionales a las existentes en el año base, conocido como *Business As Usual* (BAU). En la cuarta parte se presentan los escenarios de reducción de emisiones que se evalúan en esta tesis. Por último, se realiza un análisis de las emisiones obtenidas en los diferentes escenarios y cortes temporales.

3.1 Definiciones previas

A continuación, se presentan lineamientos asumidos para la proyección de emisiones, como el período y cortes temporales de las estimaciones, los compromisos de reducción de emisiones, finalmente se relacionan otras consideraciones vinculadas a factores de actividad, factores de emisión y presentación de resultados.

3.1.1 Período de proyección

Con las variables de estimación debidamente articuladas y proyectadas en el tiempo es posible cuantificar las emisiones, generalmente el período de proyección se selecciona a criterio de experto en función de la información histórica y de las proyecciones disponibles, las metas nacionales y compromisos internacionales de reducción de emisiones.

Hacia el 2015 en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) se instauró el Acuerdo de París, que establece objetivos a largo plazo para todas las naciones. Siendo estos la reducción sustancial de emisiones de GEI limitando el incremento de la temperatura en este siglo a 2°C y esforzarse para limitar el aumento a 1.5°C, la revisión de los compromisos de los países cada cinco años, y el ofrecer financiamiento a los países en desarrollo para mitigar, fortalecer la resiliencia y mejorar su capacidad de adaptación al cambio climático.

En este sentido, Colombia proclamó la Ley 1844 de 2017 (Congreso de la República, 2017) en la que se aprueba el Acuerdo de París según la NDC⁹ presentada por el país, focalizando los compromisos del país a la reducción de emisiones nacionales de GEI en un 20% respecto a las emisiones proyectadas para el año 2030, y hasta un 30% sujeta a la provisión de apoyo internacional, esto aplica para todos los sectores y fuentes de emisión nacional y cubre los principales GEI (CO₂, CH₄, N₂O, HFCS, PFCS, SF₆). Así mismo se genera la Política Nacional de Cambio Climático cuyo objetivo principal es incorporar la gestión del cambio climático en las decisión públicas y privadas (MADS, 2017).

Posteriormente se presenta la Ley 1964 de 2019 (Congreso de la República, 2019) para la promoción del uso de vehículos eléctricos en Colombia, en la que se establecen beneficios como la reducción en el impuesto vehicular, descuentos en la revisión técnico mecánica y de emisiones contaminantes, incentivos respecto a la restricción en circulación vehicular, parqueaderos preferenciales, así como la incorporación de vehículos eléctricos en la flota de sistemas de transporte masivo y oficiales y la ampliación de la infraestructura de carga, entre otros.

Así pues, al considerar la normatividad y las metas de reducción de emisiones de Colombia hasta el 2019 el período de proyección a 2030 resulta óptimo para evaluar los avances de la nación en

⁹ Contribuciones determinadas a nivel nacional: Esfuerzos y/o acciones climáticas de cada país para reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático según lo fijado en el Acuerdo de París

materia de emisiones. Sin embargo, la actualización de la NDC de Colombia fue aprobada en el marco de la Novena Sesión de la Comisión Intersectorial de Cambio Climático, del 10 de diciembre de 2020, así, en la Ley 2169 de 2021 (Congreso de la República, 2021) se actualizan a compromisos más ambiciosos como se relacionan en la Figura 3-1.

Figura 3-1. Metas nacionales de reducción de emisiones



Fuente. Elaboración propia a partir de (Congreso de la República, 2021)

Finalmente, hacia el 2021 se proclama la Estrategia Colombia Carbono Neutral (ECCN) siendo un mecanismo de acción temprana de la Estrategia de Largo Plazo E2050, que fue presentada oficialmente en el marco de la COP26¹⁰, esta busca promover el empoderamiento climático e involucramiento del sector público, privado y la sociedad civil en la consecución de las metas de reducción estipuladas en la NDC (Gobierno de Colombia, 2021).

A partir de este contexto, para esta investigación se identifican dos años hito que son relevantes para la evaluación de emisiones nacionales en Colombia siendo estos el 2030 y el 2050, por lo que se establece que el período de proyección estará comprendido del 2020 al 2050, con cortes temporales de 5 años para la presentación de resultados como recomienda el Acuerdo de París respecto a las NDC, así se estimarán las emisiones para los años 2020, 2025, 2030, 2035, 2040, 2045 y 2050.

3.1.2 Metas de reducción

Uno de los compromisos pactados en la NDC actualizada es reducir a 2030 las emisiones de carbono negro en un 40% respecto al 2014. El IDEAM (2020) estimó una emisión nacional de BC

¹⁰ Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático

de 2,678 toneladas/año emitidas por el transporte terrestre por carretera para el 2014, así para cumplir esta meta a 2030 la emisión de BC no debería superar el umbral de 1,607 toneladas/año.

Otra de las metas de la NDC compete a reducir en un 51% las emisiones de GEI con respecto al escenario de referencia a 2030, sin embargo, no se especifica la contribución de cada sector a esta meta, por lo que se realiza una aproximación. En la NDC se relaciona que en el escenario BAU a 2030 se emitirán 345 millones de toneladas de CO₂-eq, además que el sector energía contribuye en un 36.1% (MADS, 2020), así que la reducción total de emisiones debería ser de 175,950,000 toneladas de CO₂-eq y asumiendo la misma proporción de aporte como de reducción, se estima que el sector energía debe tener una reducción neta de emisiones de 63,517,950 toneladas de CO₂-eq.

En el inventario nacional de emisiones y absorciones de GEI (CREE, 2022) se estableció que el transporte representa el 38.2% de las emisiones del sector energía, por lo que para cumplir la meta a 2030 al transporte le correspondería reducir las emisiones en 24,263,857 toneladas de CO₂-eq. Por último, en la Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático (IDEAM, 2016) se especifica que el transporte terrestre por carretera representa el 90% de las emisiones de CO₂-eq del transporte. Por lo que a 2030 le compete a este subsistema de transporte la reducción de emisiones de 21,837,471 toneladas de CO₂-eq respecto al escenario BAU.

Por último, el compromiso a largo plazo estipulado en la NDC corresponde a la neutralidad en carbono a 2050. Esta se refiere a un balance neto cero entre emisiones y absorciones de GEI, así, se estima que Colombia debe reducir las emisiones de GEI o CO₂-eq en alrededor del 90% y balancear el 10% restante con absorciones nacionales (Gobierno de Colombia, 2021).

3.1.3 Consideraciones adicionales

En cuanto a los factores de emisión utilizados para estimar las emisiones futuras, se calcularon factores de emisión a nivel nacional por tipología vehicular, combustible y tecnología EURO como el promedio ponderado de los factores de emisión estimados a nivel departamental (numeral 2.2.) y el parque automotor para el año base. Así, se asume que estos no cambian con el tiempo como lo sugieren las organizaciones climáticas internacionales (EEA, 2019), adicionalmente al utilizar el promedio ponderado se recogen las características de todos los departamentos.

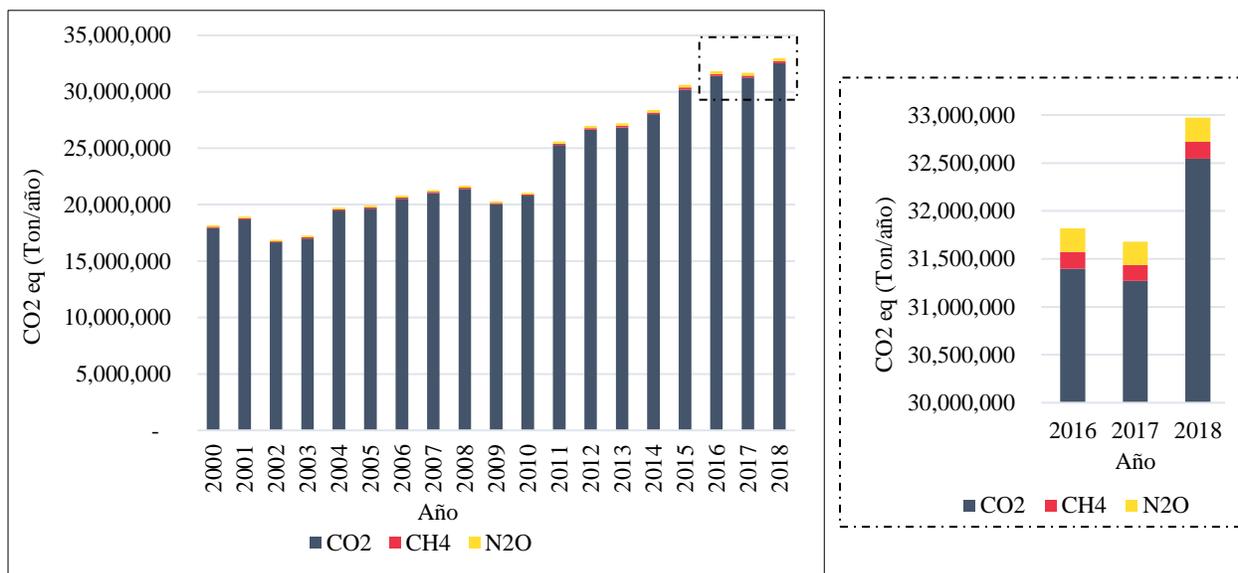
Es importante señalar que los factores de emisión ponderados que se estiman a nivel nacional representan la regulación tecnológica EURO vigente en el país. Con los ascensos tecnológicos

estipulados en los escenarios futuros se incorporarán estándares EURO más altos, para estos casos se determinan los factores de emisión con apoyo de COPERT 5.5.1, y en aquellos en que no se tenga un referente de COPERT se asume su valor con criterio de experto.

Respecto a los factores de actividad, es decir los kilómetros recorridos anualmente por los vehículos, se estima un factor de actividad representativo a nivel nacional por tipología vehicular y combustible, como el promedio ponderado de los factores de actividad estimados por clúster departamental (numeral 2.1) y el parque automotor para el año base. Es importante señalar que, si bien el factor de actividad no varía considerablemente respecto al año base, el total de kilómetros recorridos por categoría vehicular cambiará con el crecimiento del parque automotor.

Para conservar la coherencia y posibilitar la comparación de emisiones se mantendrá el mismo nivel de desagregación para la serie de tiempo (EEA, 2019), es decir que las emisiones futuras de los escenarios se presentarán en una escala temporal anual, con una escala espacial nacional para los mismos contaminantes estimados en el año base, correspondientes a cuatro contaminantes criterio (CO, NO₂, PM_{2.5}, SO₂), un GEI (CO₂) y carbono negro (BC).

Las metas nacionales de reducción (numeral 3.1.2) competen principalmente al CO₂-eq que es la unidad común de masa de GEI y puede estar representando la emisión de más de un GEI. Los GEI asociados a la operación del transporte terrestre por carretera son CO₂, CH₄ y N₂O. EDGAR (Crippa et al., 2021) es un programa con el que la Unión Europea estima las emisiones de GEI según reportes de consumos energéticos de cada país, en la Figura 3-2 se relacionan las emisiones estimadas para el transporte terrestre por carretera para Colombia, el CO₂ representa alrededor del 98% de los GEI emitidos por el transporte terrestre por carretera. En consecuencia, se utilizan las emisiones de CO₂ como variable proxy para evaluar el cumplimiento de las metas de reducción.

Figura 3-2. Emisiones de GEI del transporte terrestre por carretera 2000-2018 (ton/año)

Fuente. Elaboración propia a partir de (Crippa et al., 2021)

3.2 Crecimiento parque automotor

El crecimiento del parque automotor es una de las variables más relevantes en la estimación de las emisiones en escenarios futuros, sin embargo, por la incertidumbre del futuro es frecuente que las entidades gubernamentales se abstengan de precisar cifras del parque automotor futuro. Como se destacaba en el numeral 1.5 para la proyección de emisiones se considera el aumento económico, el crecimiento demográfico y series de tiempo de las variables utilizadas para la estimación del inventario de emisiones (EEA, 2019).

Por lo anterior se consideran como insumos base para calcular el crecimiento del parque automotor la serie histórica y proyección de población nacional del DANE (2020) de 1990 a 2050, la serie histórica y proyección del PIB de 1990 a 2050 la cual se extrae de los reportes de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OECD, 2020) y la base histórica de vehículos registrados en el país. Es importante señalar que el parque automotor histórico utilizado para la estimación de los modelos corresponde a la flota activa, aproximación que se realiza con los factores de obsolescencia relacionados en el numeral 2.3.2.

En esta investigación se opta por evaluar el crecimiento del parque automotor con dos enfoques, los cuales se presentan con mayor detalle en los siguientes apartados. En el primero de estos se

considera la tendencia histórica de crecimiento y con este mismo comportamiento se estima el parque automotor a futuro. En el segundo enfoque se acogen recomendaciones desde la experticia del transporte, en la cual se sugiere que la variable a estimar sea la tasa de motorización y se utilice una estructura funcional de tipo logística que representa un crecimiento restringido del parque automotor.

3.2.1 Tendencial

Para estimar el crecimiento tendencial del parque automotor se prueban diferentes estructuras funcionales, que involucran el PIB y la población como variables independientes y el parque automotor como variable dependiente. Así se obtiene una franja de crecimiento de la flota vehicular hasta 2050 comprendida entre dos curvas con estructuras funcionales diferentes.

La primera estructura funcional es de tipo polinómica de orden dos y considera únicamente la población como variable explicativa del crecimiento del parque automotor, con el que se obtiene un coeficiente de determinación ajustado de 0.97. La segunda estructura funcional es de tipo lineal a partir de los logaritmos de las variables PIB y población con un coeficiente de determinación ajustado de 0.98, las variables se estiman en logaritmo para disminuir las dificultades de no estacionariedad de las series histórica. En la Tabla 3-1 se relacionan los modelos estimados para el crecimiento tendencial del parque automotor.

Tabla 3-1. Modelos de crecimiento tendencial del parque automotor

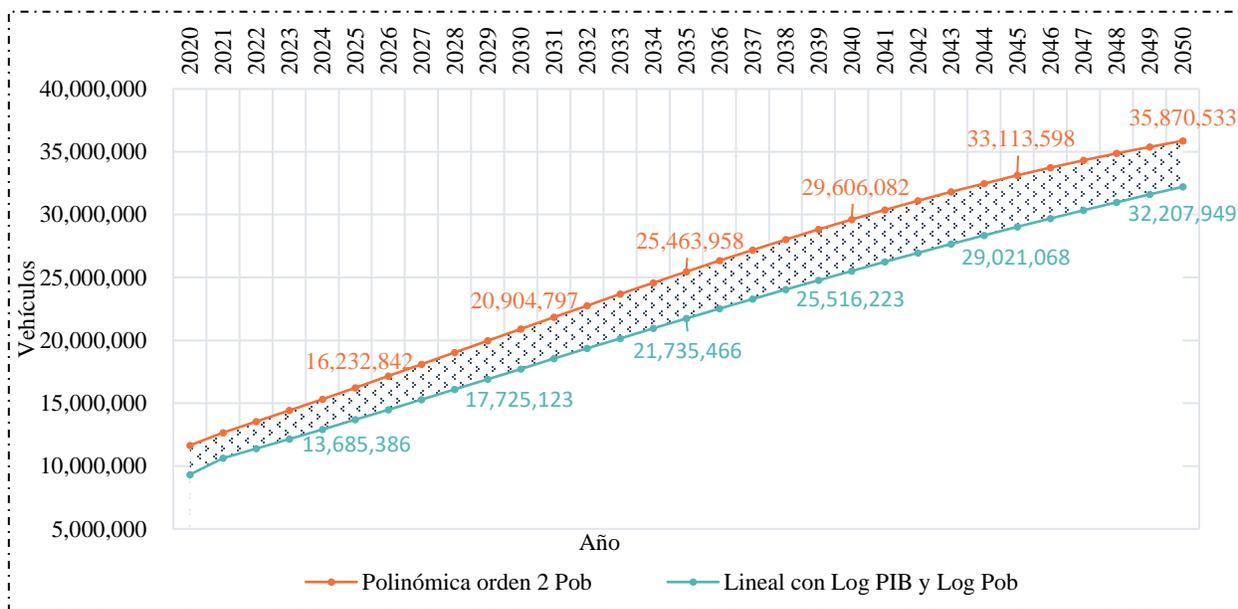
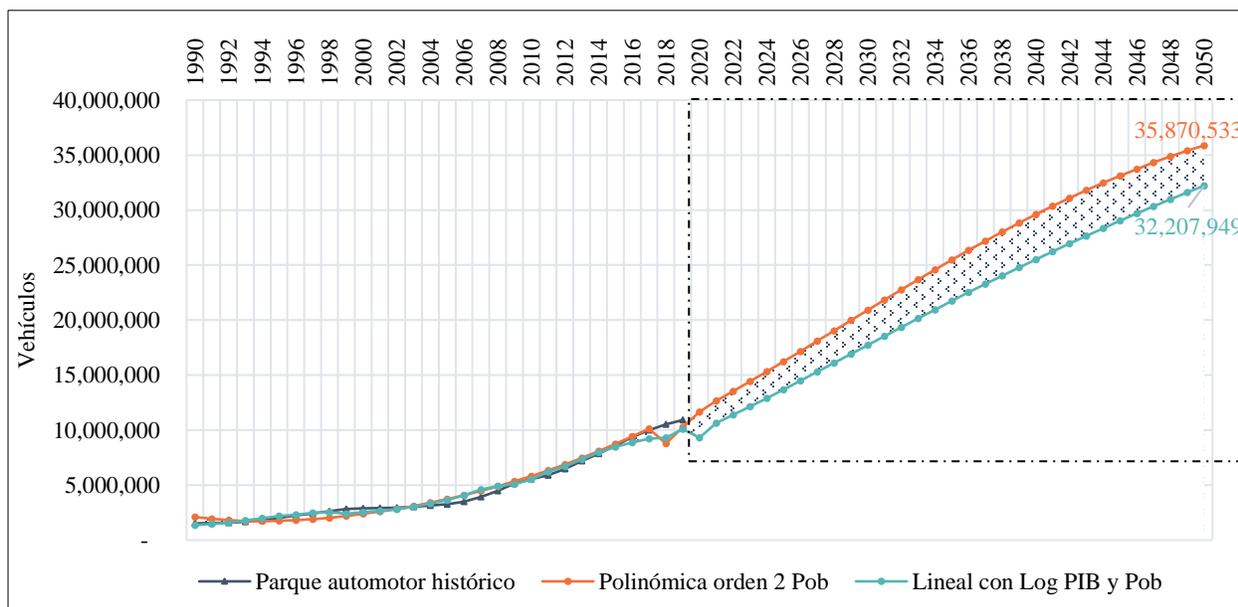
Tipo de modelo	Estructura funcional
Polinómico de orden 2	$P_i = 0.00000005370949Pob_i^2 - 3.950659Pob_i + 74,367,870$
Lineal	$Log P_i = -12.810105 + 1.42106891 Log Pob_i + 1.52157032 Log PIB_i$

P_i: Parque automotor nacional en el año i
 Pob_i: Población nacional en el año i (DANE, 2020)
 PIB_i: PIB nacional en el año i (OECD, 2020) (precios reales en millones de USD)

Fuente. Elaboración propia

A partir de esto se obtiene una franja de crecimiento tendencial del parque automotor en la que el límite superior corresponde a la función polinómica de orden dos con población, y el límite inferior al modelo lineal con los logaritmos de población y PIB, ver Figura 3-3. A partir del crecimiento demográfico y económico del país, para el año 2050 se obtiene una franja del parque automotor nacional comprendida entre 32,207,949 y 35,870,533 vehículos.

Figura 3-3. Franja de crecimiento tendencial del parque automotor



Fuente. Elaboración propia

3.2.2 Movilidad sostenible

En el numeral anterior se relaciona el crecimiento del parque automotor con el aumento de la población y la economía sin que se tenga un límite de expansión. Sin embargo, la experiencia en transporte sugiere que la tasa de motorización de una nación no debería incrementar indefinidamente en el tiempo, en una fase inicial crece lentamente, después presenta un crecimiento acelerado y por último alcanza un nivel de saturación (Tanner, 1983; Kenneth Button,

1993). Por esto las curvas que representan esta condición tienen forma de S y la función logística se ajusta adecuadamente a este fenómeno (Ortúzar & Willumsen, 2008).

Es importante señalar que el estancamiento en el crecimiento del parque automotor se debe a la oferta limitada (infraestructura vial) y al cambio de paradigma hacia la movilidad sostenible. Este último se enfoca a la migración paulatina de viajes que se realizan en modos motorizados individuales hacia alternativas más sostenibles, como el transporte público y sistemas de movilidad activa, también acoge nuevas tendencias en la movilidad, como son los servicios bajo demanda (*MAAS - Mobility As A Service*) que optimizan el uso de la flota existente, y el desarrollo orientado al transporte (DOT) que promueven la densificación de ciudades y la mezcla de usos del suelo, estimulando la cercanía y accesibilidad a actividades reduciendo así la necesidad de realizar viajes.

En este sentido se estima la regresión logística de la tasa de motorización a partir del PIB, en la que por la naturaleza de la función logística se discretizan las variables. Es importante señalar que la variable demográfica de población no se relaciona de manera explícita como una variable dependiente en el modelo, sin embargo, la variable independiente (tasa de motorización) contiene la información poblacional. Así pues, la forma funcional del modelo de crecimiento de movilidad sostenible o con restricción de oferta se presenta en la Ecuación (3.1).

$$TasaD_i = \frac{1.482375}{1 + 27.129088e^{-4.051379PIBD_i}} \quad \text{(Ecuación 3.1)}$$

Donde:

PIBD_i: PIB (precios reales en millones de USD) (OECD, 2020) del año i discretizado con la Ecuación (3.2)

$$PIBD_i = \frac{PIB_i - \text{Mín PIB}}{\text{Máx PIB} - \text{Mín PIB}} = \frac{PIB_i - 259,317.0816443}{686,365.4518123 - 259,317.0816443} \quad \text{(Ecuación 3.2)}$$

TasaD_i: Tasa de motorización discretizada del año i

Para estimar la tasa real de motorización (vehículos/1,000 habitantes) se usa la Ecuación (3.3)

$$\begin{aligned} Tasa\ motorización_i &= (TasaD_i * (\text{Máx Tasa} - \text{Mín Tasa})) + \text{Mín Tasa} = \\ &= (TasaD_i * (216.1133 - 44.5373)) + 44.5373 \quad \text{(Ecuación 3.3)} \end{aligned}$$

Por último, el parque automotor se estima con la Ecuación (3.4)

$$P_i = \frac{Tasa\ motorización_i * Población_i}{1,000} \quad (Ecuación\ 3.4)$$

Donde:

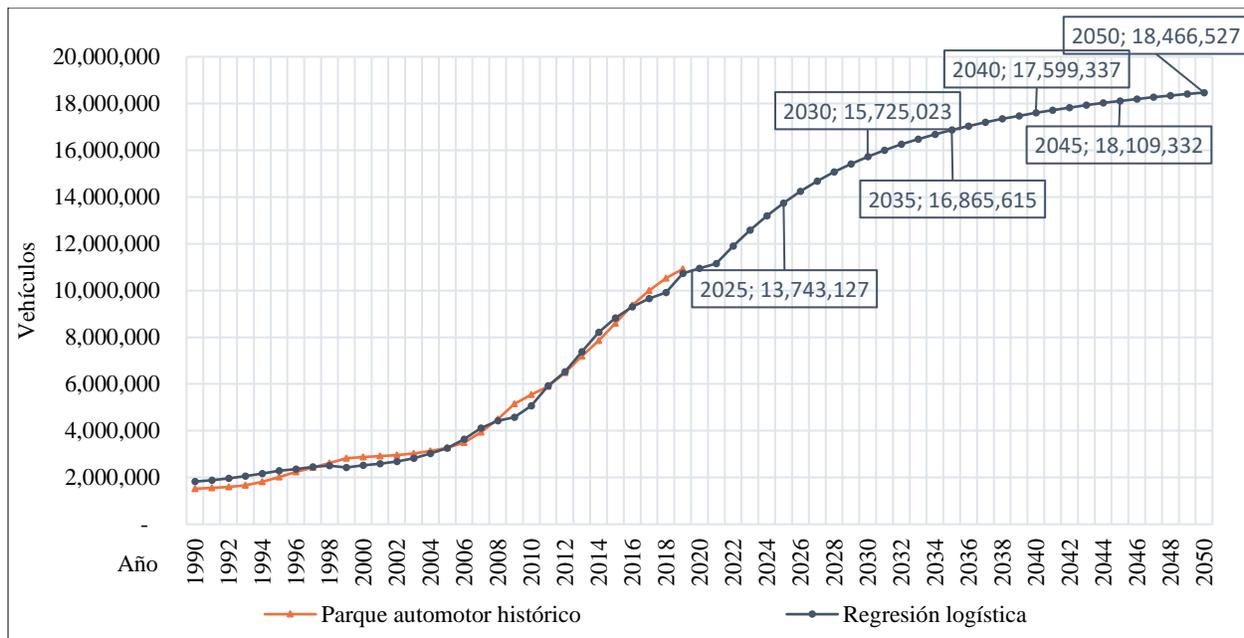
P_i : Parque automotor nacional en el año i

Población $_i$: Población nacional en el año i (DANE, 2020)

Tasa motorización $_i$: Tasa de motorización (vehículos/1,000 hab) del año i estimada con la Ecuación (3.1) y Ecuación (3.3)

A partir de lo anterior se tiene una expresión en la que el PIB permite estimar la tasa de motorización, la cual no crece de forma indefinida, sino que alcanza un nivel de saturación a partir del cual se mantiene casi constante, siendo así una aproximación para representar la restricción de oferta vial. Por último, el parque automotor se establece como el producto de la tasa de motorización, obtenida del modelo de regresión logística, con la población. En la Figura 3-4 se identifican los resultados del modelo, para el año 2050 se tiene una tasa de 297.88 vehículos por cada 1,000 habitantes, lo que representa un parque automotor total activo de 18,466,527 vehículos.

Figura 3-4. Crecimiento del parque automotor - movilidad sostenible



Fuente. Elaboración propia

3.3 Línea base de emisiones – Escenario BAU

Para medir el impacto de las acciones vinculadas a los escenarios se establece una línea base de emisiones, la cual corresponde a un escenario *Business as Usual* (BAU) en el que el gobierno no tiene un plan definido para la reducción de emisiones. En este sentido se considera el parque automotor medio de la franja establecida con el crecimiento tendencial, así como los factores de emisión y de actividad ponderados a nivel nacional.

Se conserva la distribución de las tipologías vehiculares según la tecnología vehicular del año base, y se incorporan paulatinamente los estándares EURO más altos vigentes asumiendo que será una exigencia del mercado automovilístico colombiano. A 2050 en los buses predomina el diésel, en los vehículos ligeros y motos la gasolina, en los vehículos de carga el diésel. En el Anexo F se relaciona el detalle del ascenso tecnológico a 2050. Las emisiones anuales del escenario BAU por corte temporal y contaminante se presentan en la Tabla 3-2.

Tabla 3-2. Emisiones período 2020-2050. Línea base (BAU) (ton/año)

Contaminante	Año							2050-2020* 2020
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
BC (Ton/año)	2,514	2,460	1,871	1,235	967	228	137	-94.6%
CO (Ton/año)	797,884	827,392	725,198	697,062	329,384	337,730	166,112	-79.2%
CO ₂ (Ton/año)	35,136,364	47,518,793	58,329,303	67,439,195	76,287,900	83,027,108	85,668,826	+143.8%
NO ₂ (Ton/año)	16,935	20,829	18,179	15,383	13,044	9,852	8,975	-47.0%
PM _{2.5} (Ton/año)	4,872	4,794	3,963	2,714	1,763	652	431	-91.2%
SO ₂ (Ton/año)	2,133	2,865	3,613	4,333	4,904	5,493	5,654	+165.0%
* (+)Incremento (-)Reducción								

Fuente. Elaboración propia

Las emisiones de carbono negro y material particulado fino son las que presentan la mayor reducción a 2050 respecto al 2020, esto se debe principalmente a que desde el estándar EURO 5 se adiciona filtro de partículas. En tanto, las emisiones de dióxido de carbono y dióxido de azufre incrementan a valores que duplican y exceden las emisiones estimadas a 2020.

3.4 Escenarios de reducción

En la evaluación de emisiones a futuro es relevante la postulación de escenarios, que presentan los diferentes caminos que tiene la nación a un futuro posible, son una herramienta esencial para que los tomadores de decisiones tengan una mejor comprensión de las consecuencias que se tendrían a futuro a partir de las acciones que se emprendan actualmente o aquellas que se dejen consignadas para iniciar en un término establecido.

Los escenarios se caracterizan por permitir la incorporación explícita de la incertidumbre inherente al futuro, así se constituyen en exploraciones respondiendo el cuestionamiento básico de ¿Qué pasaría sí? La formulación de escenarios tiene una amplia gama de modelos, variables, tecnologías, entre otros que pueden variar entre escenarios, así será labor del profesional la elección de medidas que permitirán la construcción de los escenarios de mitigación. Es importante señalar que los escenarios pueden integrar situaciones hipotéticas, por lo que pueden retar las percepciones y guiar la toma de decisiones (CREE, 2022).

En esta investigación se consideraron dos variables fluctuantes entre los escenarios: el crecimiento del parque automotor y la distribución tecnológica de éste. Es importante señalar que cada escenario se fue estructurando en la medida en que se pretendía acercarse al cumplimiento de las metas de reducción. En este sentido se definen tres escenarios futuros del transporte terrestre por carretera, ver Tabla 3-3. En los siguientes numerales se presentan los elementos particulares de cada escenario y las emisiones estimadas.

Tabla 3-3. Escenarios futuros del transporte terrestre por carretera

Escenario	A: Apuesta por reducción de vehículos	B: Apuesta por tecnologías limpias	C: Gran apuesta
	Mayoría de los vehículos utilizan combustibles fósiles	Mayoría de los vehículos utilizan combustibles fósiles	Reducción fuerte de vehículos de combustibles fósiles
			
Características	La participación de vehículos de tecnologías limpias se conserva	Incremento lento de vehículos de tecnologías limpias	Mayoría de los vehículos son de tecnologías limpias
			
Parque automotor	Movilidad sostenible	Movilidad sostenible	Movilidad sostenible
Penetración tecnológica	Baja	Mediana	Alta
Distribución tecnológica	Actual	Steer	Mayor a Steer

Fuente. Elaboración propia

3.4.1 Escenario A: Apuesta por reducción de vehículos

Este escenario se enfoca a la estrategia de movilidad sostenible con la reducción del parque automotor (18,466,527 vehículos a 2050), sin una apuesta robusta por el ascenso tecnológico a tecnologías limpias, así la distribución de las tipologías vehiculares por tipo de combustible se mantiene constante según lo identificado para el 2019.

A 2050 un 98.9% de los buses, un 100% de los camiones grandes, un 99.9% de los tractocamiones y un 99.9% de las volquetas operan con diésel. Un 95.8% de los vehículos livianos particulares,

un 99.9% de las motos, un 82.1% de los taxis y un 100% de los camiones pequeños funcionan con gasolina.

En el Anexo F se relaciona el detalle del ascenso tecnológico a 2050, se evidencia que en todas las tipologías vehiculares predomina el uso de combustibles fósiles con la incorporación paulatina de estándares EURO más altos. Las emisiones anuales del escenario A por corte temporal y contaminante se presentan en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4. Emisiones período 2020-2050. Escenario A (ton/año)

Contaminante	Año							2050-2020* 2020
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
BC (Ton/año)	2,505	2,435	1,833	1,195	924	183	94	-96.3%
CO (Ton/año)	795,268	815,826	702,980	661,109	281,376	277,407	101,795	-87.2%
CO ₂ (Ton/año)	35,021,124	43,700,491	44,766,641	45,642,157	43,024,891	42,176,173	41,900,263	+19.6%
NO ₂ (Ton/año)	16,879	19,694	16,687	13,561	10,870	7,522	6,618	-60.8%
PM _{2.5} (Ton/año)	4,856	4,737	3,847	2,580	1,614	490	266	-94.5%
SO ₂ (Ton/año)	2,126	2,641	2,973	3,151	3,171	3,249	3,220	+51.4%
* (+)Incremento (-)Reducción								

Fuente. Elaboración propia

De manera similar que en el escenario BAU el material particulado y el carbono negro tienen la reducción más amplia de emisiones. Del 2020 al 2050 las emisiones de dióxido de carbono y de dióxido de azufre aumentan, sin embargo, lo hacen en una proporción inferior a lo que se estimó en el escenario BAU, lo cual atiende a la reducción del parque automotor.

3.4.2 Escenario B: Apuesta por tecnologías limpias

Este escenario se enfoca a una apuesta moderada por tecnologías limpias. Las apuestas de ascenso tecnológico a 2050 por tipología vehicular se extraen del estudio que permite identificar las clases de vehículos y modalidades de transporte susceptibles de realizar el ascenso tecnológico hacia tecnologías de cero y bajas emisiones a nivel nacional (Steer, 2020).

Steer (2020) realiza un inventario del parque automotor, se analizan las perspectivas de tecnologías de cero y bajas emisiones, se evalúan los patrones de crecimiento de casos internacionales, se analizan los motores de cambio, se construyen escenarios de ascenso tecnológico y se evalúan los escenarios para cuantificar los impactos. Los parámetros analizados en cada escenario corresponden a estimación de uso o actividad, consumo de energéticos, emisiones de material particulado y CO₂-eq y la inversión para la adquisición de vehículos. Finalmente se priorizan los

escenarios por los ahorros en gastos de salud, la reducción de emisiones de GEI, el ahorro en costo operativos, el impacto fiscal nacional y la ganancia por reducción de CO₂.

A partir de lo descrito anteriormente se tienen las recomendaciones de ascenso tecnológico por tipología vehicular que se relacionan en la Tabla 3-5 y que se acogen en el escenario B. Los porcentajes no mostrados en la tabla corresponden al uso de combustibles fósiles.

Tabla 3-5. Distribución tecnológica a 2050. Escenario B

Buses*	Vehículos ligeros particulares	Motos	Taxis	Tractocamiones	Volquetas y Camiones grandes	Camiones pequeños
Ley de movilidad eléctrica (Ley 1964 de 2019). Desde el 2035, el 100% de los buses nuevos serán eléctricos	20.5% híbridos 10% eléctricos 9% GNV 4% hidrógeno	8% eléctrico	19.5% eléctricos 10.5% híbridos	70.5% diésel 19.5% eléctrico 10% hidrógeno	63.5% eléctrico 30% hidrógeno 6.5% diésel	63.5% eléctrico 30% hidrógeno 6.5% gasolina

*La ley estipula el ascenso tecnológico a vehículos eléctricos o de cero emisiones para el sistema de transporte masivo, sin embargo, en esta tesis se asume que esta estrategia se replica para todos los buses

Fuente. Elaboración propia a partir de (Steer, 2020)

En el Anexo F se relaciona el detalle del ascenso tecnológico a 2050, se evidencia una penetración tecnológica mediana hacia tecnologías limpias y la participación de combustibles fósiles con la incorporación paulatina de estándares EURO más altos. Las emisiones anuales del escenario B por corte temporal y contaminante se presentan en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6. Emisiones período 2020-2050. Escenario B (ton/año)

Contaminante	Año							2050-2020 ₃₀
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
BC (Ton/año)	2,505	2,433	1,830	1,191	590	159	86	-96.6%
CO (Ton/año)	791,291	809,556	696,710	651,893	268,653	256,692	78,862	-90.0%
CO ₂ (Ton/año)	34,901,718	42,203,414	45,446,190	44,448,861	42,108,969	35,146,784	32,510,348	-6.9%
NO ₂ (Ton/año)	16,867	19,384	16,328	12,745	8,357	4,331	3,317	-80.3%
PM _{2.5} (Ton/año)	4,853	4,729	3,831	2,561	1,088	439	239	-95.1%
SO ₂ (Ton/año)	2,111	2,514	2,708	2,744	2,593	2,447	2,245	+6.4%

* (+)Incremento (-)Reducción

Fuente. Elaboración propia

A diferencia de los resultados obtenidos para los escenarios BAU y A (apuesta por reducción de vehículos), las emisiones de la mayoría de los contaminantes disminuyen a 2050 respecto al 2020 con lo que se identifica que el ascenso tecnológico a tecnologías limpias es un factor determinante para la reducción de emisiones.

3.4.3 Escenario C: Gran apuesta

El escenario de la gran apuesta se refiere a una osada postura por la incorporación de tecnologías limpias en el parque automotor colombiano. En la Tabla 3-7 se presenta la distribución por tecnología para las tipologías vehiculares a 2050, se precisa que para los buses se mantiene la distribución tecnológica relacionada para el escenario B pues corresponde a una normativa oficial.

Tabla 3-7. Distribución tecnológica a 2050. Escenario C

Buses*	Vehículos ligeros particulares	Motos	Taxis	Tractocamiones	Volquetas y Camiones grandes	Camiones pequeños
Ley de movilidad eléctrica (Ley 1964 de 2019). Desde el 2035, el 100% de los buses nuevos serán eléctricos	70% eléctricos 20.5% híbridos 4% hidrógeno	90% eléctrico	80% eléctrico 10.5% híbrido 4% hidrógeno	60% hidrógeno 20% eléctrico 5.1% GNV	63.5% eléctrico 30% hidrógeno 4.7% GNV	63.5% eléctrico 30% hidrógeno 4.7% GNV

*La ley estipula el ascenso tecnológico a vehículos eléctricos o de cero emisiones para el sistema de transporte masivo, sin embargo, en esta tesis se asume que esta estrategia se replica para todos los buses

Fuente. Elaboración propia

En el Anexo F se relaciona el detalle del ascenso tecnológico a 2050, se evidencia una penetración tecnológica alta hacia tecnologías limpias y la participación reducida de combustibles fósiles con la incorporación paulatina de estándares EURO más altos. Las emisiones anuales del escenario C por corte temporal y contaminante se presentan en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8. Emisiones período 2020-2050. Escenario C (ton/año)

Contaminante	Año							2050-2020 ₃ 2020
	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	
BC (Ton/año)	2,496	2,413	1,481	1,001	299	74	49	-98.1%
CO (Ton/año)	772,397	782,790	569,455	431,207	175,684	90,197	17,112	-97.8%
CO ₂ (Ton/año)	34,498,327	39,534,021	38,507,842	34,706,760	28,522,833	19,020,231	13,996,357	-59.4%
NO ₂ (Ton/año)	16,804	19,233	14,589	12,092	6,552	3,344	2,848	-83.1%
PM _{2.5} (Ton/año)	4,820	4,649	2,971	1,947	540	163	80	-98.3%
SO ₂ (Ton/año)	2,072	2,242	2,114	1,837	1,433	953	503	-75.7%

* (+)Incremento (-)Reducción

Fuente. Elaboración propia

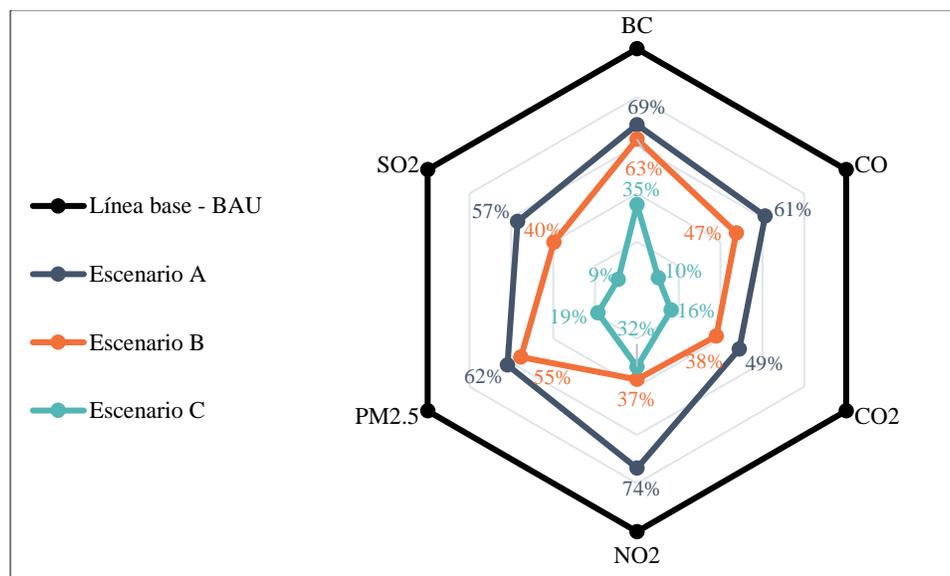
Este escenario que se caracteriza por el ascenso tecnológico alto hacia tecnologías limpias se tiene una reducción en la emisión de todos los contaminantes a 2050 respecto al 2020.

3.5 Análisis de la proyección de emisiones

En los numerales anteriores se han presentado los supuestos de ascenso tecnológico y las emisiones estimadas a 2050 en cada escenario. A continuación, se realiza la comparación entre los resultados obtenidos en cada escenario, y se evalúa el cumplimiento de las metas de reducción.

En la Figura 3-5 se tiene un esquema comparativo de las emisiones estimadas en los diferentes escenarios al año 2050. La línea base o escenario BAU representa el escenario de comparación, así los porcentajes relacionados en la gráfica corresponden al cociente de la emisión estimada en el escenario de reducción (A, B, C) entre la emisión calculada en la línea base.

Figura 3-5. Comparación de emisiones entre línea base y escenarios. Año 2050



Fuente. Elaboración propia

Con la apuesta por la reducción de vehículos (escenario A) en promedio las emisiones son un 62% de las que se tendrían con el escenario BAU. Ahora bien, si se le apuesta a que este parque automotor tenga un ascenso tecnológico moderado (escenario B) en promedio las emisiones corresponden a un 47%. Finalmente, si se realiza una gran apuesta por las tecnologías limpias (escenario C) en promedio las emisiones serían un 20% de las calculadas para el escenario BAU.

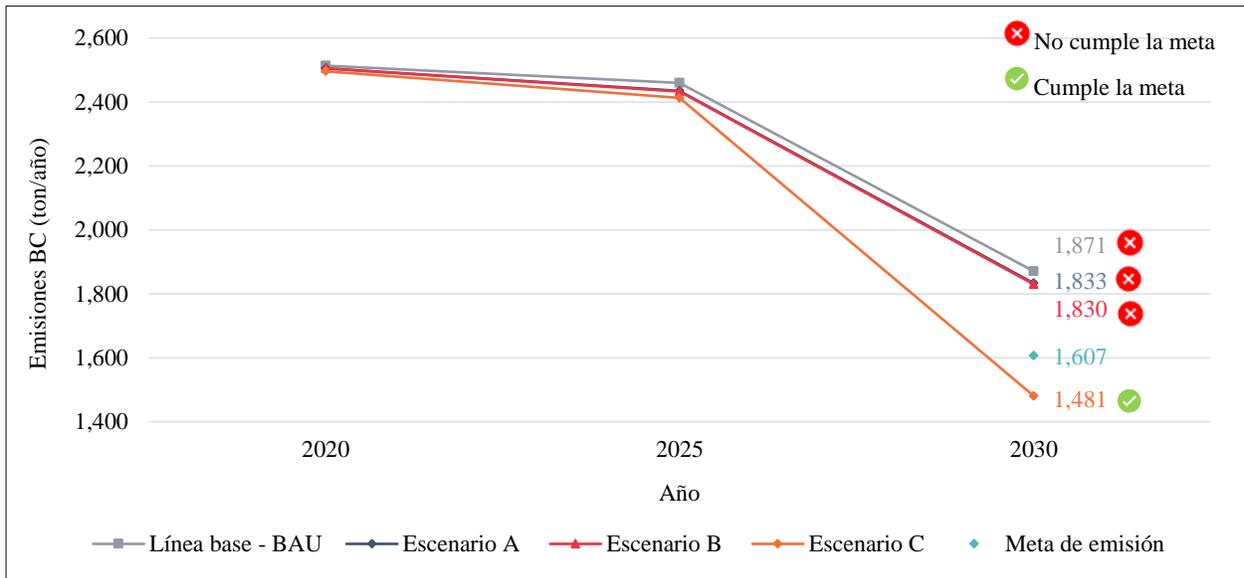
3.5.1 Meta de carbono negro

Como se destacó en el numeral 3.1.2 para cumplir una de las metas pactadas en la NDC, la emisión de carbono negro por el transporte terrestre por carretera a 2030 debe ser como máximo de 1,607 toneladas/año. En la Figura 3-6 se relacionan las emisiones de BC estimadas a 2030 para los diferentes escenarios y el umbral de emisión para cumplir la meta.

A partir de la Figura 3-6 se identifica que los escenarios de línea base (BAU), A y B reportan una emisión alrededor de 1,800 ton/año, en tanto el escenario C representa una emisión de BC por debajo del umbral con 1,481 ton/año. Así, dentro de los escenarios evaluados, el único con el que

se logra cumplir la meta de reducción de carbono en un 40% a 2030 (respecto al 2014) es el escenario C que se caracteriza por una alta penetración de tecnologías limpias en un parque automotor que crece lentamente por el cambio de paradigma hacia la movilidad sostenible.

Figura 3-6. Cumplimiento de meta de reducción de carbono negro (ton/año)



Fuente. Elaboración propia

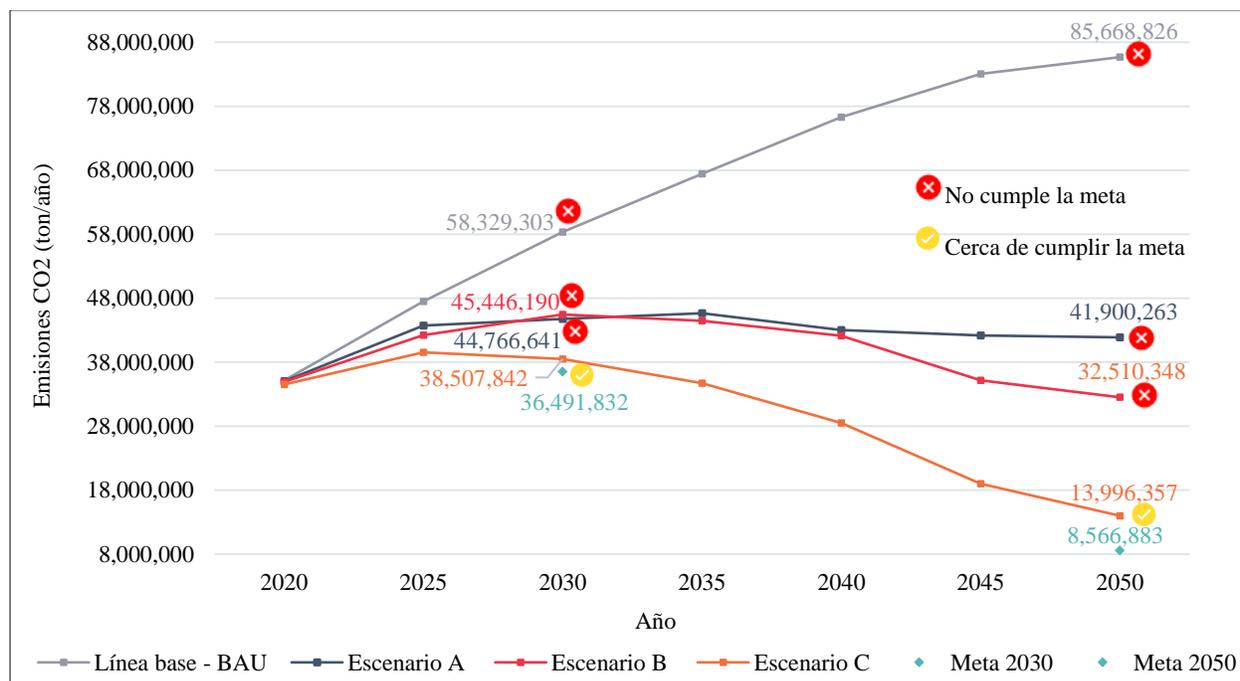
3.5.2 Meta de GEI

En cuanto a las metas de GEI la NDC estipula la reducción a 2030 y 2050 (numeral 3.1.2). En la Figura 3-7 se presentan las emisiones de CO₂ para los diferentes escenarios en el período 2020 a 2050. La meta de 2030 equivale a 36,491,831 ton CO₂-eq que corresponde a la emisión estimada a 2030 en el escenario BAU menos la reducción de emisiones que le compete al transporte terrestre por carretera (21,837,471 ton CO₂-eq, ver numeral 3.1.2). En tanto la meta de emisión a 2050 equivale al 10% de la emisión estimada en el escenario BAU, pues se estima que para alcanzar la neutralidad en carbono se deben reducir las emisiones en un 90%.

Con lo presentado en la Figura 3-7 se tiene que tanto para 2030 como para el 2050 los escenarios de línea base (BAU), A y B no satisfacen la meta de reducción de emisiones de GEI. Sin embargo, es importante señalar que con los escenarios A y B se logra una reducción importante de emisiones de GEI respecto al escenario BAU de aproximadamente 23% para el 2030 y 57% para el 2050.

Respecto al escenario C, que corresponde a la gran apuesta por el ascenso tecnológico acelerado hacia tecnologías limpias, este logra acercarse a las metas de reducción de GEI tanto para el 2030 como para el 2050, pues de los escenarios evaluados en esta investigación es el escenario con el que se obtiene la menor cantidad de emisiones de CO₂.

Figura 3-7. Cumplimiento de metas de reducción de GEI (ton/año)



Fuente. Elaboración propia

Como se destacó previamente las NDC presentan los compromisos de la nación para dar cumplimiento a las metas del Acuerdo de París. Después de las NDC se encuentran las Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación (NAMAS) que son políticas, regulaciones, programas u otras acciones que reducen las emisiones de GEI de sus niveles tendenciales, en Colombia estas se enmarcan en la Política Nacional de Cambio Climático, se alinean con la Estrategia de Desarrollo Bajo en Carbono y contribuyen a la consecución de las metas de las NDC.

A 2030 el sector del transporte puede reducir 6,000,000 ton CO₂-eq con las NAMAS vigentes (Correa-Laguna et al., 2021), las cuales son: Desarrollo Orientado al Transporte (TOD), mejorar la eficiencia del combustible de los vuelos comerciales, mejorar el funcionamiento de la logística urbana en las principales ciudades del país, gestión activa de la demanda de transporte y viajes (TAnDem), incrementar la participación del transporte fluvial en el segmento de carga, aumentar

la participación del transporte ferroviario en el segmento de mercancías, aumentar la participación de vehículos eléctricos (MovE), la primera línea del Metro de Bogotá, trenes regionales para el área metropolitana de Bogotá, modernización del transporte de carga, navegabilidad del río Magdalena.

Con lo descrito anteriormente es relevante que la nación aclare las metas de reducción por sector, pues en esta investigación se hizo una aproximación de la reducción de emisiones de GEI a 2030 que compete al sector del transporte terrestre por carretera (numeral 3.1.2) siendo de 21,837,471 ton CO₂-eq, mientras que con las NAMAs vigentes se espera alcanzar una reducción de 6,000,000 ton CO₂-eq, lo cual evidencia una disparidad entre lo que se debería reducir y las acciones (NAMA) con las que se pretenden alcanzar las metas.

4. Conclusiones y recomendaciones

Como resultado de esta investigación se crea nuevo conocimiento que se divulga a la comunidad mediante: i) Ponencia con el título *Methodological route for estimation and projection of the national inventory of emissions by mobile sources* presentada en el XIV Congreso Colombiano de Tránsito y Transporte desarrollado del 24 al 26 de agosto de 2022. ii) Artículo científico con título *Road transport exhaust emissions in Colombia. 1990–2020 trends and spatial disaggregation* sometido a Transportation Research Part D. iii) Ponencia con el título Aproximación a la proyección de emisiones por el transporte terrestre por carretera en Colombia presentada en el IX Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire, Cambio Climático y Salud Pública desarrollado del 22 al 24 de marzo de 2023. iv) Artículo científico con título *Estimation of Colombia's road transport emissions and its disaggregation* sometido a Environmental Science and Pollution Research.

Esta tesis pretendió responder dos cuestionamientos los cuales se presentan en negrilla con sus respuestas en los numerales 4.2 y 4.3. Adicionalmente a continuación se relacionan otros aspectos que formaron parte de la discusión de la investigación y que se compilan según el capítulo en el cual se discutieron. Finalmente se describen recomendaciones y aproximaciones para investigaciones futuras.

4.1 Marco de referencia

- Históricamente el sector económico del transporte es uno de los que más aporta emisiones de gases de efecto invernadero en Colombia, particularmente en Bogotá D.C. es la principal fuente de emisión. La quema de combustibles del transporte terrestre por carretera representa la mayor cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero y contaminantes criterio del sector transporte.
- La red vial del país está compuesta en su mayoría por vías de la red terciaria (69%), seguida de infraestructura de la red secundaria (22%), y en menor proporción de participación, pero con una altísima relevancia, la red primaria (9%). En cuanto a calidad de la malla vial, en términos generales las vías pavimentadas están en buen estado, y en las vías sin pavimentar o en afirmado prevalecen condiciones regulares o deficientes.

- Del parque automotor en Colombia para el 2019: el 93% de los vehículos en Colombia eran particulares, apenas un 2.5% eran vehículos de carga, y en promedio 1 de cada 2 unidades de transporte eran motocicletas. De la edad promedio del parque automotor, la moto es el vehículo con la menor edad y los vehículos de carga tiene la edad media más alta. En cuanto a combustible, 9 de cada 10 vehículos en el país utilizan gasolina, y 5 de cada 10 vehículos públicos emplean diésel/biodiésel.
- Colombia tiene un crecimiento sostenido en la tasa de motorización y su cifra de 111 veh/1,000 hab para el 2015 sitúa al país en aquellos con las tasas más bajas a nivel mundial y en el promedio de América Latina, sin embargo, el crecimiento medio anual de motorización es de 5.2%, un valor muy alejado al de países desarrollados como Estados Unidos con un 0.5% o Australia con un 1%, de ahí que se deba prestar atención especial al transporte terrestre en el país, pues un crecimiento continuo del parque automotor sin ingreso contundente de tecnologías limpias genera más emisiones atmosféricas y en consecuencia afecta la calidad del aire.
- Históricamente en Colombia no ha existido una armonización adecuada entre la calidad del combustible refinado en el país y la tecnología vehicular producida por los fabricantes europeos, los cuales se ciñen a los estándares ambientales mundiales vigentes, es así como los vehículos nuevos que ingresan al país tienen la tecnología vehicular que se exigía en Europa hace una década.
- Las variables de composición del parque automotor (categoría, combustible, tecnología EURO), kilómetros recorridos anualmente, longitud de red vial, tránsito promedio diario, rendimiento promedio del combustible y ventas de combustible son esenciales en la estimación de inventarios de emisiones atmosféricas por fuentes móviles.
- A pesar de que los inventarios de emisiones por fuentes móviles son fundamentales para la gestión de la calidad del aire pues apoyan la determinación de políticas públicas, la construcción de éstos a nivel local, regional o nacional aún no es una práctica suficientemente difundida y acogida en Colombia.
- Para la proyección de emisiones hacia el futuro es necesario la realización de tres procesos en paralelo: i) Proyección de factores de actividad a partir de la línea base y tendencias históricas con variables demográficas y/o macroeconómicas; ii) Revisión y ajuste de factores de emisión para el futuro, especialmente para las tecnologías

emergentes; iii) Definición de escenarios de proyección con los respectivos supuestos, medidas y políticas adoptadas, implementadas y/o planificadas.

4.2 Emisiones año base 2019

- **¿Cómo estimar las emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero por el transporte terrestre por carretera, a partir de la exploración de datos de transporte?** Se organiza una ruta metodológica en la que el tamaño del parque automotor y su distribución tecnológica, el rendimiento del combustible, los kilómetros recorridos anualmente y las ventas de combustible, aunados a los diferentes insumos utilizados para establecer los factores de emisión resultaron ser las variables esenciales para la estimación del inventario de emisiones por el transporte terrestre por carretera.
- Con la información de los vehículos usados publicados en portales web de ventas vehiculares y con los registros de las revisiones técnico-mecánicas se estableció el factor de actividad anual del parque automotor colombiano, siendo los vehículos de carga y los buses aquellas tipologías vehiculares con las actividades anuales más altas del país.
- Utilizar los registros vehiculares directamente como parque automotor activo representa un alto grado de incertidumbre para la estimación de emisiones, por lo que aproximar la flota de vehículos activos con la eliminación de vehículos con modelos anteriores a 1990, así como la posterior aplicación de un factor de obsolescencia por categoría vehicular¹¹ tal y como se realizó en el estudio se constituye en una buena práctica para mejorar la certidumbre de las estimaciones.
- Con los insumos utilizados para el cálculo de las emisiones se obtuvo una aproximación entre los consumos y ventas de combustibles fósiles de 5.8% para gasolina y 3.9% para diésel, permitiendo así mejorar la certidumbre en la estimación de emisiones.
- La estructura metodológica estructurada y utilizada para estimar las emisiones generadas por el transporte terrestre por carretera en Colombia en el año 2019 permitió establecer que las emisiones anuales de NO₂ fueron de 16,446.41 ton/año, de SO₂ de 2,078.15 ton/año, de PM_{2.5} de 4,556.28 ton/año, de CO₂ de 34,184,852.86 ton/año, de CO de 774,636.97 ton/año y de carbono negro de 2,352.12 ton/año. Por lo que, en

¹¹ Buses: 3% Heavy Duty Vehicles: 1% L-Category: 3% Passenger cars: 2% Light commercial vehicles: 2%

Colombia, la mayor cantidad de emisiones del transporte terrestre por carretera corresponden al dióxido de carbono, seguido por el monóxido de carbono, dióxido de nitrógeno, material particulado fino, carbono negro y finalmente con las menores emisiones dentro de los contaminantes considerados el dióxido de azufre.

- Los vehículos de carga (camiones, volquetas y tractocamiones) son la tipología vehicular que más aporta a las emisiones nacionales, pues aporta más del 53% a las emisiones de BC y NO₂, y alrededor del 49% de las emisiones de PM_{2.5}. A pesar de que esta tipología vehicular presenta baja actividad vehicular total (8.2%) en el total nacional, Colombia tiene una de las flotas de transporte de carga más antiguas en la región predominando así vehículos menos eficientes.
- Las motocicletas que representan alrededor del 58% del parque automotor registrado y tienen la actividad vehicular más alta del país (43.8%) resulta ser la tipología vehicular que más contribuye a las emisiones de CO. El material particulado fino (PM_{2.5}) es mayormente producido por buses y vehículos de carga, con un aporte de 25.3% y 49.3% respectivamente.
- El consumo de gasolina aporta en las emisiones el 95.5% de CO, el 50.1% de CO₂ y el 87.4% de SO₂. Mientras que el consumo de diésel contribuye en un 94.2% a las emisiones de BC, un 92.3% a las de NO₂ y un 80.3% a las de PM_{2.5}. Con base en los contaminantes evaluados se tiene que la gasolina es el combustible que más aporta a las emisiones de GEI y contaminantes criterio generados por la actividad del transporte terrestre por carretera en Colombia, en tanto el diésel es el combustible que representa las mayores emisiones de material particulado y carbono negro.
- Bogotá y Cundinamarca son las regiones que más aportan a las emisiones nacionales generadas por la actividad del transporte terrestre por carretera, pues Bogotá contribuye el 27.9% de SO₂, 20.5% de CO₂ y 14.9% de CO, en tanto Cundinamarca es el emisor principal de NO₂, PM_{2.5} y BC con el 28.3%, 23.5% y 26.0% respectivamente.
- En cuanto al índice de emisiones por vehículo, Cundinamarca y Boyacá son los departamentos más críticos respecto a BC, NO₂ y PM_{2.5} pues del parque automotor registrado en estos un 10.9% y 9.1% respectivamente corresponde a vehículos grandes (carga o buses). Para el CO corresponden a los departamentos con mayor participación de motocicletas en su parque automotor, siendo estos Archipiélago de San Andrés,

Chocó y Vichada. Para el SO₂ se corresponde con los departamentos con mayor participación de unidades de transporte a gasolina, tales como Cundinamarca, Bogotá, Boyacá y Atlántico.

- Al considerar como línea base de comparación los resultados del IDEAM para el 2010, se tiene que al 2019 han disminuido las emisiones de algunos contaminantes, de SO₂ en un 17.8%, de PM_{2.5} en un 51.5% y de BC en un 13.9%. Sin embargo, las emisiones de CO han aumentado en un 14.5%. La reducción de las emisiones de contaminantes criterio (SO₂ y PM_{2.5}) y de carbono negro responde a la renovación del parque automotor a tecnologías más limpias, en tanto el aumento de la emisión de CO se debe al incremento de registros vehiculares de motocicletas con estándares intermedios de tecnología vehicular (Euro 2).
- En el ámbito nacional al comparar los índices per cápita de contaminación del IDEAM para el 2014 y los obtenidos en el presente estudio para el 2019, se tiene que en cinco años se registra una reducción del 47% de PM_{2.5}, del 33% de SO₂ y del 17% de BC, en tanto para el CO se registra un incremento del 15%. En términos generales las emisiones del transporte terrestre por carretera por habitante en Colombia han disminuido en los últimos cinco años, sin embargo, el incremento de las motocicletas ha limitado la reducción de emisiones de CO.

4.3 Proyección de emisiones

- **¿Cómo cambiarán las emisiones generadas por el transporte terrestre por carretera en Colombia en un período de 20 años?** En términos generales, a futuro las emisiones de CO₂ y SO₂ aumentarán, mientras que las emisiones de BC, CO, NO₂ y PM_{2.5} tienden a disminuir. Los aumentos responden al incremento del parque automotor y a la conservación del contenido de azufre en el combustible (lo cual se asumió para esta investigación). Mientras que las disminuciones se deben a la incorporación progresiva de estándares EURO más altos.
- En la aproximación metodológica para la proyección de inventarios de emisiones por el transporte terrestre por carretera se requiere validar y de ser necesario ajustar los factores de emisión según la penetración de nuevas tecnologías vehiculares en el país, así como revisar la pertinencia de mantener constantes los factores de actividad. De otra parte, se

requiere aplicar factores de crecimiento al parque automotor del año base y estructurar paralelamente los escenarios de proyección centrándose en políticas probables de incorporación.

- El parque automotor nacional estimado a 2050 es de 34,039,241 vehículos considerando el crecimiento demográfico y económico del país. En tanto, al adoptar las sugerencias de la planificación del transporte en las que se sustenta que la tasa de motorización no debería incrementar infinitamente en el tiempo, se estimó una flota vehicular de 18,466,527 vehículos.
- Si se considera que el gobierno no tiene un plan definido para la reducción de emisiones, es decir que el parque automotor incrementa según la demografía y economía del país sin un umbral límite, y que los ascensos tecnológicos se centran básicamente en la exigencia paulatina de estándares EURO más altos a los combustibles fósiles, para 2050 las emisiones serían de 137 ton de BC, 166,112 ton de CO, 85,668,826 ton de CO₂, 8,975 ton de NO₂, 431 ton de PM_{2.5} y 5,654 ton de SO₂.
- Con la propuesta de escenarios de reducción de emisiones se tiene que con la apuesta por reducción de vehículos (escenario A) en promedio las emisiones disminuyen un 38%, ahora bien, si se le apuesta a que este parque automotor tenga un ascenso tecnológico moderado (escenario B) las emisiones se reducen un 53%, finalmente si se realiza apuesta osada por las tecnologías limpias (escenario C) la reducción de emisiones es de un 80% respecto a la línea base. Con los escenarios evaluados en la tesis se establece que la mejor estrategia para la reducción de emisiones es la apuesta alta por tecnologías de cero emisiones (hidrógeno, eléctrico enchufable, eléctrico con batería) en un parque automotor cuya tasa de motorización no crece infinitamente en el tiempo.
- Dentro de los escenarios evaluados, el único con el que se logra cumplir la meta de reducción de carbono en un 40% a 2030 (respecto al 2014) es el escenario C que se caracteriza por una alta penetración de tecnologías limpias en un parque automotor que crece lentamente por el cambio de paradigma hacia la movilidad sostenible.
- Con los escenarios A y B se logra una reducción importante de emisiones de GEI respecto al escenario BAU de aproximadamente 23% para el 2030 y 57% para el 2050, en tanto con el escenario C (gran apuesta por ascenso tecnológico a tecnologías limpias) se tiene la menor cantidad de emisiones de GEI, con lo que se logran cumplir

parcialmente las metas de reducción de emisiones. Así pues, para cumplir las metas de reducción de emisiones de GEI comprometidos por la nación se requiere mayor participación de tecnologías limpias que las propuestas en los escenarios A, B y C.

- Es relevante que la nación aclare las metas de reducción por sector, pues en esta investigación se hizo una aproximación de la reducción de emisiones de GEI a 2030 que compete al sector del transporte terrestre por carretera (numeral 3.1.2) siendo de 21,837,471 ton CO₂-eq, mientras que con las NAMAs vigentes se espera alcanzar una reducción de 6,000,000 ton CO₂-eq, lo cual evidencia una disparidad entre lo que se debería reducir y las acciones (NAMA) con las que se pretenden alcanzar las metas.

En el marco del desarrollo de la maestría se desarrolló una pasantía de investigación a la Universidad Técnico Federico Santa María en Santiago de Chile, para unir esfuerzos con el prestigioso investigador en sostenibilidad energética y emisiones atmosféricas Mauricio Osses.

4.4 Recomendaciones

El desarrollo de la aproximación conceptual y aplicada para estimar y proyectar las emisiones de contaminantes atmosféricos generadas por el transporte terrestre por carretera en Colombia, que es el objetivo principal de esta tesis, permitió identificar buenas prácticas en la construcción de inventarios. Lo plasmado en el documento se estructura como una notable base conceptual y aplicada para estudios futuros enfocados en la cuantificación y proyección más precisa de emisiones generadas por el transporte terrestre por carretera. A partir de la experiencia alcanzada con el desarrollo de la investigación para ejercicios de investigación futuros se recomienda:

- Adoptar la estructura metodológica para estimación de las emisiones por el transporte terrestre por carretera presentada en el capítulo 2 para robustecer los análisis de las emisiones a escala nacional, particularmente la adopción de un enfoque meso con la simplificación del área de estudio con la clusterización de regiones homogéneas.
- El fundamento para la aplicación de la estructura metodológica es tener insumos debidamente calibrados para aproximar el consumo de combustibles fósiles a las ventas reportadas en registros oficiales, y de esta manera proceder a la estimación de las emisiones con bajo grado de incertidumbre.

- Para la estimación de las emisiones generadas por el transporte terrestre por carretera para un año base es importante tener los insumos descritos a lo largo del capítulo 2, tales como base del registro vehicular con información de la distribución tecnológica, ventas de combustibles fósiles reportadas por entidades oficiales, registros de vehículos usados en portales web de ventas vehiculares, datos de revisiones técnico-mecánicas, propiedades del combustible, condiciones ambientales del área de estudio en el año base, velocidad de operación por tipo de vía, capacidad de carga utilizada, uso de aire acondicionado, entre otros.
- Cuando se considera el factor de actividad con el enfoque del producto del tránsito promedio y la longitud de red vial (Ecuación 1.2 – Capítulo 1), o cuando se requiera la red vial para la desagregación espacio temporal de emisiones es relevante trabajar con una malla vial que represente adecuadamente las condiciones del área de estudio. Tradicionalmente la construcción de esta información requiere una gran dedicación y en ocasiones las entidades encargadas no propenden por su actualización, de ahí que resulta provechoso utilizar información geográfica disponible de uso libre construida con proyectos colaborativos como OpenStreetMap.
- Para la construcción de proyección de emisiones es importante acoger las proyecciones oficiales de variables sociodemográficas y económicas, como la población y el PIB, en pro de reducir la incertidumbre. Para tal fin, se recomienda revisar información de entidades nacionales, así como organizaciones internacionales, para el caso de esta tesis se consideraron las proyecciones poblaciones entregadas por el DANE y las proyecciones del PIB suministradas por la OCDE.
- Una estrategia para definir el período de proyección de las emisiones es revisar los compromisos de reducción de emisiones pactados por la nación.

4.5 Futuras investigaciones

A continuación, se identifican algunos enfoques potenciales para el desarrollo de investigaciones futuras por parte de centros de investigación, entidades gubernamentales, integrantes de la comunidad académica como estudiantes de posgrado o profesores, entre otros.



Otras emisiones asociadas al vehículo: Estimar todas las emisiones ocasionadas por el vehículo en su operación (por tubo de escape, por remojo, diurnas, material particulado resuspendido). Así como aquellas causadas en la cadena de fabricación del auto y en la producción del combustible, lo cual resulta particularmente interesante para los carros de cero o de bajas emisiones como los eléctricos puesto que generalmente la energía que estos consumen proviene de fuentes con importantes impactos ambientales



Factores de emisión locales: En los inventarios por fuentes móviles en Colombia se ha adoptado por la estimación indirecta de factores de emisión con IVE o COPERT. Sin embargo, se identifica una oportunidad de mejora al inventario nacional de emisiones por fuentes móviles mediante el uso de factores de emisión locales, los cuales publicará la UPME en los próximos años pues actualmente se están midiendo en campo¹²



Proximidad de emisiones proyectadas: Resulta oportuna la construcción de inventarios de emisiones atmosféricas por el transporte terrestre por carretera en Colombia durante el período 2019-2039 con información actualizada y vigente para: i) Revisar la proximidad entre las estimaciones desarrolladas y el escenario real. ii) Validar medidas, políticas y supuestos de los escenarios de proyección contemplados en esta investigación

¹² La Universidad de Antioquia y la UPME trabajan en el proyecto para actualizar los factores de emisión de los combustibles colombianos integrado por tres fases:

Fase I: Determinación de los ciclos de conducción de fuentes móviles de carretera para Colombia

Fase II: Determinación de factores de emisión de vehículos pesados para Colombia

Fase III: Determinación de factores de emisión de motocicletas y vehículos livianos para Colombia

5. Bibliografía

- Álvarez Narváez, V. M., Álvarez Aldegunde, J. A., Quiñones Bolaños, E., Saba, M., & Herrera Atencio, C. (2019). Estimation of the vehicle emission factor in different areas of Cartagena de Indias. *Revista de Ciencias*, 23(2), 53–73. <https://doi.org/10.25100/rc.v23i2.8949>
- Arango, J. H. (2009). Calidad de los combustibles en Colombia. *Revista de Ingeniería*, 29, 100–108. <https://doi.org/10.16924/revinge.29.12>
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana. (2019). Actualización inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá - Año 2018. <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Paginas/Herramientas-de-gestion/Inventario-de-emisiones-atmosfericas.aspx>
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2017). El transporte automotor de carga en América Latina: Soporte logístico de la producción y el comercio. <https://publications.iadb.org/es/el-transporte-automotor-de-carga-en-america-latina-soporte-logistico-de-la-produccion-y-el-comercio>
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2021). Logística en América Latina y el Caribe: Oportunidades, desafíos y líneas de acción. <https://publications.iadb.org/es/logistica-en-america-latina-y-el-caribe-oportunidades-desafios-y-lineas-de-accion>
- Centro Regional de Estudios de Energía (CREE). (2022). ETR Colombia 2050. https://linktr.ee/transicionenergetica_col
- CEPALSTAT. (2021). Bases de Datos y Publicaciones Estadísticas de la CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). Tasa de motorización. <https://estadisticas.cepal.org/cepalstat/portada.html>
- Congreso de la República. (2017). Ley 1844 de 2017 “Por medio de la cual se aprueba el “Acuerdo de París”, adoptado el 12 de diciembre de 2015, en París, Francia”, Bogotá D.C., 14 de julio de 2017.
- Congreso de la República. (2019). Ley 1964 de 2019 “Por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones”, Bogotá D.C., 11 de julio de 2019.

Congreso de la República. (2019). Ley 1972 de 2019 “Por medio de la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles y se dictan otras disposiciones”, Bogotá D.C., 18 de julio de 2019.

Congreso de la República. (2021). Ley 2169 de 2021 “Por medio de la cual se impulsa el desarrollo bajo en carbono del país mediante el establecimiento de metas y medidas mínimas en materia de carbono neutralidad y resiliencia climática y se dictan otras disposiciones”, Bogotá D.C., 22 de diciembre de 2021.

Corporación autónoma regional de la Frontera Nororiental (CORPONOR). (2022). Inventario de emisiones atmosféricas Cúcuta-Región. Plan de Calidad del Aire Cúcuta Región. https://corponor.gov.co/calidad_del_aire/2022/FEBRERO/cucuta-region/Inventario_emisiones_contaminantes_Cucuta_Region.pdf

Correa-Laguna, J. D., Pelgrims, M., Espinosa Valderrama, M., & Morales, R. (2021). Colombia’s GHG emissions reduction scenario: Complete representation of the energy and non-energy sectors in LEAP. *Energies*, 14, 7078. <https://doi.org/10.3390/en14217078>

Crippa, M., Guizzardi, D., Muntean, M., Schaaf, E., lo Vullo, E., Solazzo, E., Monforti-Ferrario, F., Olivier, J., & Vignati, E. (2021). EDGAR v6.0 Greenhouse Gas Emissions. European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] PID. <http://data.europa.eu/89h/97a67d67-c62e-4826-b873-9d972c4f670b>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). (2020). Proyecciones y retroproyecciones de población nacional para el periodo 1950-2017 y 2018-2070 con base en el CNPV 2018. <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion>

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2018). CONPES 3943. Política para el mejoramiento de la calidad del aire, Bogotá D.C., 31 de julio de 2018.

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2019). CONPES 3963. Política para la modernización del sector transporte automotor de carga. Bogotá D.C., 28 de junio de 2019.

Departamento Nacional de Planeación (DNP). (2020). CONPES 4010. Declaración de importancia estratégica del compromiso por Colombia: Programa vías para la legalidad y la reactivación, visión 2030. Bogotá D.C., 30 de noviembre de 2020.

DieselNet. (2022). Emission Standards. <https://dieselnet.com/standards/eu/ld.php>

- Environmental European Agency (EEA). (2019). EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019: Technical guidance to prepare national emission inventories. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2022). Managing Air Quality - Emissions Inventories. <https://www.epa.gov/air-quality-management-process/managing-air-quality-emissions-inventories>
- Gobierno de Colombia. (2021). Estrategia climática de largo plazo de Colombia E2050 para cumplir con el Acuerdo de París. MinAmbiente, DNP, Cancillería, nAFD, Expertise France, WRI: Bogotá. <https://unfccc.int/documents/311208>
- Green, J., & Sánchez, S. (2013). La Calidad del Aire en América Latina: Una Visión Panorámica. In Clean Air Institute. <https://www.cleanairinstitute.org/calidaddelaireamericalatina/cai-report-spanish.pdf>
- Ho, B. Q., & Clappier, A. (2011). Road traffic emission inventory for air quality modelling and to evaluate the abatement strategies: A case of Ho Chi Minh City, Vietnam. *Atmospheric Environment*, 45(21), 3584–3593. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.03.073>
- Ho, B. Q., Clappier, A., & Blond, N. (2014). Fast and optimized methodology to generate road traffic emission inventories and their uncertainties. *Clean - Soil, Air, Water*, 42(10), 1344–1350. <https://doi.org/10.1002/clen.201300261>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2016). Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero – Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023634/INGEI.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales (IDEAM). (2019). Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2018. <https://www.andi.com.co/Uploads/Informe%20estado%20calidad%20del%20aire%202018.pdf>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales (IDEAM). (2020). Primer inventario indicativo nacional de emisiones de contaminantes criterio y carbono negro 2010-2014. <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023893/023893.html>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2014). Elaboración del inventario nacional de emisiones de fuentes móviles para México 2013 y proyección 2030 mediante el

uso del modelo Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES). 52(5000), 192. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/le/0A197011/2014_CGCSA_Inventario_de_emisio%0Anes_usando_MOVES_parte_1.pdf

INVIAS. (2021). Estado de la red vial criterio técnico segundo semestre 2020. <https://www.invias.gov.co/index.php/archivo-y-documentos/servicios-al-ciudadano/proyectos-invias/red-nacional-de-carreteras/11194-estado-de-la-red-vial-criterio-tecnico-segundo-semester-2020>

Isla, L., M. Singla, M. Rodríguez Porcel e I. Granada. (2019). “Análisis de tecnología, industria y mercado para vehículos eléctricos en América Latina y el Caribe”. Nota técnica del BID no. 1628. Banco Interamericano de Desarrollo, Washington, D.C. <https://publications.iadb.org/es/analisis-de-tecnologia-industria-y-mercado-para-vehiculos-electricos-en-america-latina-y-el-caribe>

Jaime, D. (2022). Inventario de emisiones de fuentes móviles bajo metodología Bottom – Up para Bogotá, Colombia y análisis de escenarios de oferta para su reducción. [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional – Universidad Nacional de Colombia.

Kenneth Button, N. N. (1993). Modelling Vehicle Ownership and Use in Low Income Countries. *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 27, 51-67. <https://www.jstor.org/stable/20034977>

Londoño, J., Correa, M. A., & Palacio, C. A. (2011). Estimación de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el área urbana de Envigado, Colombia. *Revista Escuela de Ingeniería de Antioquia*, 16, 149–162. <http://www.scielo.org.co/pdf/eia/n16/n16a12.pdf>

Mangones, S. C., Jaramillo, P., Fischbeck, P., & Rojas, N. Y. (2019). Development of a high-resolution traffic emission model: Lessons and key insights from the case of Bogotá, Colombia. *Environmental Pollution*, 253, 552–559. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.07.008>

Maulik, U., Bandyopadhyay, S., & Mukhopadhyay, A. (2011). Multiobjective Genetic Algorithms for Clustering. In *Multiobjective Genetic Algorithms for Clustering*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-16615-0>

- Melo, E., Sánchez, Y., Ferrer, N., & Ferrer, N. (2012). Evaluación de un motor de encendido por chispa trabajando con mezclas etanol-gasolina. *Ingeniería Energética*, 33(2), 94–102. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012012000200002
- Mendez, F. (2020). Estudio normativo, económico y ambiental para la adopción de vehículos eléctricos de uso doméstico para Bogotá, Colombia.
- Méndez, J. (2022). Desagregación espacio temporal del inventario nacional de emisión de contaminantes criterio, gases efecto invernadero y carbono negro provenientes de fuentes móviles en Colombia. [Tesis de maestría en curso, Universidad Nacional de Colombia]
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2017a). Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas. https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/03/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2017b). Política Nacional de Cambio Climático. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/01/9.-Politica-Nacional-de-Cambio-Climatico.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2017c). Emisiones vehiculares en Colombia. <https://www.globalfueleconomy.org/media/418808/emisiones-vehiculares-en-colombia.pdf>
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Junio 24, 2008). Resolución 910 de 2008. Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2017). Guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas. https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Septiembre 02, 2013). Resolución 1111 de 2013. Por la cual se modifica la Resolución número 910 de 2008.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2020). Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC).

<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/informe-actualizacion-contribucion-determinada-Colombia-ndc-2020.pdf>

Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (MinCIT). (2019). Decreto 1116 de 2017 “Por el cual se modifica parcialmente el Arancel de Aduanas y se establecen disposiciones para la importación de vehículos eléctricos, vehículos híbridos y sistemas de carga”. Bogotá D.C., 29 de junio de 2017.

Ministerio del Medio Ambiente (Diciembre 06, 1999). Resolución 1048 de 1999. Por medio de la cual se fijan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por fuentes móviles terrestres a gasolina o diésel, en condición de prueba dinámica, a partir del año modelo 2001.

Ministerios de Minas y Energía, de la Protección Social y de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (Diciembre 24, 2009). Resolución 2604 de 2009. Por la cual se determinan los combustibles limpios teniendo como criterio fundamental el contenido de sus componentes, se reglamentan los límites máximos de emisión permisibles en prueba dinámica para los vehículos que se vinculen a la prestación del servicio público de transporte terrestre de pasajeros y para motocarros que se vinculen a la prestación del servicio público de transporte terrestre automotor mixto y se adoptan otras disposiciones.

Ministerio de Minas y Energía (MME). (2017). Calidad de combustibles en Colombia. <https://www.globalfueleconomy.org/media/418805/calidad-de-combustibles-en-colombia.pdf>

Ministerio de Minas y Energía; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MME & MADS). (2020). Resolución 40177 de 2020. Por la cual se definen los energéticos de bajas o cero emisiones teniendo como criterio fundamental su contenido de componentes nocivos para la salud y el medio ambiente y se adoptan otras disposiciones.

Ministerio de Transporte. (2011). Diagnóstico del transporte 2011. <https://www.mintransporte.gov.co/descargar.php?idFile=5608>

Ministerio de Transporte y Ministerio del Medio Ambiente (Enero 09, 1996). Resolución 005 de 1996. Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes producidos por fuentes móviles terrestres a gasolina o diésel, y se definen los equipos y procedimientos de medición de dichas emisiones y se adoptan otras disposiciones.

Ministerio de Transporte. (2019). Transporte en cifras. <https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/9443/transporte-en-cifras/>

- Ministerio del Transporte (2022). Tabla de estandarización de PBV 27102020. <https://www.mintransporte.gov.co/documentos/3/documentos-del-ministerio/genPagDocs=1&genPag=7>
- MME, & UPME. (2016). Plan de Acción Indicativo de Eficiencia Energética 2017-2022: Una realidad y oportunidad para Colombia. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/PAI_PROURE_2017-2022.pdf
- Observatorio Nacional de Logística, Transporte, M. y E. (2022). Identificación de vías terciarias con imágenes satelitales y algoritmos de inteligencia artificial. <https://onl.dnp.gov.co/Paginas/Imagenes-Satelitales.aspx>
- Observatorio Nacional de Salud (ONS) del Instituto Nacional de Salud. (2019). Carga de Enfermedad Ambiental en Colombia - Informe técnico especial No. 10. <https://www.ins.gov.co/Direcciones/ONS/Informes/10%20Carga%20de%20enfermedad%20ambiental%20en%20Colombia.pdf>
- OECD. (2020). Real GDP forecast. Real GDP long-term forecast. DOI: 10.1787/1f84150b-en. <https://data.oecd.org/gdp/real-gdp-forecast.htm#indicator-chart>
- OECD.Stat. (2021). Datos y metadatos de la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). Vehículos de motor de carretera por mil habitantes. <https://stats.oecd.org/>
- OpenStreetMap (OSM). (2022). <https://www.openstreetmap.org/#map=4/4.66/-59.50>
- Ortiz, M. (2010). Reducción de las emisiones de CO2 en vehículos de transporte. *Energía & Minas. Revista Profesional, Técnica y Cultural de Los Ingenieros Técnicos de Minas*, 8, 28–33. <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.1992.3.66872>
- Ortúzar, J. de D., Willumsen, L. (2008). Modelos de transporte. Ediciones de la Universidad de Cantabria
- Osses, D., Basoa, K., Tolvett, S., Huneeus, N., & Gallardo, L. (2021). High-definition spatial distribution maps of on-road transport exhaust emissions in Chile, 1990 - 2020. August, 1–27. <https://essd.copernicus.org/articles/14/1359/2022/>

Ramírez, J., Pachon, J. E., Casas, O. M., & González, S. F. (2019). A new database of on-road vehicle emission factors for Colombia: A case study of bogota. *CTyF - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 9(1), 73–82. <https://doi.org/10.29047/01225383.154>

Rousseeuw, P. J. (1987). Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 20, 53–65. [https://doi.org/10.1016/0377-0427\(87\)90125-7](https://doi.org/10.1016/0377-0427(87)90125-7)

Schlapbach, L. (2009). Hydrogen-fuelled vehicles. *Nature*, 460(August), 809–811. <https://www.nature.com/articles/460809a>

Secretaría Distrital de Ambiente. (2010). Plan decenal de descontaminación del aire para Bogotá. <https://ambientebogota.gov.co/documents/10184/566197/Documento+Plan+Decenal+de+Descontaminaci%C3%B3n+del+Aire+para+Bogot%C3%A1.pdf/7cc178bb-5858-4343-b1ee-9926357a2b71>

Secretaría Distrital de Ambiente. (2020). Inventario de emisiones de Bogotá contaminantes atmosféricos.

Sistema de información ambiental de Colombia (SIAC). (2019). Emisiones. SIAC. <http://www.siac.gov.co/emisionesaire>

SLoCat. (2019). Transport and climate change 2018. Global status report.

Steer. (2020). Realizar un estudio que permita identificar las clases de vehículos y modalidades de transporte susceptibles de realizar el ascenso tecnológico hacia tecnologías de cero y bajas emisiones a nivel nacional. https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Resumen_Ascenso_tecnologico.pdf

Tanner, J. S. (1983). International Comparisons of Car Ownership and Car Usage. Transport and Road Research Laboratory Report

Trejos, E. (2021). Estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT y determinación de las emisiones de material particulado resuspendido con información local (Manizales – año base 2017). [Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia]. Repositorio institucional – Universidad Nacional de Colombia.

Unidad de Planeamiento Minero Energética (UPME). (2016). Calculadora FECOC 2016. UPME. http://www.upme.gov.co/Calculadora_Emisiones/aplicacion/calculadora.html

- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2013). Determinación de potencialidades de uso de las acciones necesarias para activar el subsector del GLP en Colombia.
- Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2019). Primer balance de energía útil para Colombia y cuantificación de las pérdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética. Resumen ejecutivo BEU sector transporte.
- Universidad de Antioquia. (2016). Articulación Universidad-Empresa-Estado para establecer los factores de emisión reales de fuentes móviles en el Valle de Aburrá
- Universidad de Antioquia. (2017). Articulación Universidad-Empresa-Estado para establecer los factores de emisión reales de fuentes móviles en el Valle de Aburrá - FEVA (Issue 40).
- Universidad de Antioquia. (2018). Articulación Universidad-Empresa-Estado para determinar los factores de emisión reales de vehículos pesados de pasajeros y de carga en el área metropolitana del Vale de Aburrá
- Universidad de Antioquia. (2019). Articulación Universidad-Empresa-Estado para establecer los factores de emisión reales de vehículos pesados en el Valle de Aburrá (FEVA-II) (Issue 40).
- Universidad de los Andes. (2009). Elementos técnicos del plan decenal de descontaminación de Bogotá. Parte 2: Inventario de Emisiones Provenientes de Fuentes Fijas y Móviles. In Elementos técnicos del plan decenal de descontaminación de Bogotá. (pp. 1–46).
- Universidad de los Andes, & MADS. (2014). Productos analíticos para apoyar la toma de decisiones sobre acciones de mitigación a nivel sectorial: Sector transporte.
- Universidad Nacional de Colombia. (2016). Apoyo y fortalecimiento a la red de monitoreo de calidad del aire en la ciudad de Manizales y cuantificación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles. 56.
- Walsh, M. P. (2009). Tendencias globales en el control de la contaminación vehicular. Situación a 2008. *Estudios Públicos*, 114(114). <https://doi.org/10.38178/cep.vi114.442>

A. Anexo: Variables clusterización departamentos

Se relacionan las variables utilizadas para la clusterización de los departamentos de Colombia destacando la fuente de información y los valores para cada departamento.

- Longitud de red vial total (kilómetros): OpenStreetMap y QGIS.
- Vehículos registrados por departamento a 2019 (vehículos): Base de datos de vehículos registrados en Registro Único Nacional de Tránsito.
- Población total por departamento en 2019 (personas): Proyecciones poblacionales 2018-2050 del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).
- Ventas de combustible tipo diésel y gasolina por departamento en 2019 (galones): Sistema de Información Minero Colombiano – Unidad de Planeación Minero-Energética (SIMCO-UPME).

Anexo A. Variables para la clusterización de los departamentos

Departamento	Red vial (km)	Vehículos (veh)	Población (hab)	Ventas Gasolina (gal)	Ventas Diésel (gal)
Amazonas	203.57	18,140	77,753	2,656,992	663,005
Antioquia	6,052.80	2,288,429	6,550,206	289,154,538	228,458,019
Arauca	2,981.92	66,793	280,109	8,561,750	8,132,931
Archipiélago de San Andrés	203.84	24,748	62,482	4,386,650	918,674
Atlántico	5,183.17	487,532	2,638,151	83,469,668	61,746,423
Bogotá, D.C.	7,851.63	2,867,611	7,592,871	340,657,966	273,590,782
Bolívar	3,638.13	356,631	2,130,512	72,382,010	57,216,767
Boyacá	12,820.45	242,050	1,230,910	52,341,524	60,388,313
Caldas	4,081.36	363,541	1,008,344	35,271,412	26,907,749
Caquetá	3,487.31	168,491	406,142	17,064,383	8,432,465
Casanare	6,512.49	108,504	428,563	18,557,638	31,742,897
Cauca	7,902.77	309,263	1,478,407	43,281,804	22,367,385
Cesar	6,501.85	172,306	1,252,398	73,622,832	100,299,539
Chocó	1,295.46	40,526	539,933	15,923,009	10,502,060
Córdoba	8,911.14	51,5505	1,808,439	49,504,658	38,819,376
Cundinamarca	17,145.59	1,477,977	3,085,522	138,488,075	173,827,577
Guainía	90.80	3,522	49,473	2,544,873	430,899
Guaviare	2,261.64	31,454	84,716	4,219,400	1,772,830
Huila	5,297.66	416,385	1,111,844	47,394,546	32,132,555
La Guajira	6,698.80	26,554	927,506	8,768,546	22,945,911
Magdalena	6,294.75	275,755	1,388,832	31,147,190	17,491,584

Departamento	Red vial (km)	Vehículos (veh)	Población (hab)	Ventas Gasolina (gal)	Ventas Diésel (gal)
Meta	9,683.97	487,227	1,052,125	45,684,375	48,116,812
Nariño	4,898.50	386,654	1,628,981	77,428,199	43,948,630
Norte de Santander	6,305.31	309,756	1,565,362	51,260,642	68,867,251
Putumayo	1,712.41	137,540	353,759	15,729,237	6,645,978
Quindío	2,187.33	223,599	547,855	25,213,926	14,975,341
Risaralda	3,260.47	336,734	952,511	44,382,416	25,343,396
Santander	11,624.84	907,787	2,237,587	97,372,034	79,333,738
Sucre	5,594.94	163,681	928,984	24,804,986	12,892,621
Tolima	10,404.04	390,450	1,335,313	54,791,974	65,323,932
Valle del Cauca	15,814.08	1,817,838	4,506,768	215,428,196	164,123,453
Vaupés	132.72	0	42,721	432,080	76,640
Vichada	2,293.52	5,688	110,599	1,607,495	1,101,878

Fuente. Elaboración propia

B. Anexo: Homologación de red vial OpenStreetMap

Consolidado del proceso de homologación de las categorías viales consideradas por OpenStreetMap a la red vial colombiana. Esta información se consolida en el numeral 2.1.1.1 Red vial, la cual representa uno de los insumos necesarios para la estimación del factor de actividad y en consecuencia para las emisiones atmosféricas generadas por el transporte terrestre por carretera en Colombia.

En la columna de jerarquía vial OSM está la clasificación vial descrita en los atributos del *shapefile* que se descargó de OpenStreetMap con apoyo de QGIS. En la columna descripción se presentan las características de cada tipo de vía. En ubicación se identifica si la vía está en área interurbana o urbana. Por último, en la columna categoría vial homologada está el tipo de vía colombiana a la cual se asignó cada categoría vial de OSM, en los casos en los que registra ninguna representa que las vías de esa categoría se eliminaron al no considerarse adecuadas para el objetivo de la tesis.

Anexo B. Homologación de la red vial de OpenStreetMap

Jerarquía vial OSM	Descripción	Ubicación	Categoría vial homologada
Motorway	Vías usualmente divididas físicamente con 2 o más carriles en cada dirección, generalmente son carreteras en las que se permite una velocidad operativa más alta	Interurbana	Primaria
Primary link	Conectan las ciudades más importantes. Incluye las rampas y carreteras de acceso entre vías primarias y otras vías de igual o menor jerarquía	Interurbana	Primaria
Trunk	Carreteras de mayor relevancia en la red vial, pueden atravesar un país de un extremo a otro, en estas se permite conducir a mayor velocidad, pueden o no ser vías con calzadas físicamente divididas	Interurbana	Primaria
Secondary link	Tradicionalmente conectan a las ciudades más pequeñas y los pueblos, pueden o no ser vías con calzadas físicamente divididas. Incluye las rampas y carreteras de acceso entre vías secundarias y otras vías de igual o menor jerarquía	Interurbana	Secundaria
Residential	Su función principal es garantizar acceso a propiedades residenciales que generalmente se encuentran alineadas de forma ordenada a uno o ambos lados de la vía	Interurbana	Terciaria
Tertiary link	Generalmente conecta a pueblos o ciudades con el sector rural de un municipio, o son la conexión al interior del sector rural, pueden o no ser vías con calzadas físicamente divididas. Incluye las rampas y carreteras de acceso entre vías terciarias y otras vías de igual o menor jerarquía	Interurbana	Terciaria
Track	Vías usualmente con superficies no pavimentadas para uso principalmente agrícola y forestal	Interurbana	Terciaria

Jerarquía vial OSM	Descripción	Ubicación	Categoría vial homologada
Pedestrian	Caminos utilizados exclusivamente por peatones en zonas residenciales o comerciales	Interurbana	Ninguna
Unclassified	No implica las vías en la que se desconoce su clasificación, sino que se refiere a vías de muy baja relevancia en la red vial, como aquellas vías que dan acceso a una única propiedad o caminos con clasificaciones menores que vías terciarias	Interurbana	Ninguna
Living Street	Vías residenciales en las que el peatón tienen prioridad sobre el automóvil, generalmente la velocidad en éstas es reducida	Urbana	Urbana
Path	Vías no especificadas o de uso compartido	Urbana	Urbana
Primary	Conectan las ciudades más importantes	Urbana	Urbana
Residential	Su función principal es garantizar acceso a propiedades residenciales que generalmente se encuentran alineadas de forma ordenada a uno o ambos lados de la vía	Urbana	Urbana
Road	Vías con clasificación desconocida, esta etiqueta se asigna temporalmente hasta tanto se realice la indagación y reconocimiento pertinente para categorizar la vía en una de las jerarquías viales contempladas por OSM	Urbana	Urbana
Secondary	Tradicionalmente conectan a las ciudades más pequeñas y los pueblos, pueden o no ser vías con calzadas físicamente divididas	Urbana	Urbana
Tertiary	Generalmente conecta a pueblos o ciudades con el sector rural de un municipio, o son la conexión al interior del sector rural, pueden o no ser vías con calzadas físicamente divididas	Urbana	Urbana
Track	Vías usualmente con superficies no pavimentadas para uso principalmente agrícola y forestal	Urbana	Urbana
Trunk	Carreteras de mayor relevancia en la red vial, pueden atravesar un país de un extremo a otro, en estas se permite conducir a mayor velocidad, pueden o no ser vías con calzadas físicamente divididas	Urbana	Urbana
Bridleway	Caminos utilizados principalmente para caballos	Urbana	Ninguna
Cycleway	Caminos dedicados exclusivamente para bicicletas, también se conocen como ciclovías designadas	Urbana	Ninguna
Footway	Caminos para uso exclusivo peatonal	Urbana	Ninguna
Platform	Áreas paralelas a las paradas de buses o transporte público que representa la ubicación real de plataformas de ascenso/descenso	Urbana	Ninguna
Raceway	Pista de carreras o autódromo	Urbana	Ninguna
Steps	Secciones peatonales con escalones	Urbana	Ninguna
Unclassified	No implica las vías en la que se desconoce su clasificación, sino que se refiere a vías de muy baja relevancia en la red vial, como aquellas vías que dan acceso a una única propiedad o caminos con clasificaciones menores que vías terciarias	Urbana	Ninguna
Dam	Represa, embalse	Urbana	Ninguna
Stream	Corriente de ríos	Urbana	Ninguna
Pedestrian	Caminos utilizados exclusivamente por peatones en zonas residenciales o comerciales	Urbana	Ninguna

Fuente. Elaboración propia a partir de (OpenStreetMap, 2022)

C. Anexo: Insumos COPERT

El uso de aire acondicionado se enfoca a la cantidad de vehículos que teniendo a disposición este sistema lo utilizan, lo cual depende de la temperatura de la zona. A continuación, se presenta la temperatura media anual y el uso de aire acondicionado por departamento.

Anexo C. Uso del aire acondicionado por departamento

Departamento	Temperatura media anual (°C)	Uso aire acondicionado (%)
Amazonas	26	65
Antioquia	24	53
Arauca	27	71
Archipiélago de San Andrés y Providencia	28	76
Atlántico	28	76
Bogotá	13	0
Bolívar	27	71
Boyacá	13	0
Caldas	16	6
Caquetá	25	59
Casanare	26	65
Cauca	19	24
Cesar	28	76
Chocó	26	65
Córdoba	28	76
Cundinamarca	16	6
Guainía	26	65
Guaviare	25	59
Huila	25	59
La Guajira	28	76
Magdalena	28	76
Meta	26	65
Nariño	15	0
Norte De Santander	20	29
Putumayo	23	47
Quindío	21	35
Risaralda	21	35
Santander	20	29
Sucre	27	71
Tolima	24	53
Valle Del Cauca	22	41
Vichada	27	71

Fuente. Elaboración propia

Departamento	Variable	Mes 2019											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	Temp. máx. (°C)	34	35	35	34	33	33	33	33	32	32	33	33
	Hum. relativa (%)	78	76	77	78	83	84	83	83	85	85	84	83
	Temp. mín. (°C)	9	10	11	12	11	11	11	10	10	10	11	10
Cundinamarca	Temp. máx. (°C)	22	23	22	22	21	21	21	22	21	21	22	22
	Hum. relativa (%)	79	79	82	83	83	82	78	75	76	81	82	80
	Temp. mín. (°C)	23	23	23	22	23	22	22	22	22	22	22	23
Guainía	Temp. máx. (°C)	34	34	34	34	32	32	31	32	33	32	33	33
	Hum. relativa (%)	83	84	84	84	87	88	88	87	86	86	85	85
	Temp. mín. (°C)	23	23	23	23	23	23	22	22	22	22	23	23
Guaviare	Temp. máx. (°C)	33	34	33	33	31	30	30	31	32	31	31	31
	Hum. relativa (%)	83	81	89	89	91	92	89	88	88	91	92	90
	Temp. mín. (°C)	19	20	19	19	19	19	19	19	19	18	19	19
Huila	Temp. máx. (°C)	29	30	29	29	29	28	29	29	30	28	28	28
	Hum. relativa (%)	69	68	72	73	74	77	66	68	64	74	77	77
	Temp. mín. (°C)	23	23	24	25	25	26	25	26	25	24	24	24
La Guajira	Temp. máx. (°C)	33	34	34	34	34	35	35	36	35	34	34	34
	Hum. relativa (%)	70	71	69	69	73	72	70	69	73	76	76	75
	Temp. mín. (°C)	22	22	21	22	22	22	22	22	22	22	22	23
Magdalena	Temp. máx. (°C)	35	35	33	33	32	33	33	33	32	31	32	34
	Hum. relativa (%)	71	69	76	78	83	80	77	78	82	84	82	78
	Temp. mín. (°C)	22	23	23	22	22	22	21	21	22	22	22	22
Meta	Temp. máx. (°C)	33	35	32	32	31	29	29	30	32	31	31	32
	Hum. relativa (%)	71	66	77	81	85	89	86	85	81	84	84	81
	Temp. mín. (°C)	12	13	13	13	12	13	12	12	12	12	12	13
Nariño	Temp. máx. (°C)	21	21	21	21	21	20	20	21	22	20	21	21
	Hum. relativa (%)	81	82	80	83	83	80	78	71	75	83	85	85
	Temp. mín. (°C)	15	15	17	17	17	17	16	17	17	17	17	16
Norte de Santander	Temp. máx. (°C)	25	26	26	26	27	27	27	28	28	26	26	26
	Hum. relativa (%)	79	76	81	82	79	76	69	67	73	77	80	77
	Temp. mín. (°C)	20	20	20	20	20	19	19	19	19	19	20	20
Putumayo	Temp. máx. (°C)	28	28	28	28	27	26	26	27	29	28	29	28
	Hum. relativa (%)	87	87	87	86	88	88	87	85	81	83	84	86
	Temp. mín. (°C)	17	19	18	18	18	18	18	16	17	17	17	18
Quindío	Temp. máx. (°C)	29	29	28	28	27	28	28	31	25	25	25	28
	Hum. relativa (%)	72	76	80	83	85	82	78	68	76	82	83	83
	Temp. mín. (°C)	16	17	17	17	17	17	17	17	18	16	17	17
Risaralda	Temp. máx. (°C)	25	27	26	27	26	27	27	28	28	25	25	25
	Hum. relativa (%)	77	81	84	87	88	86	80	72	78	86	87	85
	Temp. mín. (°C)	16	17	17	17	17	18	17	17	17	16	17	17
Santander	Temp. máx. (°C)	29	29	28	28	28	28	29	29	29	27	28	28
	Hum. relativa (%)	75	74	79	80	81	78	77	76	77	80	80	78
	Temp. mín. (°C)	22	23	23	24	24	24	23	23	23	23	23	23
Sucre	Temp. máx. (°C)	34	34	34	34	33	33	34	34	32	31	32	33
	Hum. relativa (%)	75	75	75	75	79	77	75	75	79	82	79	77
	Temp. mín. (°C)	19	20	20	20	20	20	20	20	20	19	20	20
Tolima	Temp. máx. (°C)	29	29	28	29	28	29	30	32	32	29	28	29
	Hum. relativa (%)	71	79	81	80	79	74	67	58	63	77	80	79
	Temp. mín. (°C)	18	19	19	19	19	19	18	17	18	18	18	18
Valle del Cauca	Temp. mín. (°C)	18	19	19	19	19	19	18	17	18	18	18	

Departamento	Variable	Mes 2019											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Vichada	Temp. máx. (°C)	30	29	29	28	28	28	29	30	30	27	27	28
	Hum. relativa (%)	77	77	77	80	79	78	80	69	74	80	80	80
	Temp. mín. (°C)	23	23	24	24	24	23	23	23	23	23	24	24
	Temp. máx. (°C)	35	35	35	33	31	30	30	30	32	32	33	33
	Hum. relativa (%)	70	66	79	80	86	89	87	85	84	84	82	83

Fuente. Elaboración propia

Se relacionan las velocidades de operación por tipología vial y departamento, los cuales se establecieron como el promedio de las velocidades consultadas en Google. En la consulta de datos no fue posible extraer velocidad para vías tipo *highway* (primarias) en Arauca, Chocó y La Guajira, vías tipo rural (secundarias y terciarias) en Guainía, para lo cual se imputa la velocidad promedio de operación de esa tipología vial en los departamentos del mismo clúster.

Anexo C. Circulation Activity – Velocidad (km/h)

Departamento	Urban peak	Urban off peak	Rural	Highway
Amazonas	26.47	26.47	27.78	-
Antioquia	17.00	17.77	21.75	49.10
Arauca	22.31	21.98	34.32	38.49
Archipiélago de San Andrés y Providencia	20.07	19.97	-	-
Atlántico	16.90	17.65	24.91	43.40
Bogotá	15.60	16.24	16.14	29.52
Bolívar	17.77	18.12	21.21	61.77
Boyacá	16.92	17.09	20.17	56.49
Caldas	18.29	18.37	24.88	41.79
Caquetá	18.49	18.47	27.40	39.67
Casanare	20.41	20.57	27.36	64.80
Cauca	18.33	18.40	21.98	58.30
Cesar	19.40	19.67	24.24	62.18
Chocó	15.90	15.85	36.97	38.49
Córdoba	19.34	19.37	24.65	78.28
Cundinamarca	17.30	17.76	19.98	54.25
Guainía	20.09	20.09	26.52	-
Guajira	19.05	19.15	29.21	48.80
Guaviare	20.79	20.02	25.85	-
Huila	18.23	18.13	20.67	31.93
Magdalena	17.84	17.86	20.69	55.05
Meta	17.27	17.59	22.91	41.70
Nariño	18.59	18.98	21.54	42.10
Norte de Santander	17.56	17.58	20.24	37.89
Putumayo	18.95	18.77	24.10	22.62
Quindío	17.97	17.94	19.21	34.00

Departamento	Urban peak	Urban off peak	Rural	Highway
Risaralda	18.68	18.54	21.62	41.80
Santander	16.90	17.44	20.18	46.85
Sucre	20.61	20.59	25.46	47.59
Tolima	17.72	17.96	26.72	58.79
Valle del Cauca	17.64	18.38	21.55	56.41
Vichada	23.47	22.84	21.43	-

Fuente. Elaboración propia a partir de descarga de velocidades de información de Big Data de Google

El kilometraje acumulado se enfoca a la actividad acumulada de un vehículo durante su vida útil, en la tabla se relaciona el valor utilizado para cada categoría vehicular, tipo de combustible, segmento y tecnología EURO, es importante acotar que por la disponibilidad de información se estableció un dato a nivel país el cual se empleó en todos los departamentos.

Anexo C. Kilometraje acumulado (km)

Combustible	Segmento COPERT	Tecnología EURO	Kilometraje acumulado
Buses			
Diésel	Coaches Articulated > 18 t	EURO I	988,000
Diésel	Coaches Articulated > 18 t	EURO IV	380,000
Diésel	Coaches Articulated > 18 t	EURO V	76,000
Diésel	Coaches Standard <= 18 t	CONVENTIONAL	738,568
Diésel	Coaches Standard <= 18 t	EURO I	483,178
Diésel	Coaches Standard <= 18 t	EURO II	359,848
Diésel	Coaches Standard <= 18 t	EURO IV	303,502
Diésel	Coaches Standard <= 18 t	EURO V	44,981
Diésel	Urban Buses Midi <= 15 t	CONVENTIONAL	738,568
Diésel	Urban Buses Midi <= 15 t	EURO I	483,178
Diésel	Urban Buses Midi <= 15 t	EURO II	362,938
Diésel	Urban Buses Midi <= 15 t	EURO IV	359,848
Diésel	Urban Buses Midi <= 15 t	EURO V	44,981
Diésel	Urban Buses Standard 15 - 18 t	CONVENTIONAL	738,568
Diésel	Urban Buses Standard 15 - 18 t	EURO I	483,178
Diésel	Urban Buses Standard 15 - 18 t	EURO II	359,848
Diésel	Urban Buses Standard 15 - 18 t	EURO IV	303,502
Diésel	Urban Buses Standard 15 - 18 t	EURO V	44,981
Gas Natural Vehicular	Urban CNG Buses	EURO I	857,468
Gas Natural Vehicular	Urban CNG Buses	EURO II	314,867
Gas Natural Vehicular	Urban CNG Buses	EURO IV	357,323
Diésel eléctrico	Urban Buses Diesel Hybrid	EURO VI	44,981
L-Category			
Gasolina	Quad & ATVs	CONVENTIONAL	54,402
Gasolina	Quad & ATVs	EURO 2	30,690

168 Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

Combustible	Segmento COPERT	Tecnología EURO	Kilometraje acumulado
Gasolina	Mopeds 2-stroke <50 cm	CONVENTIONAL	57,964
Gasolina	Mopeds 4-stroke <50 cm	CONVENTIONAL	57,964
Gasolina	Mopeds 4-stroke <50 cm	EURO 2	31,590
Gasolina	Motorcycles 2-stroke >50 cm	CONVENTIONAL	53,503
Gasolina	Motorcycles 4-stroke <250 cm	CONVENTIONAL	60,675
Gasolina	Motorcycles 4-stroke <250 cm	EURO 2	42,759
Gasolina	Motorcycles 4-stroke >750 cm	CONVENTIONAL	48,153
Gasolina	Motorcycles 4-stroke >750 cm	EURO 2	26,678
Gasolina	Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm	CONVENTIONAL	48,153
Gasolina	Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm	EURO 2	21,731
Light Commercial Vehicles			
Gasolina	N1-III	CONVENTIONAL	834,564
Gasolina	N1-III	EURO 1	578,644
Gasolina	N1-III	EURO 2	292,474
Gasolina	N1-III	EURO 3	129,609
Gasolina	N1-III	EURO 4	36,095
Heavy Duty Vehicles			
Diésel	Rigid <= 7.5 t	CONVENTIONAL	511,403
Diésel	Rigid <= 7.5 t	EURO I	404,086
Diésel	Rigid <= 7.5 t	EURO II	280,408
Diésel	Rigid <= 7.5 t	EURO IV	156,218
Diésel	Rigid <= 7.5 t	EURO V	36,409
Diésel	Rigid 7.5 - 12 t	CONVENTIONAL	417,515
Diésel	Rigid 7.5 - 12 t	EURO I	356,808
Diésel	Rigid 7.5 - 12 t	EURO II	284,642
Diésel	Rigid 7.5 - 12 t	EURO IV	199,413
Diésel	Rigid 7.5 - 12 t	EURO V	42,771
Diésel	Rigid 12 - 14 t	CONVENTIONAL	342,841
Diésel	Rigid 12 - 14 t	EURO I	284,510
Diésel	Rigid 12 - 14 t	EURO II	180,462
Diésel	Rigid 12 - 14 t	EURO IV	124,350
Diésel	Rigid 12 - 14 t	EURO V	42,771
Diésel	Rigid 14 - 20 t	CONVENTIONAL	467,240
Diésel	Rigid 14 - 20 t	EURO I	399,149
Diésel	Rigid 14 - 20 t	EURO II	389,383
Diésel	Rigid 14 - 20 t	EURO IV	258,519
Diésel	Rigid 14 - 20 t	EURO V	42,771
Diésel	Rigid 20 - 26 t	CONVENTIONAL	467,240
Diésel	Rigid 20 - 26 t	EURO I	328,104
Diésel	Rigid 20 - 26 t	EURO II	318,378
Diésel	Rigid 20 - 26 t	EURO IV	206,749
Diésel	Rigid 20 - 26 t	EURO V	42,771
Diésel	Rigid 26 - 28 t	CONVENTIONAL	684,336
Diésel	Rigid 26 - 28 t	EURO I	486,611

Combustible	Segmento COPERT	Tecnología EURO	Kilometraje acumulado
Diésel	Rigid 26 - 28 t	EURO II	375,167
Diésel	Rigid 26 - 28 t	EURO IV	128,313
Diésel	Rigid 26 - 28 t	EURO V	42,771
Diésel	Articulated 28 - 34 t	CONVENTIONAL	684,336
Diésel	Articulated 28 - 34 t	EURO I	486,611
Diésel	Articulated 28 - 34 t	EURO II	375,167
Diésel	Articulated 28 - 34 t	EURO IV	128,313
Diésel	Articulated 28 - 34 t	EURO V	42,771
Diésel	Articulated 50 - 60 t	CONVENTIONAL	543,876
Diésel	Articulated 50 - 60 t	EURO I	692,801
Diésel	Articulated 50 - 60 t	EURO II	681,723
Diésel	Articulated 50 - 60 t	EURO IV	128,313
Diésel	Articulated 50 - 60 t	EURO V	42,771
Passenger cars – Vehículos privados			
Gasolina	Large-SUV-Executive	ECE 15/04	202,518
Gasolina	Large-SUV-Executive	EURO 1	115,055
Gasolina	Large-SUV-Executive	EURO 2	63,133
Gasolina	Large-SUV-Executive	EURO 3	34,914
Gasolina	Large-SUV-Executive	EURO 4	13,077
Gasolina	Medium	ECE 15/04	202,518
Gasolina	Medium	EURO 1	115,055
Gasolina	Medium	EURO 2	63,133
Gasolina	Medium	EURO 3	34,914
Gasolina	Medium	EURO 4	13,077
Gasolina	Mini	EURO 4	13,077
Gasolina	Small	ECE 15/04	202,518
Gasolina	Small	EURO 1	115,055
Gasolina	Small	EURO 2	63,133
Gasolina	Small	EURO 3	34,914
Gasolina	Small	EURO 4	13,077
Gas Natural Vehicular	Large-SUV-Executive	Euro IV	218,500
Gas Natural Vehicular	Medium	Euro IV	218,500
Gas Natural Vehicular	Mini	Euro IV	218,500
Gas Natural Vehicular	Small	Euro IV	218,500
Diésel	Large-SUV-Executive	CONVENTIONAL	191,312
Diésel	Large-SUV-Executive	EURO II	121,744
Diésel	Large-SUV-Executive	EURO IV	34,784
Diésel	Medium	CONVENTIONAL	191,312
Diésel	Medium	EURO II	121,744
Diésel	Medium	EURO IV	34,784
Diésel	Mini	EURO IV	34,784
Diésel	Small	CONVENTIONAL	191,312
Diésel	Small	EURO II	121,744
Diésel	Small	EURO IV	34,784

170 Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

Combustible	Segmento COPERT	Tecnología EURO	Kilometraje acumulado
Gasolina eléctrico	Large-SUV-Executive	EURO 6	26,154
Gasolina eléctrico	Medium	EURO 6	26,154
Gasolina eléctrico	Mini	EURO 6	26,154
Gasolina eléctrico	Small	EURO 6	26,154
Passenger cars - Taxis			
Gasolina	Large-SUV-Executive	EURO 1	519,805
Gasolina	Large-SUV-Executive	EURO 2	319,880
Gasolina	Medium	EURO 1	519,805
Gasolina	Medium	EURO 2	319,880
Gasolina	Medium	EURO 3	119,955
Gasolina	Medium	EURO 4	39,985
Gasolina	Mini	EURO 4	39,985
Gasolina	Small	EURO 1	519,805
Gasolina	Small	EURO 2	319,880
Gasolina	Small	EURO 3	119,955
Gasolina	Small	EURO 4	39,985
Gas Natural Vehicular	Large-SUV-Executive	Euro IV	399,850
Gas Natural Vehicular	Medium	Euro IV	399,850
Gas Natural Vehicular	Mini	Euro IV	399,850
Gas Natural Vehicular	Small	Euro IV	399,850
Diésel	Large-SUV-Executive	CONVENTIONAL	908,314
Diésel	Medium	CONVENTIONAL	908,314
Diésel	Mini	EURO IV	239,030
Diésel	Small	CONVENTIONAL	908,314
Diésel	Small	EURO IV	239,030

Fuente. Elaboración propia

El stock vehicular en 2019 por departamento según categoría, segmento, tipo de combustible y tecnología EURO se detalla en la siguiente tabla.

Anexo C. Stock vehicular por departamento (Parte I) (vehículos)

Características vehículo	Departamento*															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Buses																
Diésel-Coaches Articulated > 18 t-EURO I	0	0	0	0	1	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Diésel-Coaches Articulated > 18 t-EURO IV	0	0	0	0	1	263	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Diésel-Coaches Articulated > 18 t-EURO V	0	0	0	0	0	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Diésel-Coaches Standard <= 18 t-CONVENTIONAL	0	11	0	0	43	11	8	7	4	0	0	1	2	0	0	16
Diésel-Coaches Standard <= 18 t-EURO I	0	210	4	1	535	513	39	185	43	3	1	21	20	1	8	619
Diésel-Coaches Standard <= 18 t-EURO II	0	8	0	1	0	35	0	4	0	0	0	0	0	1	0	14
Diésel-Coaches Standard <= 18 t-EURO IV	0	294	0	2	542	1929	118	265	50	4	5	5	42	0	1	960
Diésel-Coaches Standard <= 18 t-EURO V	0	45	0	0	98	212	77	61	2	0	0	3	3	0	1	159
Diésel-Urban Buses Midi <= 15 t-CONVENTIONAL	0	46	1	2	42	82	15	23	15	6	3	29	14	1	4	125
Diésel-Urban Buses Midi <= 15 t-EURO I	4	1362	19	19	435	1792	215	724	248	30	94	410	44	18	59	5070
Diésel-Urban Buses Midi <= 15 t-EURO II	0	45	0	3	26	162	5	6	8	0	4	4	8	0	7	27
Diésel-Urban Buses Midi <= 15 t-EURO IV	5	1611	54	19	567	741	575	830	320	9	104	211	96	2	137	6968
Diésel-Urban Buses Midi <= 15 t-EURO V	1	76	1	2	11	36	15	56	13	1	2	1	6	0	5	135
Diésel-Urban Buses Standard 15 - 18 t-CONVENTIONAL	0	67	1	0	19	34	11	15	22	2	3	16	4	1	4	88
Diésel-Urban Buses Standard 15 - 18 t-EURO I	3	3266	41	15	1142	3820	501	625	412	31	65	370	58	13	205	2647
Diésel-Urban Buses Standard 15 - 18 t-EURO II	0	14	4	0	12	102	4	13	2	2	3	3	5	1	4	14
Diésel-Urban Buses Standard 15 - 18 t-EURO IV	5	4645	20	22	2152	3402	621	387	365	8	56	87	113	4	207	5580
Diésel-Urban Buses Standard 15 - 18 t-EURO V	0	387	0	4	154	78	17	74	52	2	3	5	10	1	6	406
GNV-Urban CNG Buses-EURO I	0	11	2	0	17	77	7	6	8	1	0	2	0	0	2	60
GNV-Urban CNG Buses-EURO II	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GNV-Urban CNG Buses-EURO IV	0	335	0	0	3	39	111	2	26	0	0	4	1	0	2	40
Diésel eléctrico-Urban Buses Diesel Hybrid-EURO VI	0	0	0	0	0	291	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
L-Category																
Gasolina-Quad & ATVs-CONVENTIONAL	32	4107	6	38	1305	808	329	73	195	88	10	165	83	93	205	527
Gasolina-Quad & ATVs-EURO 2	309	9888	99	19	7983	2170	2896	437	601	595	550	282	1855	488	2046	2222
Gasolina-Mopeds 2-stroke <50 cm-CONVENTIONAL	15	842	61	259	657	75	350	76	82	16	39	156	130	5	568	627
Gasolina-Mopeds 4-stroke <50 cm-CONVENTIONAL	339	1874	1422	999	2129	135	1293	123	287	21	43	307	994	33	15779	1525
Gasolina-Mopeds 4-stroke <50 cm-EURO 2	1	126	5	5	3	61	3	7	20	2	1	18	4	0	15	68
Gasolina-Motorcycles 2-stroke >50 cm-CONVENTIONAL	281	32152	842	853	3109	3561	3020	2000	6356	1726	1565	4561	1489	876	2829	15417

Características vehículo	Departamento*															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Gasolina-Motorcycles 4-stroke <250 cm- CONVENTIONAL	463 0	25207 4	1496 7	505 6	6362 5	12082 3	50606	2499 2	52184	2944 4	1418 0	52715	3131 7	1088 4	10377 7	13016 3
Gasolina-Motorcycles 4-stroke <250 cm-EURO 2	783 3	70707 9	2872 8	623 5	9513 5	22864 2	12875 4	4953 1	10161 4	8537 5	4663 8	11654 9	5016 8	1577 6	23064 9	45303 5
Gasolina-Motorcycles 4-stroke >750 cm- CONVENTIONAL	10	931	51	17	95	1711	111	113	125	357	4	118	1325	163	56	429
Gasolina-Motorcycles 4-stroke >750 cm-EURO 2	4	4280	2	7	122	6951	26	27	249	7	21	50	20	0	45	675
Gasolina-Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm- CONVENTIONAL	13	3653	3	77	197	5847	87	36	439	84	18	178	51	10	52	1769
Gasolina-Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm-EURO 2	19	10771	11	12	326	11833	189	218	842	78	108	279	470	27	171	8713
Heavy Duty Vehicles																
Diésel-Rigid <= 7.5 t-CONVENTIONAL	7	2932	21	37	845	1324	311	720	496	56	75	329	104	3	219	4494
Diésel-Rigid <= 7.5 t-EURO I	1	4486	10	28	1296	2016	368	1049	596	17	69	237	119	6	201	11179
Diésel-Rigid <= 7.5 t-EURO II	0	116	5	10	164	296	78	33	27	3	26	13	33	1	55	96
Diésel-Rigid <= 7.5 t-EURO IV	5	70	2	12	68	142	19	23	13	1	3	15	26	2	17	60
Diésel-Rigid <= 7.5 t-EURO V	0	6895	16	12	2205	1132	401	886	427	15	362	242	182	4	154	16603
Diésel-Rigid 7.5 - 12 t-CONVENTIONAL	0	723	11	6	239	712	181	416	126	13	34	124	57	1	89	2368
Diésel-Rigid 7.5 - 12 t-EURO I	0	455	3	1	120	155	52	250	39	2	15	25	35	0	29	1345
Diésel-Rigid 7.5 - 12 t-EURO II	0	42	1	0	31	53	6	15	5	12	17	7	25	2	14	30
Diésel-Rigid 7.5 - 12 t-EURO IV	0	39	3	0	29	137	2	22	7	8	15	8	4	0	7	65
Diésel-Rigid 7.5 - 12 t-EURO V	0	4592	13	4	1078	311	124	955	283	11	131	135	44	1	138	8393
Diésel-Rigid 12 - 14 t-CONVENTIONAL	0	428	7	10	89	208	47	235	84	12	21	61	35	1	56	1184
Diésel-Rigid 12 - 14 t-EURO I	0	756	11	1	560	366	146	241	95	16	63	82	87	0	54	2120
Diésel-Rigid 12 - 14 t-EURO II	0	10	9	3	3	52	0	9	1	0	4	1	4	0	3	21
Diésel-Rigid 12 - 14 t-EURO IV	0	16	0	0	2	4	1	21	5	0	2	1	1	0	1	11
Diésel-Rigid 12 - 14 t-EURO V	0	528	1	0	116	173	22	62	33	10	10	13	11	0	15	962
Diésel-Rigid 14 - 20 t-CONVENTIONAL	0	427	3	1	108	220	34	104	33	13	11	37	21	1	35	743
Diésel-Rigid 14 - 20 t-EURO I	0	621	2	2	222	243	59	180	45	4	23	50	37	4	29	806
Diésel-Rigid 14 - 20 t-EURO II	1	69	20	1	15	121	7	83	27	5	17	15	13	6	5	102
Diésel-Rigid 14 - 20 t-EURO IV	0	44	30	8	4	28	9	37	17	14	13	35	6	0	21	122
Diésel-Rigid 14 - 20 t-EURO V	0	1473	11	3	286	178	72	443	112	9	73	55	28	4	64	2829
Diésel-Rigid 20 - 26 t-CONVENTIONAL	0	157	1	0	39	145	29	74	15	1	8	34	41	0	7	401
Diésel-Rigid 20 - 26 t-EURO I	0	939	1	1	110	176	74	143	22	2	11	42	62	3	20	1311
Diésel-Rigid 20 - 26 t-EURO II	0	35	3	1	4	93	4	16	2	0	2	2	4	1	1	24
Diésel-Rigid 20 - 26 t-EURO IV	0	16	1	0	6	84	4	4	1	0	1	1	3	0	3	43

Características vehículo	Departamento*															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Diésel-Rigid 20 - 26 t-EURO V	0	2749	5	0	528	245	184	443	48	2	101	43	65	0	67	5343
Diésel-Rigid 26 - 28 t-CONVENTIONAL	0	109	2	0	20	66	17	43	10	1	4	39	53	0	5	558
Diésel-Rigid 26 - 28 t-EURO I	0	168	0	0	25	163	42	75	3	12	3	14	85	3	15	797
Diésel-Rigid 26 - 28 t-EURO II	0	0	0	0	2	11	1	4	0	0	10	0	0	0	0	4
Diésel-Rigid 26 - 28 t-EURO IV	0	9	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
Diésel-Rigid 26 - 28 t-EURO V	0	517	2	0	119	193	23	104	13	0	21	14	22	0	12	1619
Diésel-Articulated 28 - 34 t-CONVENTIONAL	0	750	0	0	183	43	104	412	49	9	15	121	22	0	12	1408
Diésel-Articulated 28 - 34 t-EURO I	0	964	0	0	383	93	169	532	94	45	6	130	52	1	63	3471
Diésel-Articulated 28 - 34 t-EURO II	0	6	2	1	1	29	1	2	3	5	3	1	1	1	2	5
Diésel-Articulated 28 - 34 t-EURO IV	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2
Diésel-Articulated 28 - 34 t-EURO V	0	898	1	0	178	30	17	476	36	1	18	13	6	0	7	2948
Diésel-Articulated 50 - 60 t-CONVENTIONAL	0	104	0	0	5	26	4	78	11	0	4	8	8	0	0	687
Diésel-Articulated 50 - 60 t-EURO I	0	871	0	0	134	45	20	953	24	1	3	31	16	0	6	3417
Diésel-Articulated 50 - 60 t-EURO II	0	7	2	0	0	20	0	2	0	0	0	0	0	0	0	28
Diésel-Articulated 50 - 60 t-EURO IV	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
Diésel-Articulated 50 - 60 t-EURO V	0	3172	0	0	294	51	71	1524	34	3	39	90	30	0	4	6870
Light Commercial Vehicles																
Gasolina-N1-III-CONVENTIONAL	0	176	4	0	99	1	8	25	7	0	4	10	0	0	8	25
Gasolina-N1-III-EURO 1	0	63	10	0	126	0	7	26	7	0	0	9	4	2	12	50
Gasolina-N1-III-EURO 2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Gasolina-N1-III-EURO 3	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Gasolina-N1-III-EURO 4	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54
Passenger cars – Vehículos privados																
Gasolina-Large-SUV-Executive-ECE 15/04	4	12661	101	220	3569	43748	1904	3057	2276	194	271	1630	695	44	1211	15497
Gasolina-Large-SUV-Executive-EURO 1	10	27322	137	855	6581	89855	2706	3928	3531	127	390	1778	1096	33	1821	21674
Gasolina-Large-SUV-Executive-EURO 2	6	18616	48	287	5478	72572	2212	1980	1785	30	403	693	1496	8	825	4299
Gasolina-Large-SUV-Executive-EURO 3	18	24910	144	147	6933	64483	2526	2329	2156	125	902	1143	1661	22	1421	17611
Gasolina-Large-SUV-Executive-EURO 4	11	5736	10	7	1192	9996	381	433	478	48	158	185	277	2	269	5643
Gasolina-Medium-ECE 15/04	0	6054	7	50	1214	30586	572	833	908	28	37	367	181	6	186	6224
Gasolina-Medium-EURO 1	4	15122	6	257	3192	82133	945	1603	2181	16	49	471	375	4	285	4830
Gasolina-Medium-EURO 2	3	16226	10	67	4098	60245	1260	1571	2046	17	269	443	753	1	590	1717
Gasolina-Medium-EURO 3	30	39608	111	68	9541	104303	4112	3559	5351	231	1032	1731	1832	4	1964	9346

Características vehículo	Departamento*															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Gasolina-Medium-EURO 4	17	8257	14	16	1838	18300	708	628	956	70	199	265	389	2	332	3430
Gasolina-Mini-EURO 4	4	1512	4	12	850	4600	383	223	232	41	132	192	70	0	178	958
Gasolina-Small-ECE 15/04	5	32867	259	215	8527	12334 4	4259	6372	5996	302	442	2551	1654	27	1754	29662
Gasolina-Small-EURO 1	9	86643	294	280	2165 5	28983 2	6980	1039 1	15303	508	655	4381	3192	39	4461	35607
Gasolina-Small-EURO 2	27	67581	90	117	1871 1	19180 2	8043	7524	10693	157	2113	4243	2825	22	3730	18101
Gasolina-Small-EURO 3	54	93554	232	236	3065 7	23343 3	14765	9491	14478	748	3812	7632	4327	23	5878	36421
Gasolina-Small-EURO 4	21	22675	34	35	6840	41752	3488	2047	3217	364	844	1413	912	5	1234	10993
GNV-Large-SUV-Executive-Euro IV	0	2962	3	0	123	6899	17	315	796	3	34	44	7	0	10	1609
GNV-Medium-Euro IV	0	498	0	0	25	977	7	21	64	0	1	6	1	0	2	500
GNV-Mini-Euro IV	0	59	0	0	97	106	46	13	10	1	22	10	2	0	2	68
GNV-Small-Euro IV	1	873	0	0	131	1642	516	146	197	4	62	231	45	0	9	781
Diésel-Large-SUV-Executive-CONVENTIONAL	0	4591	7	1	266	8230	141	373	608	23	22	218	13	1	121	689
Diésel-Large-SUV-Executive-EURO II	1	7994	31	5	1843	18187	641	1128	850	29	411	324	234	5	536	5613
Diésel-Large-SUV-Executive-EURO IV	11	8363	18	38	1538	13323	482	922	879	93	455	264	364	13	470	10678
Diésel-Medium-CONVENTIONAL	0	705	0	1	195	1879	97	98	117	3	11	105	6	0	51	124
Diésel-Medium-EURO II	0	2046	4	2	423	5321	127	265	248	3	86	56	3	0	196	602
Diésel-Medium-EURO IV	1	454	1	1	57	1596	28	39	100	6	13	9	20	0	15	363
Diésel-Mini-EURO IV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Diésel-Small-CONVENTIONAL	0	130	1	0	35	85	391	41	122	3	5	811	23	0	6	56
Diésel-Small-EURO II	0	7	0	0	1	19	7	0	0	0	1	22	1	0	1	2
Diésel-Small-EURO IV	0	136	1	4	17	284	6	45	16	0	3	6	13	0	10	249
Gasolina eléctrico-Large-SUV-Executive-EURO 6	0	47	0	0	7	104	0	0	6	0	0	0	0	0	0	9
Gasolina eléctrico-Medium-EURO 6	0	206	0	0	1	102	0	1	4	0	0	0	0	0	0	6
Gasolina eléctrico-Mini-EURO 6	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gasolina eléctrico-Small-EURO 6	0	394	0	0	8	113	1	8	10	0	0	2	0	0	0	18
Passenger cars - Taxi																
Gasolina-Large-SUV-Executive-EURO 1	0	2	0	150	0	23	1	0	1	0	0	2	7	1	0	2
Gasolina-Large-SUV-Executive-EURO 2	0	0	0	47	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Gasolina-Medium-EURO 1	0	26	0	84	1	121	5	0	10	5	1	2	1	0	2	4
Gasolina-Medium-EURO 2	0	10	1	12	0	3	0	0	1	1	0	0	41	0	0	5
Gasolina-Medium-EURO 3	4	128	40	8	160	134	55	39	43	4	8	4	70	10	17	41

Características vehículo	Departamento*																
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Gasolina-Medium-EURO 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Gasolina-Mini-EURO 4	0	17	2	1	72	623	126	17	1	5	8	3	31	7	14	10	
Gasolina-Small-EURO 1	7	6638	50	73	1272	14440	358	373	497	316	50	110	710	128	188	567	
Gasolina-Small-EURO 2	13	8439	182	10	4847	10138	1032	690	397	300	187	315	1171	108	434	924	
Gasolina-Small-EURO 3	12	8179	130	13	4766	13433	2525	845	749	302	248	394	1255	114	380	827	
Gasolina-Small-EURO 4	1	969	8	2	123	735	239	36	124	13	10	26	86	1	9	55	
GNV-Large-SUV-Executive-Euro IV	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
GNV-Medium-Euro IV	0	1	0	0	0	13	4	2	14	0	1	0	0	0	0	2	
GNV-Mini-Euro IV	0	172	1	0	1530	3075	233	107	116	0	132	15	1	0	1	200	
GNV-Small-Euro IV	0	48	0	0	77	1101	30	128	178	2	36	18	3	0	10	110	
Diésel-Large-SUV-Executive-CONVENTIONAL	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	
Diésel-Medium-CONVENTIONAL	0	34	0	0	0	107	1	3	4	2	3	6	2	0	4	6	
Diésel-Mini-EURO IV	0	2	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	
Diésel-Small-CONVENTIONAL	0	9	0	0	1	13	6	6	1	4	0	5	28	1	1	10	
Diésel-Small-EURO IV	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
*Departamento	1. Amazonas 9. Caldas	2. Antioquia 10. Caquetá	3. Arauca 11. Casanare	4. Archipiélago de San Andrés 12. Cauca	5. Atlántico 13. César	6. Bogotá D.C. 14. Chocó	7. Bolívar 15. Córdoba	8. Boyacá 16. Cundinamarca									

Fuente. Elaboración propia

Anexo C. Stock vehicular por departamento (Parte II) (vehículos)

Características vehículo	Departamento*															
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Buses																
Diésel-Coaches Articulated > 18 t-EURO I	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Diésel-Coaches Articulated > 18 t-EURO IV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	1	0
Diésel-Coaches Articulated > 18 t-EURO V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Diésel-Coaches Standard <= 18 t-CONVENTIONAL	0	0	1	2	0	2	4	1	1	1	1	1	1	2	5	0
Diésel-Coaches Standard <= 18 t-EURO I	0	0	49	10	8	23	46	20	6	13	74	215	17	31	378	0
Diésel-Coaches Standard <= 18 t-EURO II	0	0	0	0	0	8	3	0	1	0	0	1	0	1	3	0
Diésel-Coaches Standard <= 18 t-EURO IV	0	0	93	68	11	21	66	2	0	12	52	517	9	44	396	0
Diésel-Coaches Standard <= 18 t-EURO V	0	0	9	3	1	4	9	0	0	0	12	42	0	4	1	0
Diésel-Urban Buses Midi <= 15 t-CONVENTIONAL	0	0	17	4	13	17	9	36	1	10	14	32	10	9	114	2
Diésel-Urban Buses Midi <= 15 t-EURO I	0	1	384	11	196	493	209	614	42	338	351	847	62	359	2186	2
Diésel-Urban Buses Midi <= 15 t-EURO II	0	0	8	0	3	7	5	4	0	8	3	22	2	8	34	0
Diésel-Urban Buses Midi <= 15 t-EURO IV	0	3	378	24	433	558	263	259	13	232	218	986	74	288	1594	0
Diésel-Urban Buses Midi <= 15 t-EURO V	0	0	35	1	2	20	6	8	0	3	2	29	1	9	57	0
Diésel-Urban Buses Standard 15 - 18 t-CONVENTIONAL	0	0	5	0	6	3	12	11	2	9	12	27	5	10	41	0
Diésel-Urban Buses Standard 15 - 18 t-EURO I	0	2	127	79	183	181	469	529	27	293	637	1080	72	696	1190	2
Diésel-Urban Buses Standard 15 - 18 t-EURO II	0	1	3	2	2	11	18	5	1	0	1	7	4	4	18	0
Diésel-Urban Buses Standard 15 - 18 t-EURO IV	0	3	134	127	261	166	330	90	12	242	381	882	100	188	903	0
Diésel-Urban Buses Standard 15 - 18 t-EURO V	0	0	9	5	37	8	40	7	0	27	15	14	2	24	105	0
GNV-Urban CNG Buses-EURO I	0	0	2	0	0	6	0	3	1	2	4	3	0	4	25	0
GNV-Urban CNG Buses-EURO II	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GNV-Urban CNG Buses-EURO IV	0	0	0	10	3	4	1	0	0	0	0	1	0	0	49	0
Diésel eléctrico-Urban Buses Diesel Hybrid-EURO VI	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L-Category																
Gasolina-Quad & ATVs-CONVENTIONAL	120	6	117	10	276	249	86	165	72	96	224	250	57	139	1657	1
Gasolina-Quad & ATVs-EURO 2	548	86	1126	30	4040	3391	922	750	490	306	1129	1627	39	1045	3754	6
Gasolina-Mopeds 2-stroke <50 cm-CONVENTIONAL	1	5	74	3	182	107	50	896	9	87	159	400	980	177	3934	2
Gasolina-Mopeds 4-stroke <50 cm-CONVENTIONAL	1	29	608	5	145	1441	107	10857	445	67	558	2730	4624	262	12301	2
Gasolina-Mopeds 4-stroke <50 cm-EURO 2	0	0	30	0	1	7	11	13	4	17	8	7	0	46	365	0
Gasolina-Motorcycles 2-stroke >50 cm-CONVENTIONAL	56	701	4477	49	1871	5846	5384	2408	2392	2937	6709	9323	1743	4875	26102	96

Características vehículo	Departamento*															
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Gasolina-Motorcycles 4-stroke <250 cm-CONVENTIONAL	375	6363	62268	4624	47640	93572	54289	43621	24871	31658	45402	130846	37996	57411	228911	1515
Gasolina-Motorcycles 4-stroke <250 cm-EURO 2	1630	11277	155263	8107	120004	190484	136797	106574	69492	67268	91893	279424	53287	126319	526103	1919
Gasolina-Motorcycles 4-stroke >750 cm-CONVENTIONAL	0	4	61	4	22	114	111	268	29	73	89	145	21	93	577	10
Gasolina-Motorcycles 4-stroke >750 cm-EURO 2	0	19	72	2	26	136	79	133	18	88	446	400	9	224	1266	0
Gasolina-Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm-CONVENTIONAL	0	1	100	2	85	98	92	120	9	160	503	500	28	140	1618	0
Gasolina-Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm-EURO 2	1	22	292	7	257	846	353	272	67	388	1068	1345	56	824	3980	1
Heavy Duty Vehicles																
Diésel-Rigid <= 7.5 t-CONVENTIONAL	0	6	430	18	154	301	761	187	40	389	462	1370	123	399	1905	3
Diésel-Rigid <= 7.5 t-EURO I	0	10	510	16	135	427	861	109	25	544	487	2330	60	857	2984	2
Diésel-Rigid <= 7.5 t-EURO II	0	0	79	2	65	45	31	23	2	59	16	125	20	23	71	0
Diésel-Rigid <= 7.5 t-EURO IV	0	0	33	4	11	23	39	17	5	21	16	61	17	11	54	0
Diésel-Rigid <= 7.5 t-EURO V	0	2	931	26	184	881	959	293	30	254	542	3553	84	666	3735	1
Diésel-Rigid 7.5 - 12 t-CONVENTIONAL	0	0	143	39	67	103	194	142	15	93	151	632	31	183	756	0
Diésel-Rigid 7.5 - 12 t-EURO I	0	0	62	12	30	84	72	21	6	55	58	439	2	58	283	0
Diésel-Rigid 7.5 - 12 t-EURO II	0	0	20	12	2	15	12	5	2	4	2	37	6	26	24	0
Diésel-Rigid 7.5 - 12 t-EURO IV	0	1	13	3	5	13	13	14	11	0	4	22	9	32	35	0
Diésel-Rigid 7.5 - 12 t-EURO V	0	0	420	3	51	392	709	142	13	176	369	1826	60	373	1286	1
Diésel-Rigid 12 - 14 t-CONVENTIONAL	0	0	110	31	31	100	152	66	17	55	84	339	26	93	325	0
Diésel-Rigid 12 - 14 t-EURO I	0	0	142	22	40	151	262	31	3	150	137	896	28	74	578	0
Diésel-Rigid 12 - 14 t-EURO II	0	0	5	2	0	7	4	5	0	2	3	16	1	2	2	0
Diésel-Rigid 12 - 14 t-EURO IV	0	1	2	12	1	7	8	2	2	4	5	22	0	5	12	0
Diésel-Rigid 12 - 14 t-EURO V	0	1	82	0	3	76	121	38	5	50	26	271	11	29	245	0
Diésel-Rigid 14 - 20 t-CONVENTIONAL	0	0	81	7	36	52	126	45	19	22	84	313	16	86	125	0
Diésel-Rigid 14 - 20 t-EURO I	0	0	55	1	19	93	121	32	6	55	69	305	4	36	252	3
Diésel-Rigid 14 - 20 t-EURO II	0	6	38	12	6	23	30	23	16	19	15	95	6	36	38	4
Diésel-Rigid 14 - 20 t-EURO IV	0	17	27	9	13	25	21	10	8	5	9	47	0	25	42	1
Diésel-Rigid 14 - 20 t-EURO V	0	1	127	6	28	129	481	97	18	79	182	645	38	81	510	1
Diésel-Rigid 20 - 26 t-CONVENTIONAL	0	0	41	2	13	45	85	28	5	12	16	90	9	17	78	0
Diésel-Rigid 20 - 26 t-EURO I	0	0	58	1	17	96	104	25	5	146	52	287	6	59	195	0
Diésel-Rigid 20 - 26 t-EURO II	0	0	7	8	2	10	7	1	0	4	1	16	0	1	14	1
Diésel-Rigid 20 - 26 t-EURO IV	0	0	4	4	2	14	3	2	1	2	1	6	0	2	2	0

Características vehículo	Departamento*															
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Diésel-Rigid 20 - 26 t-EURO V	0	0	182	30	37	393	256	61	9	43	175	1043	38	76	433	0
Diésel-Rigid 26 - 28 t-CONVENTIONAL	0	0	16	5	7	51	80	22	2	12	9	102	7	14	76	0
Diésel-Rigid 26 - 28 t-EURO I	0	0	4	5	5	68	14	11	1	13	4	80	8	12	66	0
Diésel-Rigid 26 - 28 t-EURO II	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0
Diésel-Rigid 26 - 28 t-EURO IV	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Diésel-Rigid 26 - 28 t-EURO V	0	0	24	1	11	68	10	25	2	3	13	148	3	22	72	0
Diésel-Articulated 28 - 34 t-CONVENTIONAL	0	0	63	3	52	50	221	20	2	44	52	407	12	98	435	0
Diésel-Articulated 28 - 34 t-EURO I	0	0	65	4	90	175	150	15	8	96	119	513	5	134	576	0
Diésel-Articulated 28 - 34 t-EURO II	0	2	2	1	1	2	3	0	0	1	0	2	0	1	3	2
Diésel-Articulated 28 - 34 t-EURO IV	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	3	0	0	3	0
Diésel-Articulated 28 - 34 t-EURO V	0	0	70	0	33	132	25	2	14	22	56	222	0	67	278	0
Diésel-Articulated 50 - 60 t-CONVENTIONAL	0	0	12	3	10	7	87	7	0	14	12	321	1	11	43	0
Diésel-Articulated 50 - 60 t-EURO I	0	0	80	9	26	93	270	9	7	59	125	940	1	76	416	0
Diésel-Articulated 50 - 60 t-EURO II	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	8	0
Diésel-Articulated 50 - 60 t-EURO IV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Diésel-Articulated 50 - 60 t-EURO V	0	0	265	8	18	129	261	9	23	74	132	2302	2	74	690	0
Light Commercial Vehicles																
Gasolina-N1-III-CONVENTIONAL	0	0	3	0	16	6	16	16	0	1	24	10	9	8	51	0
Gasolina-N1-III-EURO 1	0	2	1	0	5	8	7	10	3	1	34	9	8	6	40	0
Gasolina-N1-III-EURO 2	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	2	0	0	0	0
Gasolina-N1-III-EURO 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gasolina-N1-III-EURO 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Passenger cars – Vehículos privados																
Gasolina-Large-SUV-Executive-ECE 15/04	0	16	2656	178	872	1396	2806	779	137	1547	2235	6549	624	2466	11279	15
Gasolina-Large-SUV-Executive-EURO 1	0	41	3887	331	1031	2354	4203	994	313	2019	4082	11549	810	2884	16635	12
Gasolina-Large-SUV-Executive-EURO 2	0	5	1469	197	854	1459	1681	2049	50	1008	1874	7142	452	1444	9508	4
Gasolina-Large-SUV-Executive-EURO 3	0	12	2386	250	1033	3207	2350	3326	122	1165	2610	7884	608	2563	12728	14
Gasolina-Large-SUV-Executive-EURO 4	0	3	550	26	194	721	490	879	27	210	513	1235	116	474	2227	1
Gasolina-Medium-ECE 15/04	0	2	592	58	122	401	566	156	8	633	812	2389	78	813	6674	5
Gasolina-Medium-EURO 1	0	2	821	32	250	420	1023	248	6	1077	1959	4355	188	1169	12211	0
Gasolina-Medium-EURO 2	0	1	1158	71	640	880	1003	1155	5	977	1779	4843	327	1455	9270	0
Gasolina-Medium-EURO 3	0	5	3621	380	1681	3467	3478	4141	30	2711	5204	11282	1065	4525	23623	3
Gasolina-Medium-EURO 4	0	1	606	55	243	679	543	1188	9	490	1068	1822	172	801	4640	0

Características vehículo	Departamento*															
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Gasolina-Mini-EURO 4	0	1	312	10	139	328	211	280	3	170	407	398	83	411	2244	0
Gasolina-Small-ECE 15/04	0	32	4491	53	1303	3243	6480	1924	133	3748	5024	16283	1169	5351	30835	6
Gasolina-Small-EURO 1	0	119	9412	125	2051	5055	13785	2454	209	9502	13081	30056	2017	8880	71284	17
Gasolina-Small-EURO 2	0	4	8881	269	3169	6743	7460	7344	59	6073	11070	25489	2005	8353	51430	4
Gasolina-Small-EURO 3	0	5	11310	896	5144	11304	10877	12440	143	8587	17126	30533	2706	13924	91119	5
Gasolina-Small-EURO 4	0	3	1984	159	1014	2307	2000	2786	37	1860	4023	5330	636	3016	20054	0
GNV-Large-SUV-Executive-Euro IV	0	1	113	6	35	166	49	12	7	183	288	159	44	165	857	1
GNV-Medium-Euro IV	0	0	6	1	2	13	1	1	2	22	26	21	2	12	186	0
GNV-Mini-Euro IV	0	0	88	0	178	326	6	1	0	22	192	9	50	17	772	0
GNV-Small-Euro IV	0	0	150	1	601	206	28	8	1	402	261	80	73	140	883	0
Diésel-Large-SUV-Executive-CONVENTIONAL	0	1	285	4	264	120	163	22	10	433	659	399	55	253	1358	0
Diésel-Large-SUV-Executive-EURO II	0	5	1390	22	351	1025	595	339	59	498	921	3774	283	837	3288	2
Diésel-Large-SUV-Executive-EURO IV	0	18	1171	345	239	1893	623	907	83	362	830	2889	224	866	2742	3
Diésel-Medium-CONVENTIONAL	0	0	117	0	181	47	64	5	2	89	273	156	41	109	554	0
Diésel-Medium-EURO II	0	1	313	2	59	220	80	31	6	150	289	902	52	315	1044	0
Diésel-Medium-EURO IV	0	4	85	2	4	133	23	68	4	60	96	165	1	89	236	0
Diésel-Mini-EURO IV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Diésel-Small-CONVENTIONAL	0	1	52	0	1431	23	47	4	0	186	1189	37	4	45	381	0
Diésel-Small-EURO II	0	0	0	0	13	0	1	0	0	0	47	0	0	0	23	0
Diésel-Small-EURO IV	0	0	12	2	6	123	11	15	0	1	11	21	2	31	74	0
Gasolina eléctrico-Large-SUV-Executive-EURO 6	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	4	7	0	0	9	0
Gasolina eléctrico-Medium-EURO 6	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	2	2	0	4	10	0
Gasolina eléctrico-Mini-EURO 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Gasolina eléctrico-Small-EURO 6	0	0	4	0	0	2	4	4	0	2	8	18	0	10	37	0
Passenger cars - Taxi																
Gasolina-Large-SUV-Executive-EURO 1	0	0	0	0	2	0	2	14	1	0	0	1	0	2	4	0
Gasolina-Large-SUV-Executive-EURO 2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Gasolina-Medium-EURO 1	0	0	5	1	3	2	4	3	0	4	10	1	2	8	20	0
Gasolina-Medium-EURO 2	0	0	0	2	3	0	34	4	0	0	0	4	1	0	3	0
Gasolina-Medium-EURO 3	0	0	6	15	49	9	0	163	13	14	3	55	36	14	164	1
Gasolina-Medium-EURO 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Gasolina-Mini-EURO 4	0	0	3	0	55	11	3	245	1	4	5	9	3	20	16	0

Características vehículo	Departamento*															
	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
Gasolina-Small-EURO 1	0	28	384	155	101	337	772	1775	113	175	352	1334	320	1076	1534	11
Gasolina-Small-EURO 2	0	65	541	771	1330	651	702	2450	91	403	543	2599	355	856	4253	18
Gasolina-Small-EURO 3	0	44	375	410	1143	609	1045	2547	135	622	793	1656	289	683	5453	5
Gasolina-Small-EURO 4	0	1	34	5	47	53	193	187	8	76	95	127	16	35	627	0
GNV-Large-SUV-Executive-Euro IV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
GNV-Medium-Euro IV	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	1	0	0	1	5	0
GNV-Mini-Euro IV	0	0	733	6	36	1521	1	1	1	43	304	10	293	549	1665	0
GNV-Small-Euro IV	0	0	47	0	8	63	3	0	0	123	177	10	54	57	411	0
Diésel-Large-SUV-Executive-CONVENTIONAL	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	2	1	0
Diésel-Medium-CONVENTIONAL	0	0	11	0	0	2	4	0	0	1	6	2	1	7	7	0
Diésel-Mini-EURO IV	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Diésel-Small-CONVENTIONAL	0	0	1	0	15	1	4	1	0	0	332	3	3	2	43	0
Diésel-Small-EURO IV	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
*Departamento	17. Guainía	18. Guaviare	19. Huila	20. La Guajira	21. Magdalena	22. Meta	23. Nariño	24. Norte de Santander	25. Putumayo	26. Quindío	27. Risaralda	28. Santander	29. Sucre	30. Tolima	31. Valle del Cauca	32. Vichada

Fuente. Elaboración propia

D. Anexo: Factores de emisión COPERT aproximados para Colombia

Anexo D. Factores de emisión COPERT por departamento, categoría vehicular y combustible (g/km-veh)

CATEGORÍA VEHICULAR	COMBUSTIBLE	CO	NO ₂	PM _{2.5}	SO ₂	CO ₂	BC
Amazonas							
Buses	Diésel	1.7601	1.1044	0.1812	0.0174	1122.3216	0.1209
L-Category	Gasolina	9.4453	0.0093	0.0187	0.0085	79.9742	0.0027
Heavy Duty Vehicles	Diésel	1.7990	0.6254	0.2504	0.0089	573.5326	0.1313
Passenger cars (No publico)	Gasolina	1.1775	0.0072	0.0005	0.0225	212.2535	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1707	0.0021	0.0007	0.00001	182.2007	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.1665	0.3496	0.0349	0.0036	233.2255	0.0300
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	0.9665	0.0063	0.0004	0.0194	183.2172	0.0001
Antioquia							
Buses	Diésel	2.4941	1.4035	0.2583	0.0215	1384.3769	0.1700
Buses	GNV	1.2633	0.1824	0.0112	0.0001	1193.5199	-
L-Category	Gasolina	9.8801	0.0092	0.0153	0.0099	93.4513	0.0023
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.2089	0.7963	0.1888	0.0164	1053.0791	0.1085
Light Commercial Vehicles	Gasolina	30.1806	0.0853	0.0035	0.0489	460.5443	0.0003
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.2368	0.0144	0.0005	0.0263	247.9008	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1604	0.0024	0.0007	0.00002	214.1510	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.5421	0.2260	0.1077	0.0042	269.4489	0.0700
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0725	0.00005	0.0003	0.0134	126.1647	0.00005
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.4895	0.0085	0.0005	0.0238	224.7842	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1571	0.0024	0.0008	0.00002	219.0730	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	0.9649	0.0896	0.2919	0.0039	249.6113	0.1610
Arauca							
Buses	Diésel	2.0912	1.2437	0.2498	0.0184	1182.8240	0.1631
Buses	GNV	8.4000	0.6600	0.0020	0.0001	1550.9743	-
L-Category	Gasolina	9.8458	0.0090	0.0189	0.0087	82.2818	0.0027
Heavy Duty Vehicles	Diésel	1.9594	0.9474	0.2045	0.0142	912.8994	0.1167
Light Commercial Vehicles	Gasolina	16.9871	0.0533	0.0036	0.0488	460.4194	0.0007
Passenger cars (No publico)	Gasolina	4.5565	0.0228	0.0004	0.0236	222.7641	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1683	0.0021	0.0007	0.00001	190.7287	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.4501	0.1880	0.0778	0.0038	242.0999	0.0543
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	0.9750	0.0066	0.0004	0.0215	202.8894	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1635	0.0022	0.0008	0.00001	198.3281	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	0.1677	0.4045	0.0348	0.0018	117.9699	0.0303
Archipiélago de San Andrés y Providencia							
Buses	Diésel	2.3976	1.2890	0.2490	0.0197	1270.3372	0.1610
L-Category	Gasolina	12.7208	0.0081	0.0388	0.0097	91.7710	0.0049
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.1981	0.8275	0.2900	0.0115	742.8286	0.1575
Passenger cars (No publico)	Gasolina	4.5712	0.0216	0.0004	0.0294	277.2784	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.2672	0.3653	0.0494	0.0041	261.4341	0.0387
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.1004	0.00005	0.0004	0.0109	102.3953	0.0001

182 Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

CATEGORÍA VEHICULAR	COMBUSTIBLE	CO	NO ₂	PM _{2.5}	SO ₂	CO ₂	BC
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	2.4909	0.0129	0.0005	0.0294	276.9318	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1605	0.0023	0.0008	0.00002	207.1212	0.0001
Atlántico							
Buses	Diésel	2.6148	1.4642	0.2663	0.0226	1451.0919	0.1745
Buses	GNV	7.2943	0.5860	0.0034	0.0001	1495.5688	-
L-Category	Gasolina	11.7641	0.0095	0.0166	0.0105	98.5291	0.0025
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.0460	0.7841	0.2044	0.0142	915.4210	0.1184
Light Commercial Vehicles	Gasolina	26.1982	0.0701	0.0039	0.0547	515.6100	0.0006
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.0633	0.0137	0.0005	0.0262	246.5404	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1598	0.0024	0.0007	0.00002	214.4190	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.4979	0.2257	0.0812	0.0042	271.9734	0.0572
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0722	0.00005	0.0003	0.0145	136.6199	0.00004
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.1017	0.0069	0.0005	0.0239	225.4610	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1569	0.0024	0.0008	0.00002	219.6903	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0474	0.0775	0.3175	0.0041	266.6431	0.1746
Bogotá D.C.							
Buses	Diésel	3.0223	1.6109	0.3185	0.0239	1540.7135	0.2092
Buses	GNV	5.9051	0.5005	0.0054	0.0001	1456.3007	-
Buses	Diésel eléctrico	0.3109	0.0374	-	0.0154	987.8161	-
L-Category	Gasolina	11.6956	0.0092	0.0119	0.0110	103.3555	0.0020
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.4853	0.9927	0.3245	0.0144	928.0415	0.1819
Light Commercial Vehicles	Gasolina	43.3482	0.1126	0.0037	0.0489	460.5677	0.0001
Passenger cars (No publico)	Gasolina	4.2322	0.0170	0.0005	0.0281	264.7177	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1561	0.0025	0.0007	0.00002	224.6799	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.5948	0.2173	0.1103	0.0044	280.2104	0.0723
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0740	0.00004	0.0003	0.0146	138.0258	0.00004
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.7583	0.0091	0.0005	0.0244	230.0802	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1551	0.0025	0.0008	0.00002	227.5253	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0908	0.0822	0.3243	0.0042	273.0522	0.1785
Bolívar							
Buses	Diésel	2.3776	1.3457	0.2303	0.0208	1339.3150	0.1512
Buses	GNV	1.4427	0.1930	0.0108	0.0001	1185.8533	-
L-Category	Gasolina	9.9497	0.0094	0.0137	0.0097	91.4418	0.0022
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.2591	0.9527	0.2814	0.0149	960.8251	0.1591
Light Commercial Vehicles	Gasolina	28.1699	0.0801	0.0039	0.0530	499.9391	0.0005
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.1665	0.0145	0.0005	0.0254	239.5568	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1649	0.0023	0.0007	0.00002	209.7777	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.6056	0.1829	0.1330	0.0041	262.8207	0.0825
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0711	0.00006	0.0003	0.0124	116.7007	0.00005
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	0.8434	0.0052	0.0006	0.0233	219.1525	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1577	0.0024	0.0008	0.00002	216.6580	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0281	0.0768	0.3138	0.0041	263.8467	0.1726
Boyacá							
Buses	Diésel	2.6164	1.3784	0.2858	0.0207	1329.8131	0.1864
Buses	GNV	6.5626	0.5373	0.0044	0.0001	1462.8296	-
L-Category	Gasolina	11.1720	0.0093	0.0153	0.0101	95.1302	0.0024
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.6120	1.0839	0.2759	0.0204	1312.7171	0.1607
Light Commercial Vehicles	Gasolina	24.6294	0.0681	0.0035	0.0485	456.6597	0.0005
Passenger cars (No publico)	Gasolina	4.6694	0.0199	0.0005	0.0266	250.8954	0.0001

CATEGORÍA VEHICULAR	COMBUSTIBLE	CO	NO ₂	PM _{2.5}	SO ₂	CO ₂	BC
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1624	0.0023	0.0007	0.00002	214.8326	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.5301	0.2184	0.0967	0.0042	270.3652	0.0648
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0716	0.00006	0.0003	0.0126	118.7975	0.00005
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.2678	0.0074	0.0005	0.0242	228.0809	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1564	0.0024	0.0008	0.00002	221.9440	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	0.9556	0.0702	0.2882	0.0038	241.8209	0.1585
Caldas							
Buses	Diésel	2.5247	1.3702	0.2854	0.0205	1321.1663	0.1843
Buses	GNV	2.7367	0.2798	0.0091	0.0001	1248.1347	-
L-Category	Gasolina	10.8610	0.0090	0.0178	0.0098	91.9452	0.0026
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.1642	0.8371	0.2642	0.0131	842.7498	0.1470
Light Commercial Vehicles	Gasolina	27.1773	0.0774	0.0039	0.0539	507.6151	0.0005
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.4895	0.0159	0.0005	0.0248	233.5703	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1618	0.0023	0.0007	0.00002	208.4170	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.5614	0.2105	0.1218	0.0040	259.8716	0.0766
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0709	0.00005	0.0003	0.0140	132.3488	0.00004
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.3695	0.0076	0.0005	0.0234	220.4230	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1582	0.0024	0.0008	0.00002	215.0247	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0178	0.0765	0.3117	0.0041	262.3023	0.1714
Caquetá							
Buses	Diésel	3.0643	1.4614	0.4243	0.0204	1311.6689	0.2629
Buses	GNV	8.4000	0.6600	0.0020	0.0001	1550.9743	-
L-Category	Gasolina	9.3362	0.0093	0.0117	0.0094	88.3870	0.0020
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.6263	1.1866	0.3633	0.0162	1045.3523	0.2061
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.9345	0.0177	0.0005	0.0250	235.5489	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1619	0.0023	0.0007	0.00002	207.4800	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.4048	0.2983	0.0885	0.0041	264.6564	0.0588
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.6038	0.0090	0.0005	0.0232	218.3929	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1583	0.0024	0.0008	0.00002	214.3927	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0139	0.0763	0.3109	0.0041	261.6969	0.1710
Casanare							
Buses	Diésel	2.1176	1.2268	0.2478	0.0183	1175.6383	0.1612
L-Category	Gasolina	8.5807	0.0093	0.0134	0.0089	83.8999	0.0021
Heavy Duty Vehicles	Diésel	1.7890	0.6633	0.1366	0.0135	868.7641	0.0774
Light Commercial Vehicles	Gasolina	37.2031	0.1319	0.0039	0.0469	441.6890	0.0001
Passenger cars (No publico)	Gasolina	1.7533	0.0095	0.0005	0.0238	223.8879	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1694	0.0022	0.0007	0.00001	197.9052	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.3794	0.2391	0.0564	0.0039	252.8878	0.0436
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	0.9202	0.0060	0.0005	0.0219	206.4202	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1612	0.0023	0.0008	0.00001	204.7317	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	0.9543	0.0740	0.2979	0.0039	251.9399	0.1638
Cauca							
Buses	Diésel	2.7446	1.4003	0.3822	0.0196	1258.3590	0.2431
Buses	GNV	3.4595	0.3279	0.0081	0.0001	1284.5568	-
L-Category	Gasolina	10.3841	0.0093	0.0151	0.0096	90.4101	0.0023
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.4560	1.0747	0.3250	0.0159	1025.8769	0.1790
Light Commercial Vehicles	Gasolina	25.5515	0.0738	0.0038	0.0534	503.7163	0.0005
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.7790	0.0174	0.0005	0.0252	237.0851	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1645	0.0023	0.0007	0.00002	208.1586	0.0001

184 Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

CATEGORÍA VEHICULAR	COMBUSTIBLE	CO	NO ₂	PM _{2.5}	SO ₂	CO ₂	BC
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.7642	0.1384	0.2054	0.0040	256.8979	0.1182
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0709	0.00006	0.0003	0.0124	116.6298	0.00005
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.0622	0.0066	0.0005	0.0231	218.0733	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1582	0.0024	0.0008	0.00002	214.8599	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	0.9536	0.1068	0.2903	0.0039	252.0570	0.1606
Cesar							
Buses	Diésel	2.3498	1.3119	0.2373	0.0204	1309.4184	0.1505
Buses	GNV	0.9377	0.1558	0.0108	0.0001	1111.5150	-
L-Category	Gasolina	11.2600	0.0094	0.0160	0.0098	92.1031	0.0024
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.1979	1.0619	0.2937	0.0157	1010.4286	0.1684
Light Commercial Vehicles	Gasolina	12.0012	0.0267	0.0038	0.0552	520.5990	0.0010
Passenger cars (No publico)	Gasolina	2.9406	0.0144	0.0005	0.0252	237.6408	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1672	0.0022	0.0007	0.00001	202.2965	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.3551	0.2798	0.0598	0.0040	260.1769	0.0448
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.2351	0.0075	0.0005	0.0226	213.0086	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1599	0.0023	0.0008	0.00002	208.9306	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	0.9800	0.0751	0.3037	0.0040	256.2989	0.1670
Chocó							
Buses	Diésel	3.2406	1.5440	0.4487	0.0211	1355.0526	0.2838
L-Category	Gasolina	12.6821	0.0094	0.0171	0.0107	101.1565	0.0025
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.2500	1.1262	0.2882	0.0155	997.3116	0.1749
Light Commercial Vehicles	Gasolina	12.8509	0.0264	0.0037	0.0559	526.8068	0.0009
Passenger cars (No publico)	Gasolina	7.4254	0.0315	0.0004	0.0303	285.1916	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.3490	0.3310	0.0579	0.0044	285.2262	0.0440
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.7635	0.0093	0.0005	0.0250	235.4910	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.1066	0.0793	0.3282	0.0043	274.6283	0.1805
Córdoba							
Buses	Diésel	2.2915	1.3374	0.2577	0.0203	1303.4509	0.1689
Buses	GNV	4.6689	0.4078	0.0064	0.0001	1331.6894	-
L-Category	Gasolina	10.1924	0.0093	0.0188	0.0093	87.4304	0.0027
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.1650	0.8611	0.2604	0.0133	858.7825	0.1452
Light Commercial Vehicles	Gasolina	20.3863	0.0615	0.0035	0.0467	440.0424	0.0005
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.0927	0.0154	0.0005	0.0248	233.5089	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1721	0.0022	0.0007	0.00001	203.0610	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.4684	0.2098	0.0809	0.0040	254.9043	0.0564
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.1996	0.0075	0.0005	0.0226	213.3370	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1596	0.0024	0.0008	0.00002	210.0573	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	0.9869	0.0753	0.3052	0.0040	257.4382	0.1679
Cundinamarca							
Buses	Diésel	2.2502	1.2895	0.2236	0.0198	1275.3323	0.1475
Buses	GNV	5.4513	0.4626	0.0058	0.0001	1403.1795	-
Buses	Diésel eléctrico	0.2721	0.0342	--	0.0144	927.4931	-
L-Category	Gasolina	9.2088	0.0092	0.0137	0.0097	91.2132	0.0022
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.1997	0.8570	0.2042	0.0168	1083.4758	0.1190
Light Commercial Vehicles	Gasolina	14.6204	0.0350	0.0029	0.0553	521.4177	0.0005
Passenger cars (No publico)	Gasolina	5.4071	0.0226	0.0005	0.0274	258.3490	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1610	0.0024	0.0007	0.00002	214.0809	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.3683	0.3051	0.0581	0.0043	275.4336	0.0444
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0727	0.00005	0.0003	0.0140	132.0273	0.00004

CATEGORÍA VEHICULAR	COMBUSTIBLE	CO	NO ₂	PM _{2.5}	SO ₂	CO ₂	BC
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.4069	0.0082	0.0005	0.0239	224.9696	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1572	0.0024	0.0008	0.00002	218.6988	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0410	0.0773	0.3163	0.0041	265.7430	0.1740
Guainía							
L-Category	Gasolina	7.5845	0.0101	0.0105	0.0107	100.8529	0.0018
Guaviare							
Buses	Diésel	1.9412	1.1926	0.1909	0.0179	1149.3395	0.1276
L-Category	Gasolina	10.1708	0.0085	0.0170	0.0089	84.1440	0.0025
Heavy Duty Vehicles	Diésel	1.2730	0.6454	0.1293	0.0102	654.2286	0.0775
Light Commercial Vehicles	Gasolina	10.6385	0.0222	0.0032	0.0470	443.3351	0.0008
Passenger cars (No publico)	Gasolina	5.1356	0.0238	0.0005	0.0250	235.5155	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1624	0.0023	0.0007	0.00001	202.0385	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.3038	0.3275	0.0576	0.0039	252.0364	0.0430
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.2706	0.0081	0.0004	0.0222	209.3157	0.0001
Huila							
Buses	Diésel	2.3847	1.2894	0.2610	0.0193	1243.3420	0.1695
Buses	GNV	8.4000	0.6600	0.0020	0.0001	1550.9743	-
L-Category	Gasolina	9.9662	0.0092	0.0136	0.0096	90.5208	0.0022
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.2950	0.8430	0.2222	0.0154	987.6943	0.1246
Light Commercial Vehicles	Gasolina	35.9868	0.1011	0.0039	0.0531	500.7846	0.0003
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.7663	0.0169	0.0005	0.0259	244.1108	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1597	0.0024	0.0007	0.00002	211.7792	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.4995	0.2245	0.0853	0.0042	267.7336	0.0591
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0729	0.00004	0.0003	0.0129	121.8243	0.00005
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.5499	0.0090	0.0004	0.0235	221.8539	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1579	0.0024	0.0008	0.00002	216.0214	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0241	0.0767	0.3130	0.0041	263.2492	0.1721
La Guajira							
Buses	Diésel	2.3774	1.4221	0.2239	0.0224	1440.1314	0.1477
Buses	GNV	0.9502	0.1575	0.0109	0.0001	1120.6052	-
L-Category	Gasolina	10.6487	0.0094	0.0113	0.0094	88.5361	0.0020
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.4693	1.1482	0.3025	0.0164	1054.7138	0.1683
Passenger cars (No publico)	Gasolina	2.3929	0.0128	0.0005	0.0262	246.5099	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1664	0.0022	0.0007	0.00001	200.8754	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.2024	0.3811	0.0390	0.0041	262.0355	0.0327
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.1179	0.0076	0.0004	0.0228	214.6189	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1592	0.0024	0.0008	0.00002	211.1925	0.0001
Magdalena							
Buses	Diésel	2.2063	1.2537	0.2181	0.0194	1245.2629	0.1426
Buses	GNV	1.0158	0.1651	0.0114	0.0001	1171.8088	-
L-Category	Gasolina	9.8837	0.0095	0.0115	0.0098	92.3611	0.0020
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.3626	1.0382	0.3091	0.0152	980.8132	0.1725
Light Commercial Vehicles	Gasolina	34.8549	0.1041	0.0039	0.0517	487.3695	0.0003
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.0651	0.0143	0.0005	0.0260	245.3090	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1630	0.0023	0.0007	0.00002	211.0325	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.8463	0.1181	0.2363	0.0040	258.9225	0.1337
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	0.9067	0.0063	0.0004	0.0237	222.9869	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1575	0.0024	0.0008	0.00002	217.5805	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	0.9357	0.1194	0.2822	0.0039	249.2625	0.1566

186 Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

CATEGORÍA VEHICULAR	COMBUSTIBLE	CO	NO ₂	PM _{2.5}	SO ₂	CO ₂	BC
Meta							
Buses	Diésel	2.2907	1.2626	0.2588	0.0186	1199.7449	0.1686
Buses	GNV	4.9576	0.4209	0.0053	0.0001	1276.9533	-
L-Category	Gasolina	11.0403	0.0095	0.0148	0.0102	95.8516	0.0023
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.1941	0.8606	0.2153	0.0157	1007.5513	0.1246
Light Commercial Vehicles	Gasolina	21.0804	0.0555	0.0035	0.0495	466.4338	0.0006
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.0805	0.0137	0.0005	0.0262	246.8691	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1606	0.0023	0.0007	0.00002	212.6631	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.3739	0.2983	0.0597	0.0042	268.8390	0.0452
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0714	0.00005	0.0003	0.0124	117.2434	0.00005
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.2970	0.0077	0.0005	0.0237	223.0615	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1570	0.0024	0.0008	0.00002	219.4179	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0456	0.0871	0.3172	0.0041	266.4056	0.1745
Nariño							
Buses	Diésel	2.5634	1.4038	0.2965	0.0209	1344.0417	0.1930
Buses	GNV	0.9852	0.1618	0.0112	0.0001	1148.2072	-
L-Category	Gasolina	9.7699	0.0091	0.0145	0.0094	88.7932	0.0023
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.3580	0.9910	0.2728	0.0160	1031.4934	0.1530
Light Commercial Vehicles	Gasolina	32.6508	0.0969	0.0039	0.0522	491.7163	0.0004
Passenger cars (No publico)	Gasolina	4.1500	0.0187	0.0005	0.0250	235.6070	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1621	0.0023	0.0007	0.00002	207.0636	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.4832	0.2311	0.0915	0.0041	263.8032	0.0615
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0718	0.00005	0.0003	0.0125	117.4232	0.00005
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.3920	0.0079	0.0005	0.0230	217.1301	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1589	0.0024	0.0008	0.00002	212.3745	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0013	0.0801	0.3083	0.0040	259.7343	0.1696
Norte de Santander							
Buses	Diésel	2.8656	1.4318	0.4033	0.0199	1278.5376	0.2579
Buses	GNV	8.4000	0.6600	0.0020	0.0001	1550.9743	-
L-Category	Gasolina	10.4934	0.0088	0.0239	0.0097	91.0975	0.0032
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.4812	0.9713	0.2794	0.0146	942.0446	0.1499
Light Commercial Vehicles	Gasolina	31.1398	0.0838	0.0039	0.0541	509.8081	0.0004
Passenger cars (No publico)	Gasolina	2.0742	0.0098	0.0005	0.0266	250.9162	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1590	0.0024	0.0007	0.00002	215.3235	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.3227	0.3389	0.0497	0.0043	276.0981	0.0398
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0733	0.00004	0.0003	0.0153	143.7520	0.00004
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.3919	0.0080	0.0005	0.0238	224.3493	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1571	0.0024	0.0008	0.00002	219.0654	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	0.6224	0.2585	0.1767	0.0037	236.7898	0.1030
Putumayo							
Buses	Diésel	2.8100	1.4578	0.3951	0.0201	1293.8078	0.2523
Buses	GNV	8.4000	0.6600	0.0020	0.0001	1550.9743	-
L-Category	Gasolina	9.5106	0.0091	0.0144	0.0094	88.7005	0.0022
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.9351	1.1056	0.3045	0.0184	1183.0163	0.1684
Light Commercial Vehicles	Gasolina	13.0922	0.0265	0.0037	0.0565	532.5606	0.0009
Passenger cars (No publico)	Gasolina	5.2332	0.0238	0.0004	0.0290	273.4131	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1598	0.0023	0.0007	0.00002	209.8215	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.4066	0.2751	0.0662	0.0042	269.8038	0.0488
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.5045	0.0083	0.0005	0.0232	218.8799	0.0001

CATEGORÍA VEHICULAR	COMBUSTIBLE	CO	NO ₂	PM _{2.5}	SO ₂	CO ₂	BC
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1588	0.0024	0.0008	0.00002	212.7020	0.0001
Quindío							
Buses	Diésel	2.5605	1.3733	0.3076	0.0201	1295.6742	0.1997
Buses	GNV	8.4000	0.6600	0.0020	0.0001	1550.9743	-
L-Category	Gasolina	10.6638	0.0091	0.0154	0.0098	92.4982	0.0024
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.3554	0.9714	0.3108	0.0149	960.4060	0.1797
Light Commercial Vehicles	Gasolina	27.2225	0.0726	0.0037	0.0525	494.6805	0.0005
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.8801	0.0170	0.0005	0.0253	238.5514	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1595	0.0024	0.0007	0.00002	212.9055	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.6641	0.1806	0.1540	0.0041	263.7219	0.0932
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0729	0.00005	0.0003	0.0126	118.3384	0.00005
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.0657	0.0064	0.0005	0.0236	222.5300	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1576	0.0024	0.0008	0.00002	217.0962	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0309	0.0769	0.3143	0.0041	264.2604	0.1729
Risaralda							
Buses	Diésel	2.6806	1.4505	0.3412	0.0211	1355.0482	0.2217
Buses	GNV	8.4000	0.6600	0.0020	0.0001	1550.9743	-
L-Category	Gasolina	10.7411	0.0090	0.0193	0.0098	92.2653	0.0027
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.3415	0.9020	0.2609	0.0153	981.4246	0.1476
Light Commercial Vehicles	Gasolina	23.6182	0.0651	0.0037	0.0519	488.9944	0.0006
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.1095	0.0144	0.0005	0.0249	234.7271	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1616	0.0023	0.0007	0.00002	208.4655	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.6906	0.1643	0.1736	0.0040	257.4994	0.1025
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0718	0.00005	0.0003	0.0139	131.3796	0.00004
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.2088	0.0071	0.0005	0.0231	218.1754	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1585	0.0024	0.0008	0.00002	213.8917	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0083	0.0774	0.3095	0.0041	260.8284	0.1702
Santander							
Buses	Diésel	2.5816	1.4286	0.2869	0.0213	1369.0205	0.1878
Buses	GNV	6.5618	0.5372	0.0044	0.0001	1462.1832	-
L-Category	Gasolina	10.7830	0.0092	0.0151	0.0099	93.6004	0.0023
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.4136	0.9530	0.2401	0.0179	1153.7962	0.1381
Light Commercial Vehicles	Gasolina	24.4237	0.0647	0.0035	0.0493	464.6527	0.0005
Passenger cars (No publico)	Gasolina	4.1075	0.0175	0.0005	0.0267	251.6492	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1596	0.0024	0.0007	0.00002	215.9604	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.4839	0.2281	0.0712	0.0043	273.8014	0.0524
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0729	0.00005	0.0003	0.0138	129.9083	0.00004
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.4601	0.0086	0.0004	0.0241	227.3263	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1567	0.0024	0.0008	0.00002	220.5355	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0528	0.0777	0.3185	0.0042	267.4176	0.1752
Sucre							
Buses	Diésel	2.3407	1.3271	0.2780	0.0197	1269.6615	0.1769
L-Category	Gasolina	11.3826	0.0089	0.0239	0.0092	86.6209	0.0034
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.1915	0.8328	0.2517	0.0130	837.3574	0.1349
Light Commercial Vehicles	Gasolina	25.8819	0.0813	0.0039	0.0516	485.9592	0.0005
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.2868	0.0163	0.0005	0.0241	226.8480	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1655	0.0022	0.0007	0.00001	198.8412	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.4754	0.2022	0.0856	0.0039	253.2697	0.0585
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.4544	0.0086	0.0005	0.0221	208.0909	0.0001

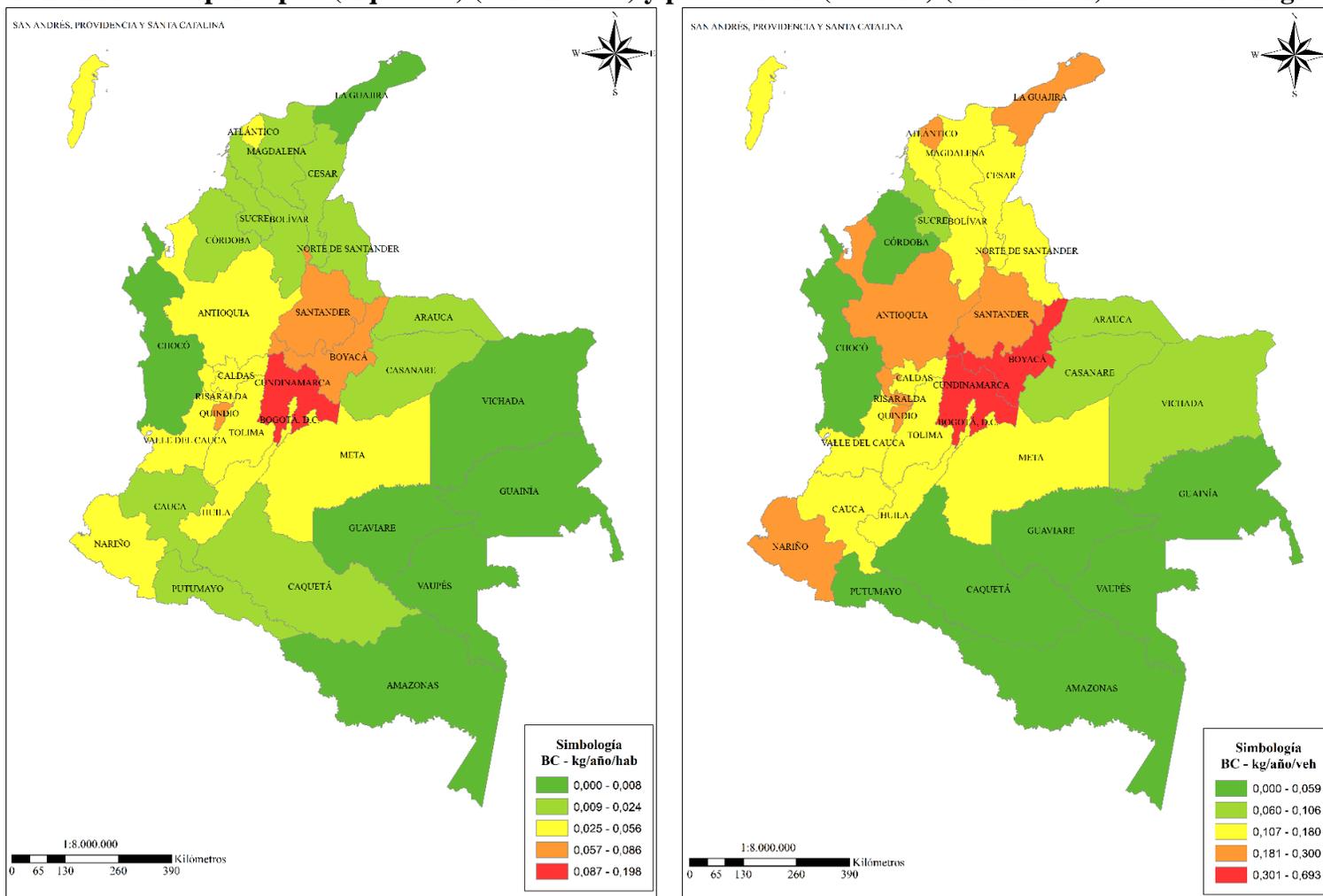
188 Emisiones de contaminantes atmosféricos por el transporte terrestre por carretera en Colombia

CATEGORÍA VEHICULAR	COMBUSTIBLE	CO	NO ₂	PM _{2.5}	SO ₂	CO ₂	BC
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1613	0.0023	0.0008	0.00001	204.4463	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	0.9525	0.0740	0.2975	0.0039	251.6370	0.1636
Tolima							
Buses	Diésel	2.7117	1.4335	0.3560	0.0205	1320.8758	0.2313
Buses	GNV	8.4000	0.6600	0.0020	0.0001	1550.9743	-
L-Category	Gasolina	10.4499	0.0093	0.0149	0.0097	91.7735	0.0023
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.0916	0.8703	0.2521	0.0137	881.9947	0.1424
Light Commercial Vehicles	Gasolina	26.0116	0.0755	0.0035	0.0472	444.9266	0.0004
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.7261	0.0165	0.0005	0.0256	241.0048	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1625	0.0023	0.0007	0.00002	211.5475	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.4985	0.2285	0.0908	0.0041	263.4287	0.0615
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0716	0.00005	0.0003	0.0129	121.9426	0.00005
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.8146	0.0100	0.0005	0.0235	221.8887	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1662	0.0025	0.0008	0.00002	229.2708	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	0.9787	0.0796	0.2983	0.0039	250.7366	0.1641
Valle del Cauca							
Buses	Diésel	2.5069	1.3430	0.3058	0.0197	1269.2825	0.1974
Buses	GNV	4.4051	0.4166	0.0103	0.0001	1626.0117	-
L-Category	Gasolina	10.4441	0.0091	0.0190	0.0097	91.4869	0.0028
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.0949	0.8362	0.2376	0.0142	912.2460	0.1348
Light Commercial Vehicles	Gasolina	28.2156	0.0807	0.0039	0.0516	486.7070	0.0005
Passenger cars (No publico)	Gasolina	3.5128	0.0156	0.0005	0.0251	236.2818	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1622	0.0023	0.0007	0.00002	211.0381	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.5579	0.2043	0.1112	0.0041	263.1902	0.0718
Passenger cars (No publico)	Gasolina eléctrico	0.0724	0.00005	0.0003	0.0135	127.2023	0.00005
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.0566	0.0065	0.0005	0.0235	221.0312	0.0001
Passenger cars (Taxis)	GNV	0.1579	0.0024	0.0008	0.00002	215.8338	0.0001
Passenger cars (Taxis)	Diésel	1.0229	0.0774	0.3127	0.0041	263.0591	0.1720
Vichada							
Buses	Diésel	3.9568	1.4812	0.6509	0.0191	1228.0510	0.3685
L-Category	Gasolina	11.1980	0.0091	0.0169	0.0090	85.1832	0.0025
Heavy Duty Vehicles	Diésel	2.2643	1.1596	0.2736	0.0161	1033.0872	0.1668
Passenger cars (No publico)	Gasolina	5.7458	0.0303	0.0005	0.0273	257.6050	0.0001
Passenger cars (No publico)	GNV	0.1644	0.0022	0.0007	0.00001	196.0493	0.0001
Passenger cars (No publico)	Diésel	0.3184	0.2790	0.0447	0.0040	256.5545	0.0372
Passenger cars (Taxis)	Gasolina	1.4005	0.0090	0.0004	0.0205	193.1179	0.0001

Fuente. Elaboración propia

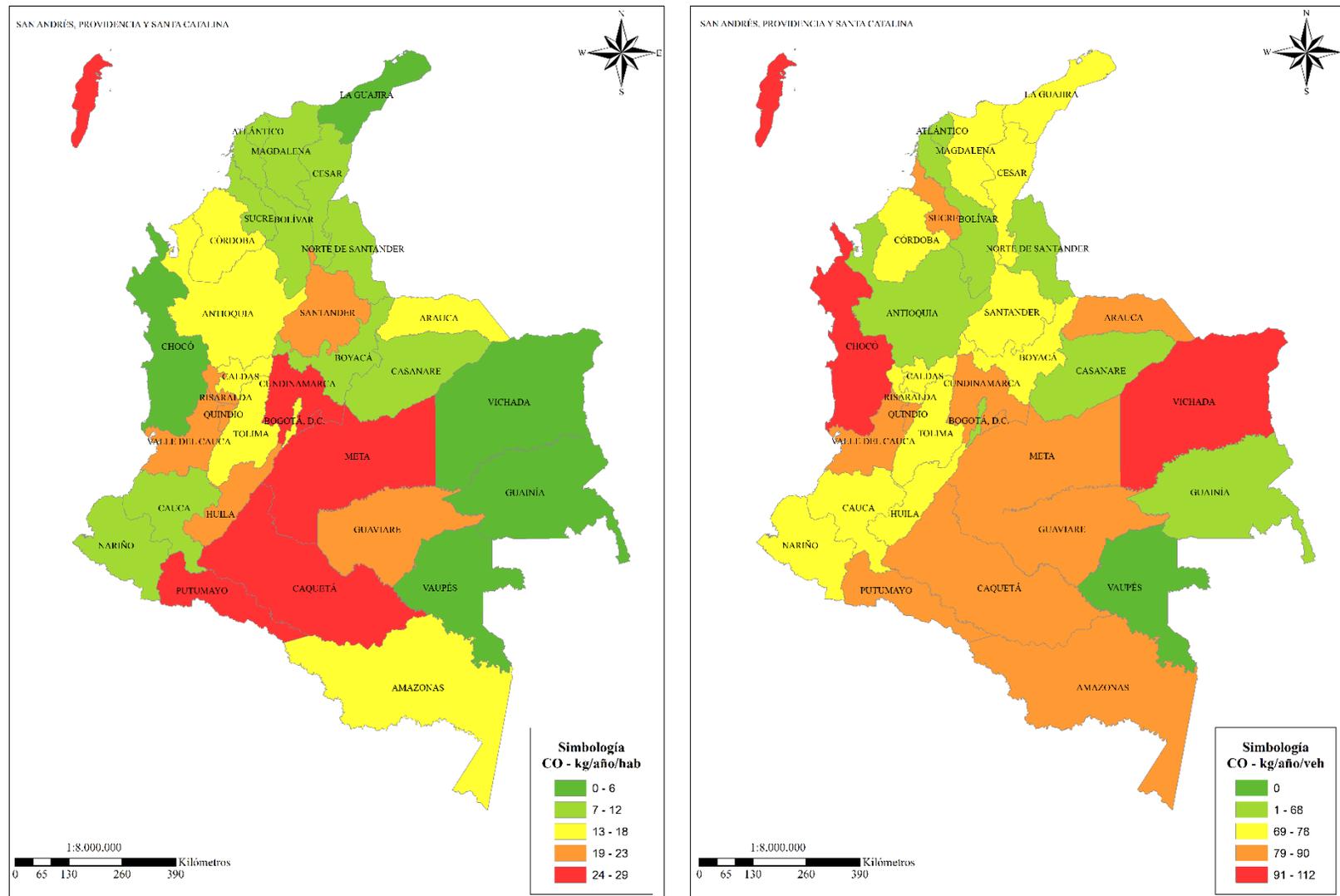
E. Anexo: Emisiones per cápita y por vehículo por departamento

Anexo E. Emisiones per cápita (izquierda) (ton/año-hab) y por vehículo (derecha) (ton/año-veh) de carbono negro (BC)



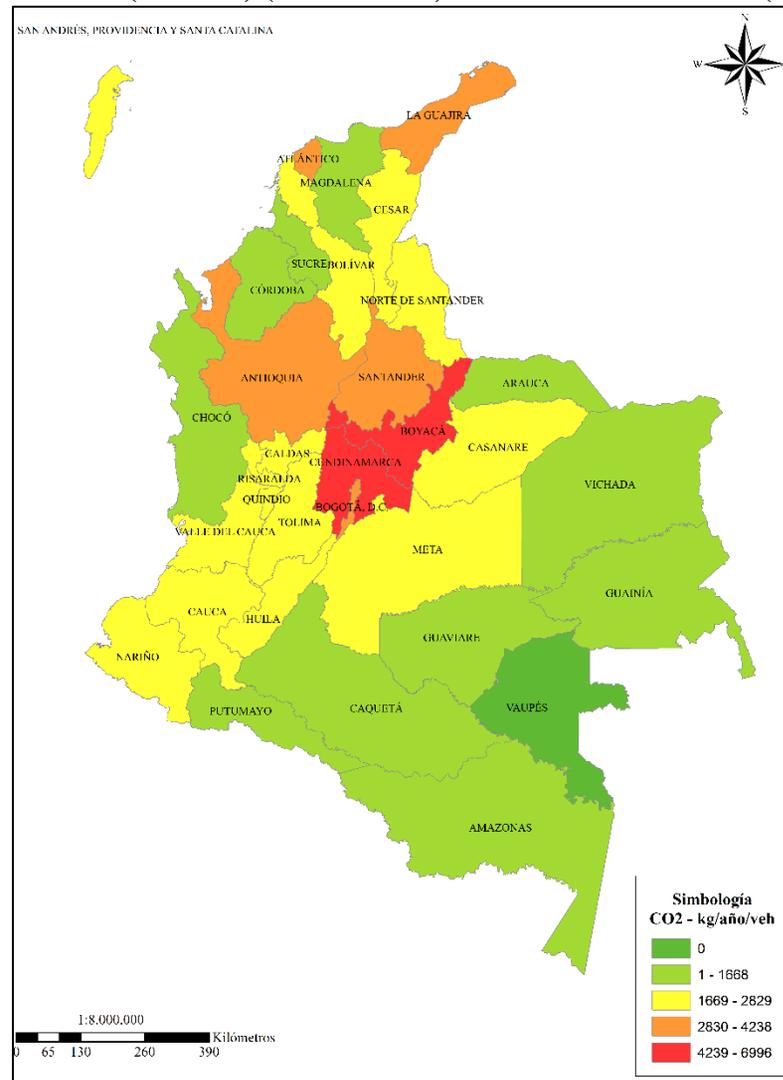
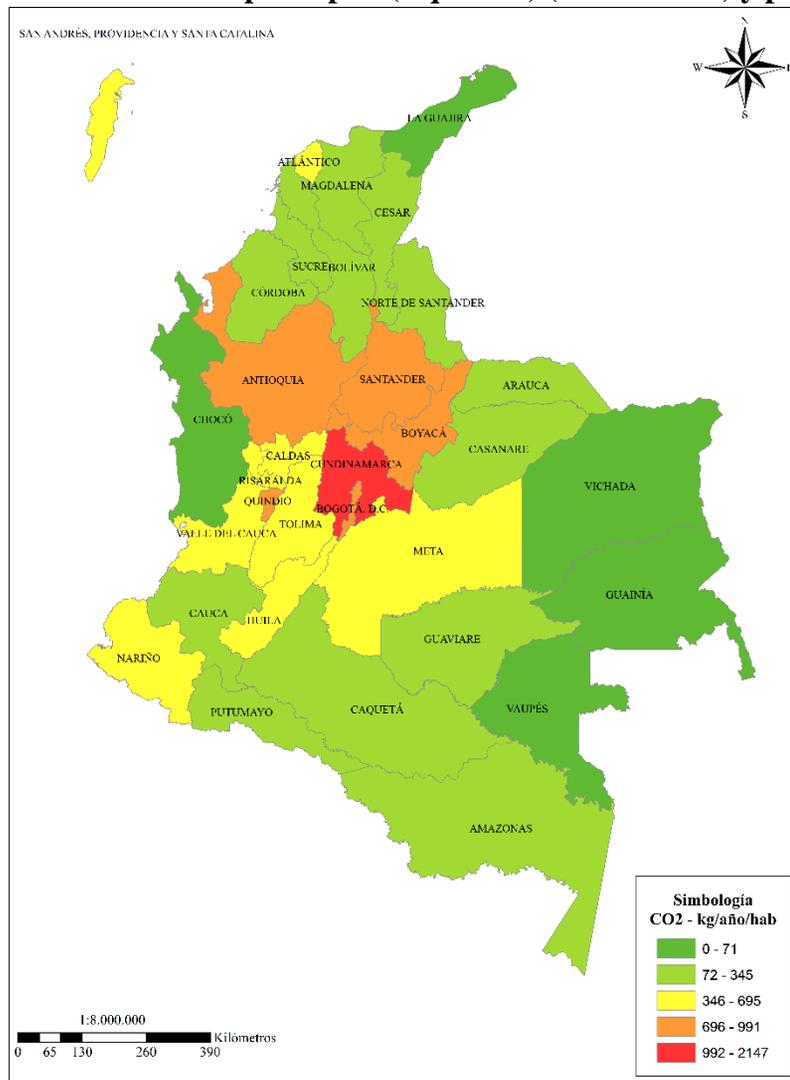
Fuente. Elaboración propia

Anexo E. Emisiones per cápita (izquierda) (ton/año-hab) y por vehículo (derecha) (ton/año-veh) de monóxido de carbono (CO)



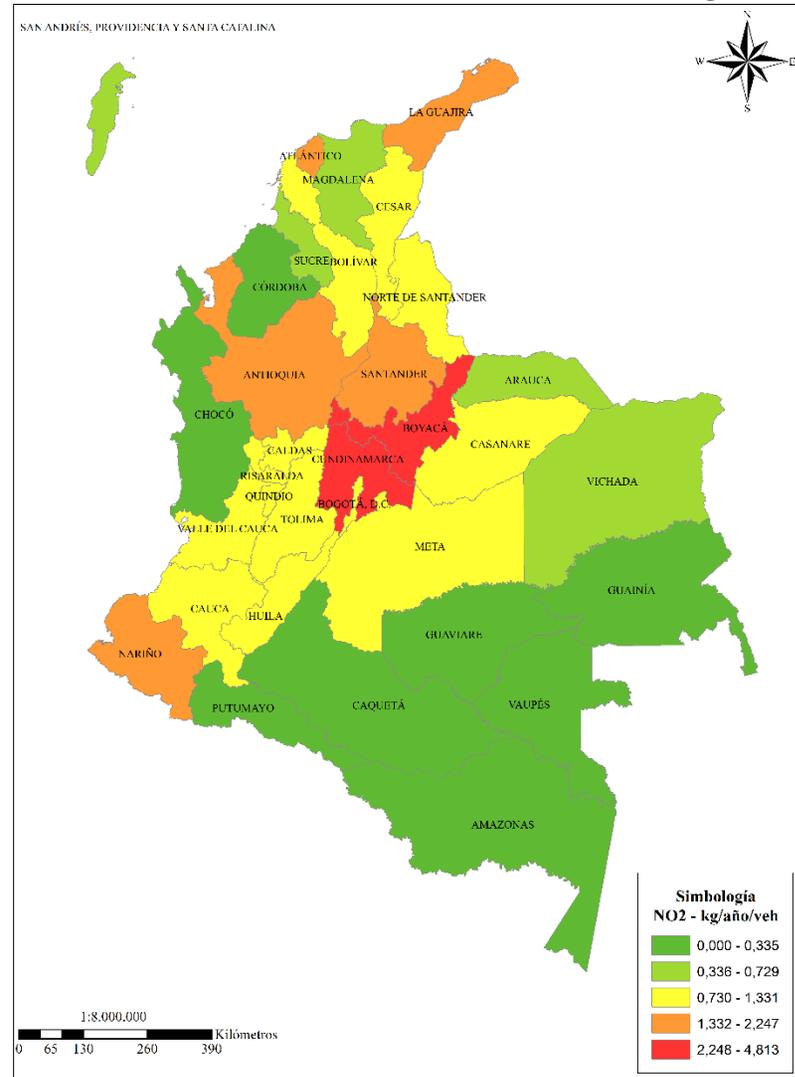
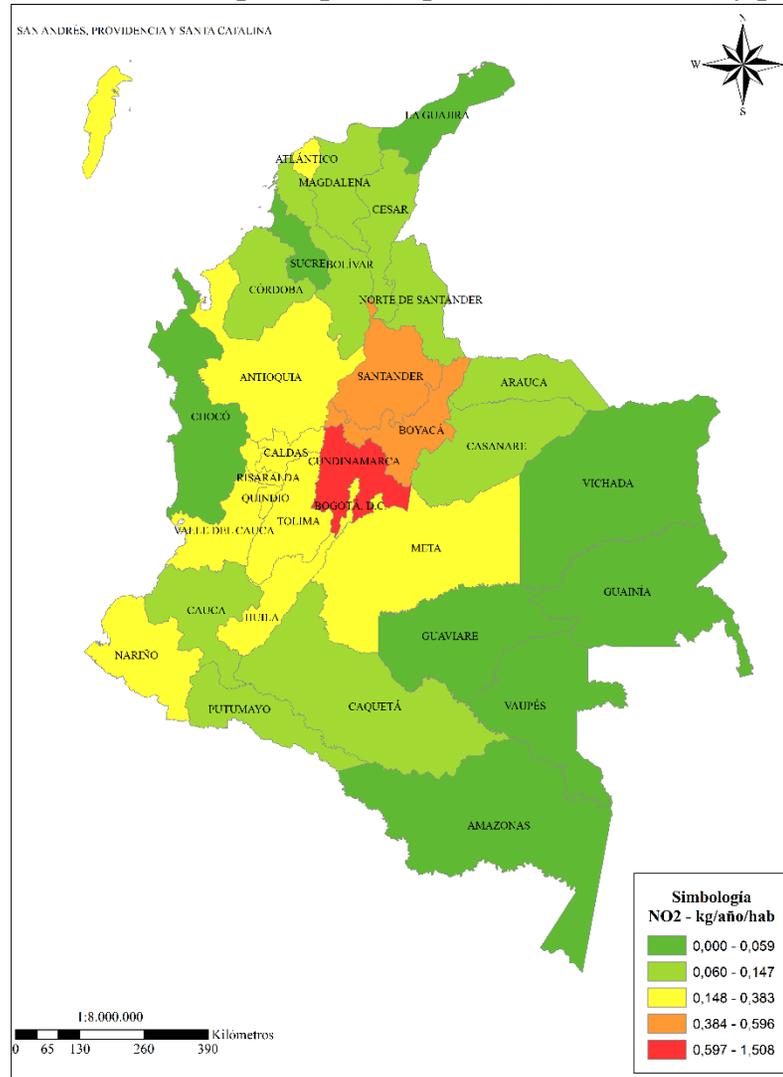
Fuente. Elaboración propia

Anexo E. Emisiones per cápita (izquierda) (ton/año-hab) y por vehículo (derecha) (ton/año-veh) de dióxido de carbono (CO₂)



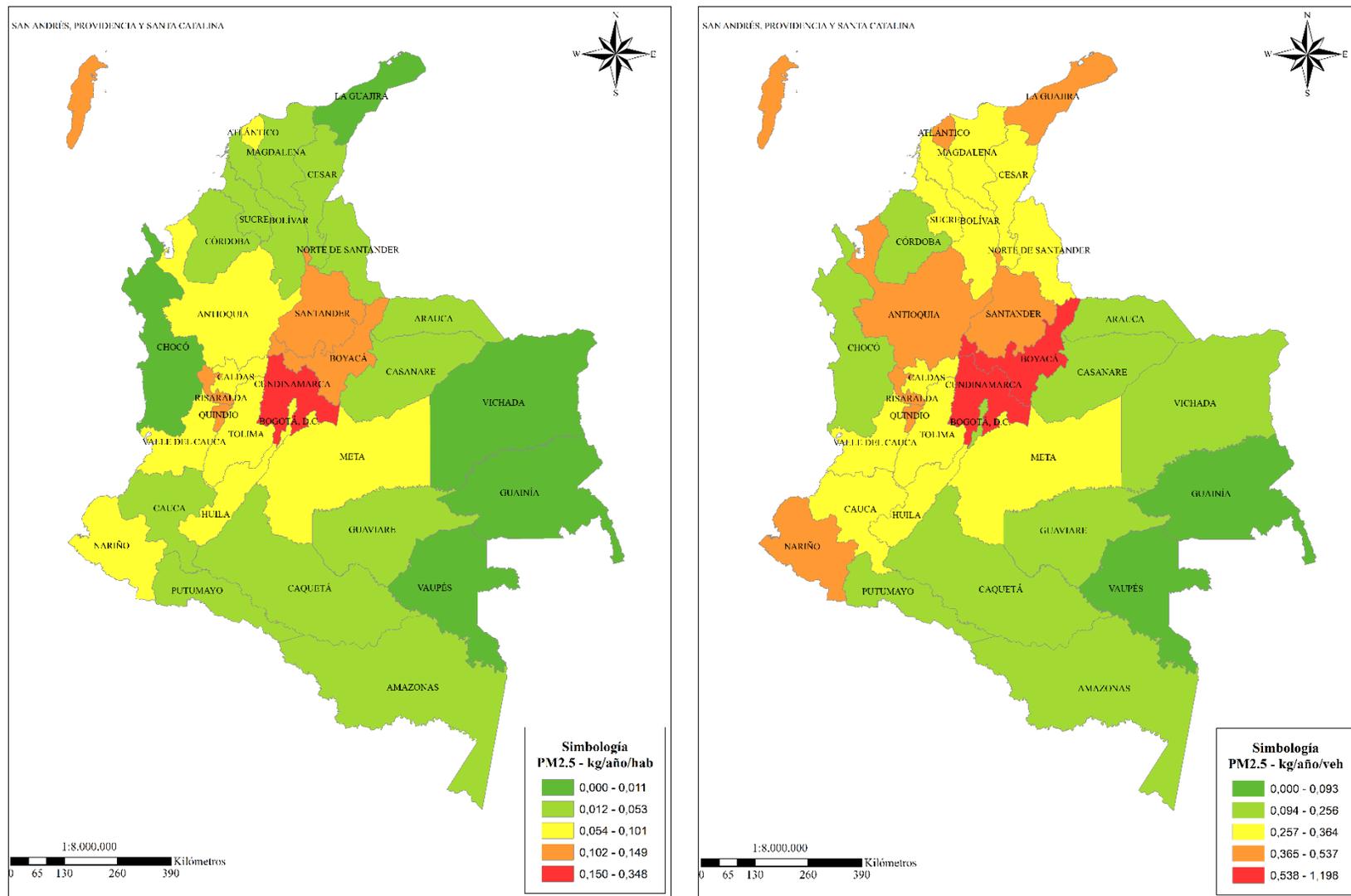
Fuente. Elaboración propia

Anexo E. Emisiones per cápita (izquierda) (ton/año-hab) y por vehículo (derecha) (ton/año-veh) de dióxido de nitrógeno (NO₂)



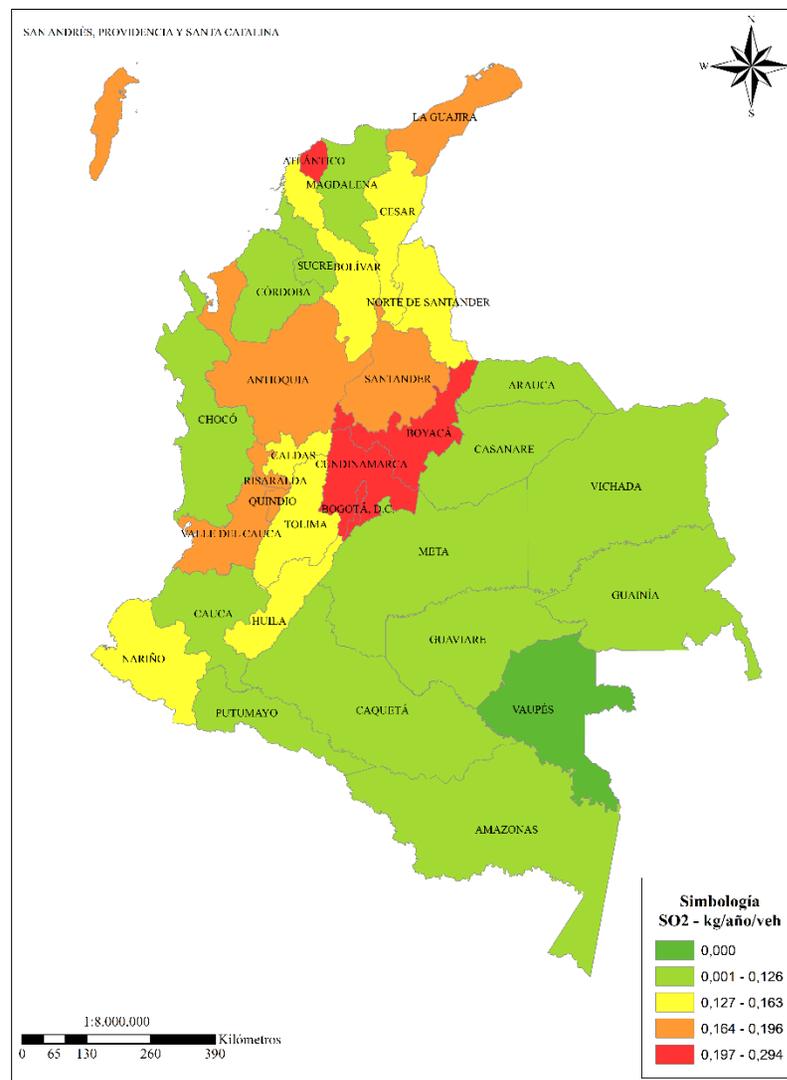
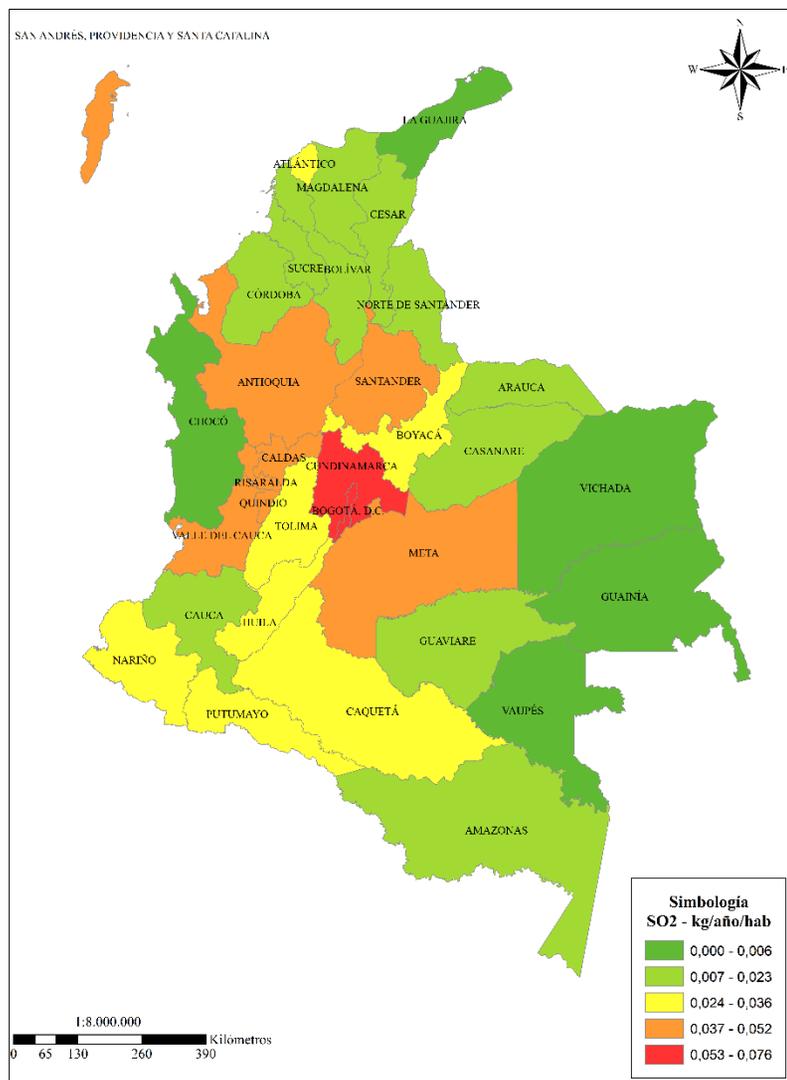
Fuente. Elaboración propia

Anexo E. Emisiones per cápita (izquierda) (ton/año-hab) y por vehículo (derecha) (ton/año-veh) de material particulado fino (PM_{2.5})



Fuente. Elaboración propia

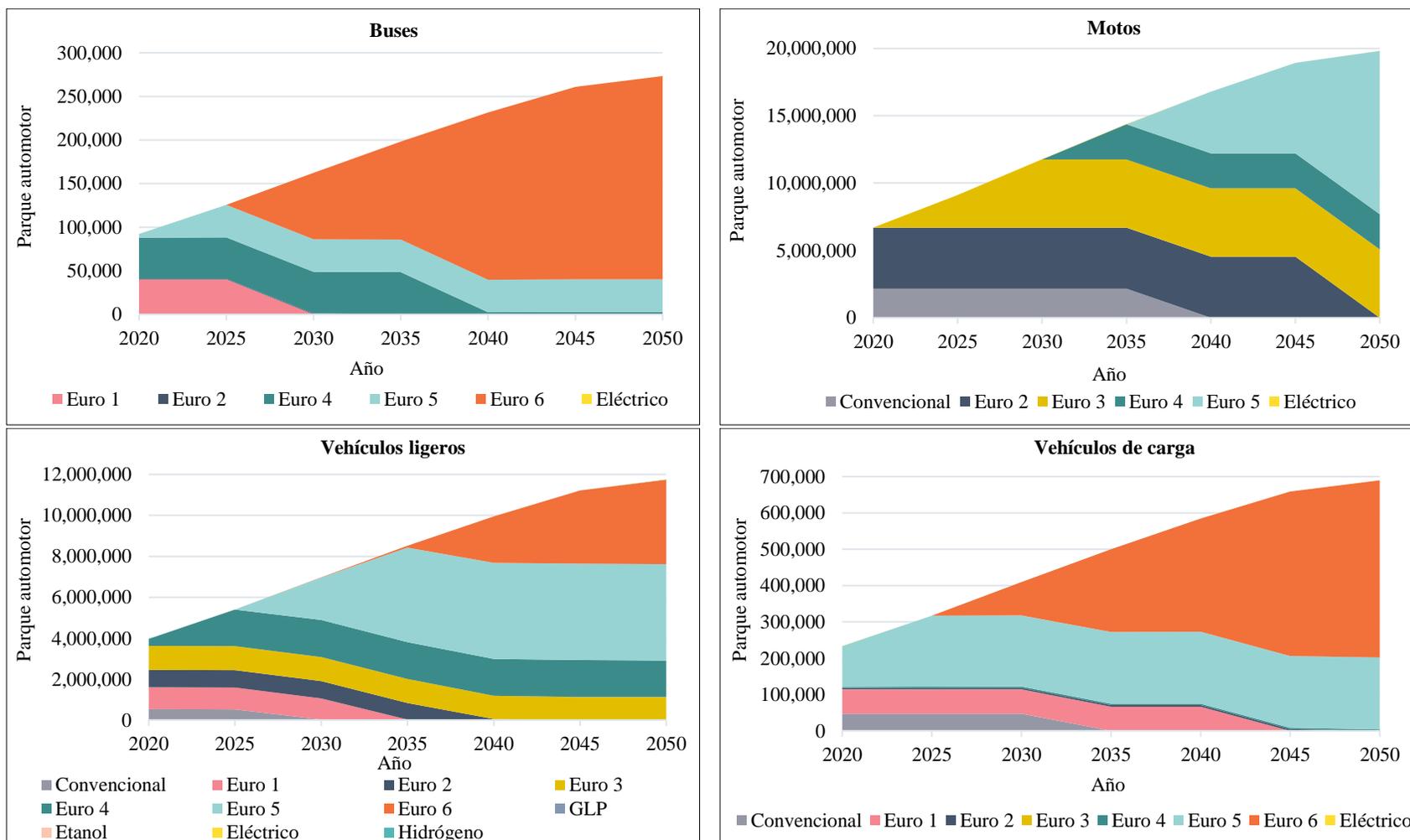
Anexo E. Emisiones per cápita (izquierda) (ton/año-hab) y por vehículo (derecha) (ton/año-veh) de dióxido de azufre (SO₂)



Fuente. Elaboración propia

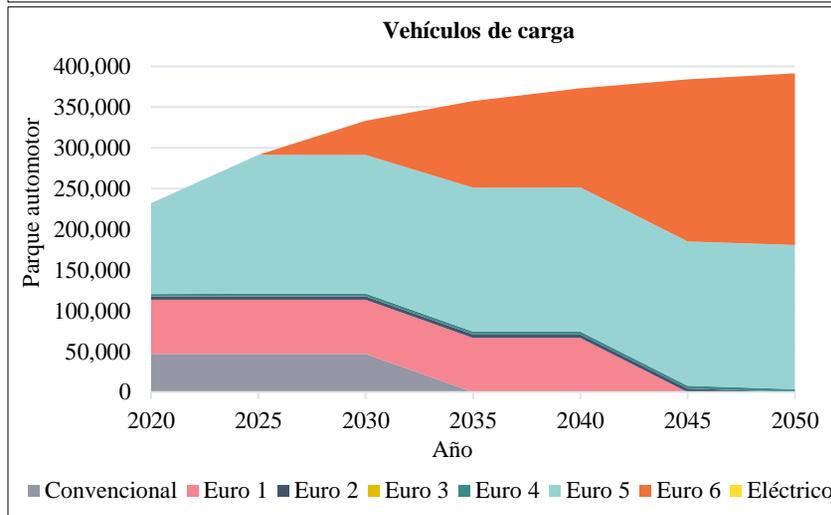
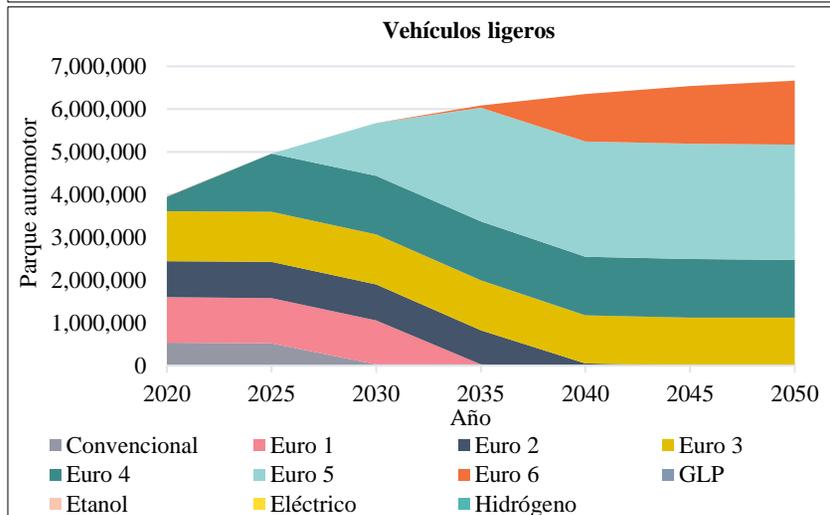
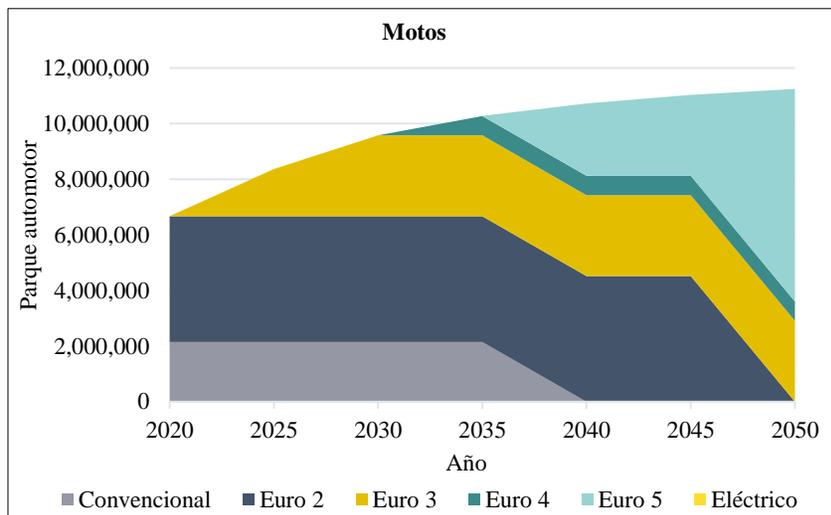
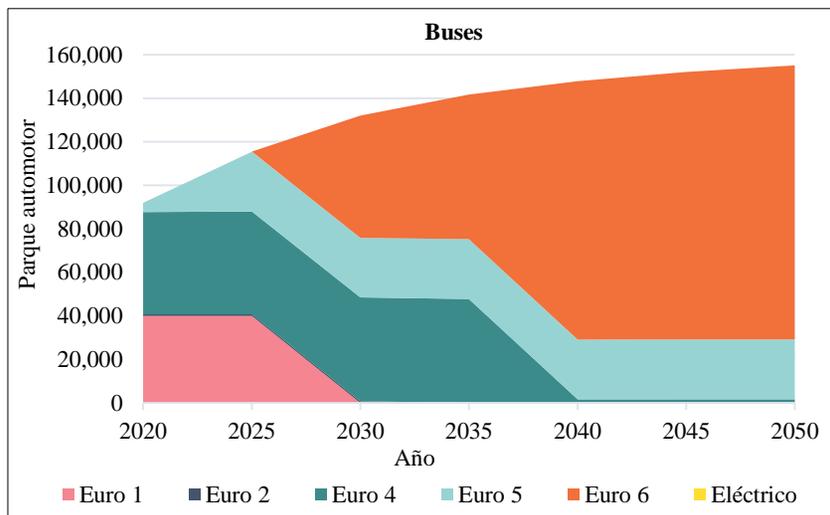
F. Anexo: Ascenso tecnológico vehicular a 2050

Anexo F. Ascenso tecnológico escenario BAU



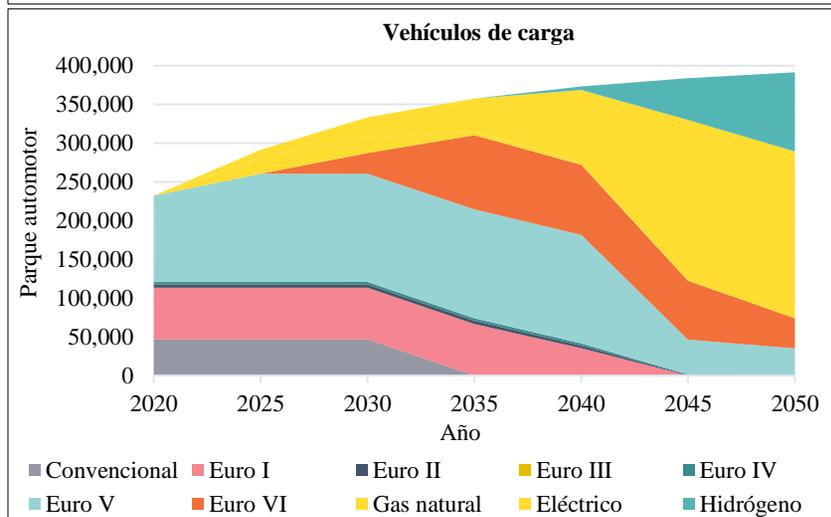
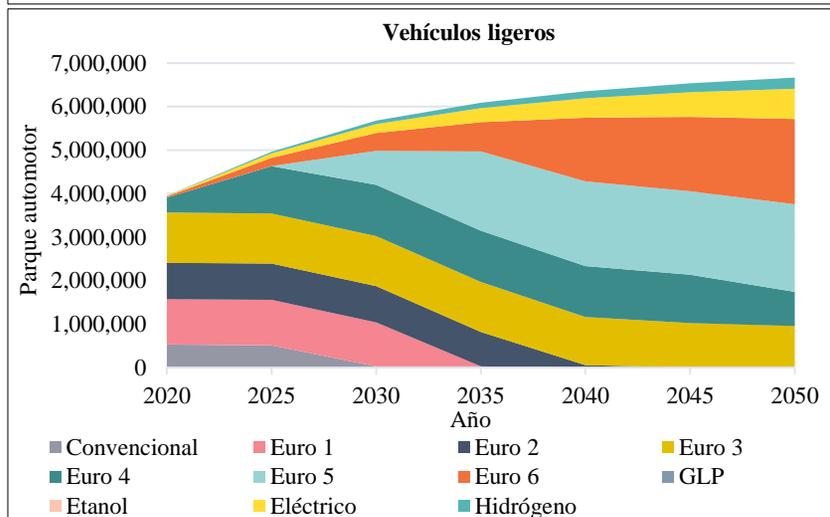
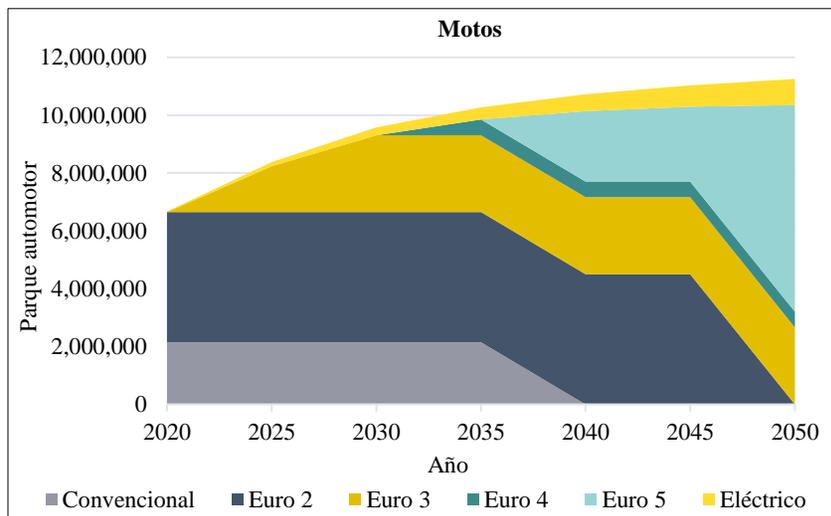
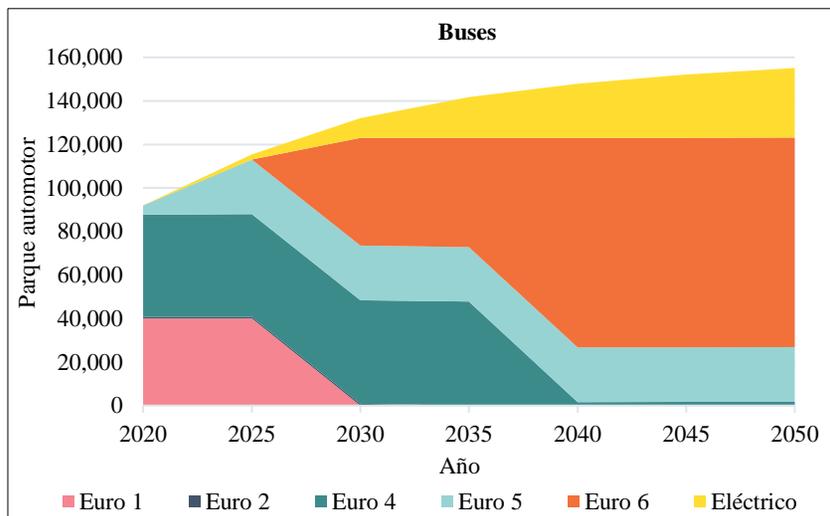
Fuente. Elaboración propia

Anexo F. Ascenso tecnológico escenario A: Apuesta por reducción de vehículos



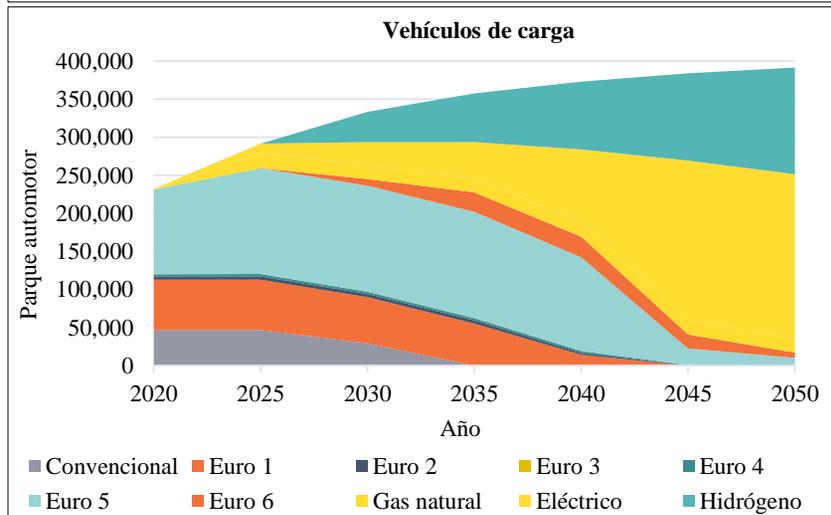
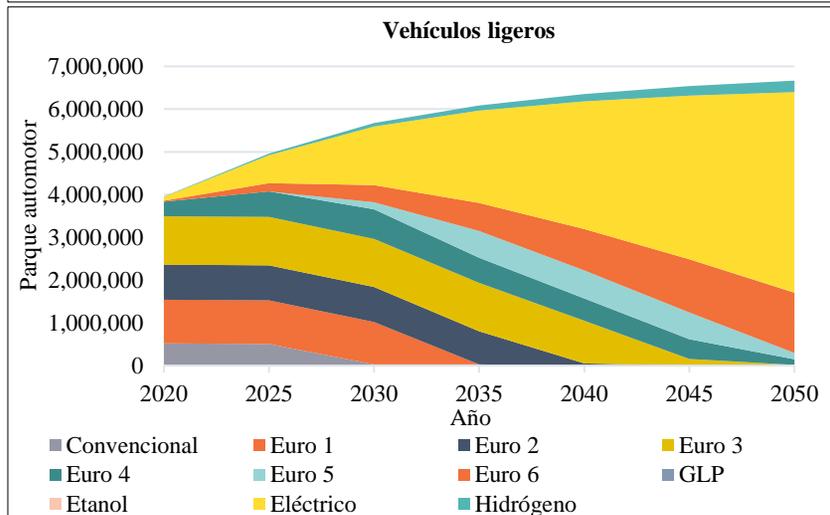
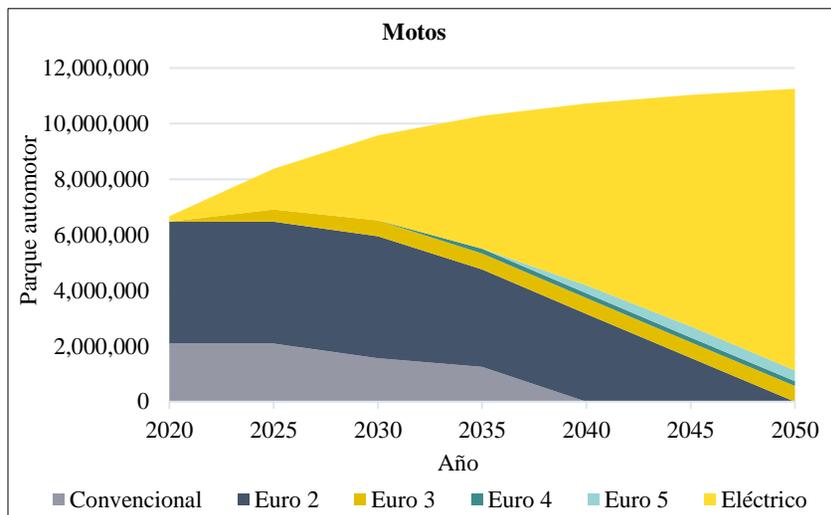
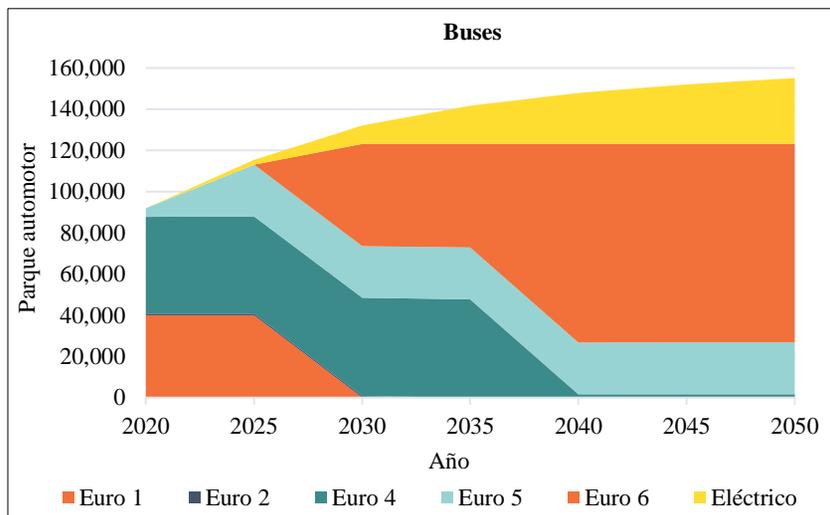
Fuente. Elaboración propia

Anexo F. Ascenso tecnológico escenario B: Apuesta por tecnologías limpias



Fuente. Elaboración propia

Anexo F. Ascenso tecnológico escenario C: Gran apuesta



Fuente. Elaboración propia