



## INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DEL VALLE DE ABURRÁ FUENTES MÓVILES, AÑO 2022

Noviembre 2023



Futuro sostenible

f t i y @areametropol  
www.metropol.gov.co

(57-4) 385 60 00

Carrera 53 N° 40A - 31  
Medellín-Antioquia Colombia

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN .....	4
2	METODOLOGÍA.....	5
2.1	FUENTES DE INFORMACIÓN .....	6
3	DATOS DE ENTRADA.....	8
3.1	CARACTERIZACIÓN DEL PARQUE AUTOMOTOR .....	10
3.2	PERFILES DE ANTIGÜEDAD.....	13
3.3	DISTANCIA ANUAL RECORRIDA.....	15
3.4	FACTORES DE EMISIÓN .....	16
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	18
4.1	EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO .....	20
4.2	EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO .....	27
5	CONCLUSIONES .....	30
6	REFERENCIAS .....	32

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Algoritmos de cálculo empleados por LEAP para la estimación de las emisiones .....	5
Tabla 2. Fuentes de información empleadas en la actualización del inventario .....	7
Tabla 3. Tipo de caracterización del parque automotor usada en el modelo LEAP .....	8
Tabla 4. Distribución porcentual del parque automotor para el año 2022.....	12
Tabla 5. Factores de emisión para CO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> .....	17
Tabla 6. Demanda energética del parque automotor en el Valle de Aburrá por categoría vehicular para el año 2022 en Terajoule (TJ).....	20
Tabla 7. Emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular en toneladas (t), año 2022. ....	21
Tabla 8. Emisiones de contaminantes criterio por combustible en toneladas (t), año 2022.....	26
Tabla 9. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por categoría vehicular en toneladas (t), año 2022 .....	27
Tabla 10. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por combustible en toneladas (t), año 2022 .....	27

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura del árbol de categorías de LEAP .....	9
Figura 2. Vehículos registrados en el Valle de Aburrá para el año 2022.....	10
Figura 3. Perfiles de antigüedad por categoría vehicular del parque automotor registrado en el Valle de Aburrá.....	14
Figura 4. Kilómetros anuales promedio recorridos en el Valle de Aburrá por categoría vehicular.....	16
Figura 5. Composición del parque automotor del valle de Aburrá, año 2022.....	18
Figura 6 Balance energético real vs estimado, año 2022.....	19
Figura 7. Distribución porcentual de emisiones de SO <sub>x</sub> por categoría vehicular, año 2022.....	23
Figura 8. Distribución porcentual de emisiones de PM <sub>2.5</sub> por categoría vehicular, año 2022.....	23
Figura 9. Distribución porcentual de emisiones de NO <sub>x</sub> por categoría vehicular, año 2022.....	24
Figura 10. Distribución porcentual de emisiones de COV por categoría vehicular, año 2022.....	24
Figura 11. Distribución porcentual de emisiones de CO por categoría vehicular, año 2022.....	25
Figura 12. Evolución de las emisiones de contaminantes criterio, años 2018 -2022.....	25
Figura 13 Distribución porcentual de emisiones de contaminantes criterio por combustible, año 2022.....	26
Figura 14. Distribución porcentual de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por categoría vehicular, año 2022.....	28
Figura 15. Distribución porcentual de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por combustible, año 2022.....	29

## 1 INTRODUCCIÓN

En virtud del contrato CPS-2023-9897 cuyo objeto es *“apoyar, desde su perfil profesional, en el desarrollo de las actividades relacionadas con la gestión del fomento a la producción más limpia que desarrolla la subdirección ambiental del Área Metropolitana del Valle de Aburrá”*, se presenta el siguiente informe. Este documento da cumplimiento a la actividad *“actualización del inventario de fuentes móviles a partir de la información disponible”*.

La actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles del Valle de Aburrá se realizó para el año base 2022, empleando una metodología bottom-up que consiste en calcular las emisiones de los contaminantes atmosféricos a partir de datos puntuales de fuentes específicas, de manera que se requiere un alto nivel de detalle de la información.

La Entidad ha empleado desde el año 2011 el software LEAP (Low Emissions Analysis Platform) como herramienta para la elaboración de los inventarios de fuentes móviles dada su capacidad para integrar en un modelo energético diversas variables que inciden en las emisiones del sector como el consumo y rendimiento del combustible, caracterización de la flota vehicular, distancias recorridas, políticas de transporte, patrones de viaje, entre otras.

A continuación, se presenta la metodología, los datos de entrada del modelo y los resultados de las emisiones estimadas para contaminantes criterio ( $PM_{2.5}$ ,  $SO_x$ ,  $COV$ ,  $NO_x$  y  $CO$ ) y gases de efecto invernadero ( $CO_2$ ,  $CH_4$  y  $N_2O$ ). Las emisiones reportadas corresponden a las generadas durante el proceso de combustión.



## 2 METODOLOGÍA

Desde 2011, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá ha utilizado el modelo LEAP (Low Emissions Analysis Platform) desarrollado por el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, como herramienta para estimar las emisiones generadas por las fuentes móviles en el Valle de Aburrá. (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2019)

En la siguiente tabla se detallan los algoritmos empleados por el modelo.

Tabla 1. Algoritmos de cálculo empleados por LEAP para la estimación de las emisiones

Ecuaciones generales	
Ecuación general para la estimación de emisiones para cualquier contaminante <b>p</b>	$\text{Emission}_{t,y,v,p} = \sum (\text{Stock}_{t,y,v} \times \text{Mileage}_{t,y,v} \times \text{EmissionFactor}_{t,v,p} \times \text{EmDegradation}_{t,y-v,p})$ <p><i>p</i>: es cualquier contaminante PM<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, COV etc.  <i>t</i>: es el tipo de vehículo,  <i>v</i>: es el modelo del vehículo,  <i>y</i>: es el año calendario</p>
Ecuación de cantidad de vehículos y la rotación de las existencias	$\text{Stock}_{t,y,v} = \text{Sales}_{t,v} \times \text{Survival}_{t,y-v}$ <p><i>Stock</i>: es el número de vehículos existentes en un año en particular  <i>Sales</i>: es el número de vehículos que entran al parque automotor en un año en particular, puede calcularse con información sobre las ventas históricas,  <i>Survival</i>: la fracción de vehículos que sobreviven después de un determinado número de años.</p>
Rendimiento del combustible por tipo de vehículo.	$\text{FuelEconomy}_{t,y,v} = \text{FuelEconomy}_{t,y} \times \text{FeDegradation}_{t,y-v}$ <p><i>FuelEconomy</i>: es el combustible utilizado por unidad de distancia recorrida por el vehículo,  <i>FeDegradation</i>: es un factor que representa el cambio en el rendimiento de combustible a medida que el vehículo envejece.  Es igual a 1 cuando <i>y=v</i>.</p>

Ecuaciones generales	
Factor de Emisión: cantidad de contaminante <b>p</b> que emite por cada kilómetro recorrido por tipo de vehículo tipo <b>t</b> y modelo <b>v</b>	<p><i>EmissionFactor</i>:</p> <p>International Vehicle emisión Factor (IVE) (e.g. gramos/kilómetro) de un vehículo nuevo de modelo <b>v</b>.</p> <p>Factores de emisión locales (FEVA I y II) EMEP-EEA</p>
Factor de degradación que representa el cambio en el factor de emisión del contaminante <b>p</b> a medida que el vehículo envejece, el vehículo tipo <b>t</b> y modelo <b>v</b> .	$V(t) = V(t - 1) \times \exp(t \times constant)$ <p><i>t</i>: es la edad del vehículo en años. <i>V</i>: es el valor de la variable que se degrada, en este caso el kilometraje anual. <i>Constant(c)</i>: es un valor constante que se ajusta de acuerdo con los datos reales.</p>
Emisión contaminantes criterio y GEI)	$Emission_{t,y,v,p} = EnergyConsumption_{t,y,v} \times EmissionFactor_{t,v,p} \times EmDegradation_{t,y-v,p}$
Consumo de energía	$EnergyConsumption_{t,y,v} = Stock_{t,y,v} \times Mileage_{t,y,v} \times FuelEconomy_{t,y,v}$
Distancia recorrida	$Mileage_{t,y,v} = Mileage_{t,y} \times MiDegradation_{t,y-v}$ <p><i>Mileage</i>: es la distancia anual recorrida por el vehículo. <i>MiDegradation</i>: es un factor que representa el cambio en el kilometraje a medida que el vehículo envejece. Es igual a 1 cuando <math>y=v</math></p>

Fuente: (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2019), *Low Emissions Analysis Platform (LEAP)*. (Stockholm Environment Institute, 2020)

## 2.1 FUENTES DE INFORMACIÓN

Las fuentes de información utilizadas para la elaboración del inventario se muestran a continuación.

Tabla 2. Fuentes de información empleadas en la actualización del inventario

Variables	Información	Fuente
Caracterización vehicular	Vehículos registrados: Autos, Taxis, Autos Servicio Especial, Buses, Buses Servicio Especial, Camiones, Motos 2T, Motos 4T, Metroplús, Tractocamiones, Volquetas	Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT), Secretarías de movilidad, tránsito y transporte, AMVA.
Consumo de combustible	Ventas de combustible en el Valle de Aburrá (Gasolina, Diésel, GNV)	Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME).
Contaminantes estimados y Factores de emisión (FE)	VOC, CO, SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> , PM <sub>2.5</sub> , N <sub>2</sub> O, CO <sub>2</sub> , y CH <sub>4</sub>	International Vehicle Emissions (IVE) ajustados y factores de emisión locales establecidos en los estudios FEVA I <sup>1</sup> y FEVA II <sup>2</sup> . Factores de emisión de la Unión europea EMEP/EEA Para CO <sub>2</sub> y SO <sub>x</sub> los FE se calculan por balance de masa.
Distancias recorridas anuales	Kilómetros promedio anuales por categoría	Centros de Diagnóstico Automotor (CDA). Consulta en páginas de ventas de vehículos. Consultas con expertos de los gremios. Resolución 901 de 2019.
Calidad del combustible	Contenido de azufre en los combustibles	ECOPETROL

<sup>1</sup> Articulación Universidad-Empresa-Estado para establecer los factores de emisión reales de vehículos livianos y motocicletas en el Valle de Aburrá (FEVA-I)" (Convenio 1096 de 2016 entre el AMVA y la Universidad de Antioquia).

<sup>2</sup> Articulación Universidad-Empresa-Estado para establecer los factores de emisión reales de vehículos pesados en el Valle de Aburrá (FEVA-II)" (Convenio 888 de 2017 entre el AMVA y la Universidad de Antioquia).



### 3 DATOS DE ENTRADA

Se realizó la recopilación de los datos, ejecutando los procedimientos necesarios para asignarles la estructura y formatos requeridos por el modelo. En la siguiente tabla se especifica la caracterización empleada de acuerdo con la clase, el tamaño asociado al cilindraje y el combustible.

Se utilizó la clasificación por categoría establecida en la actualización del inventario correspondiente al año base 2018, y en algunos casos como volquetas y tractocamiones se incluyó el gas natural como combustible.

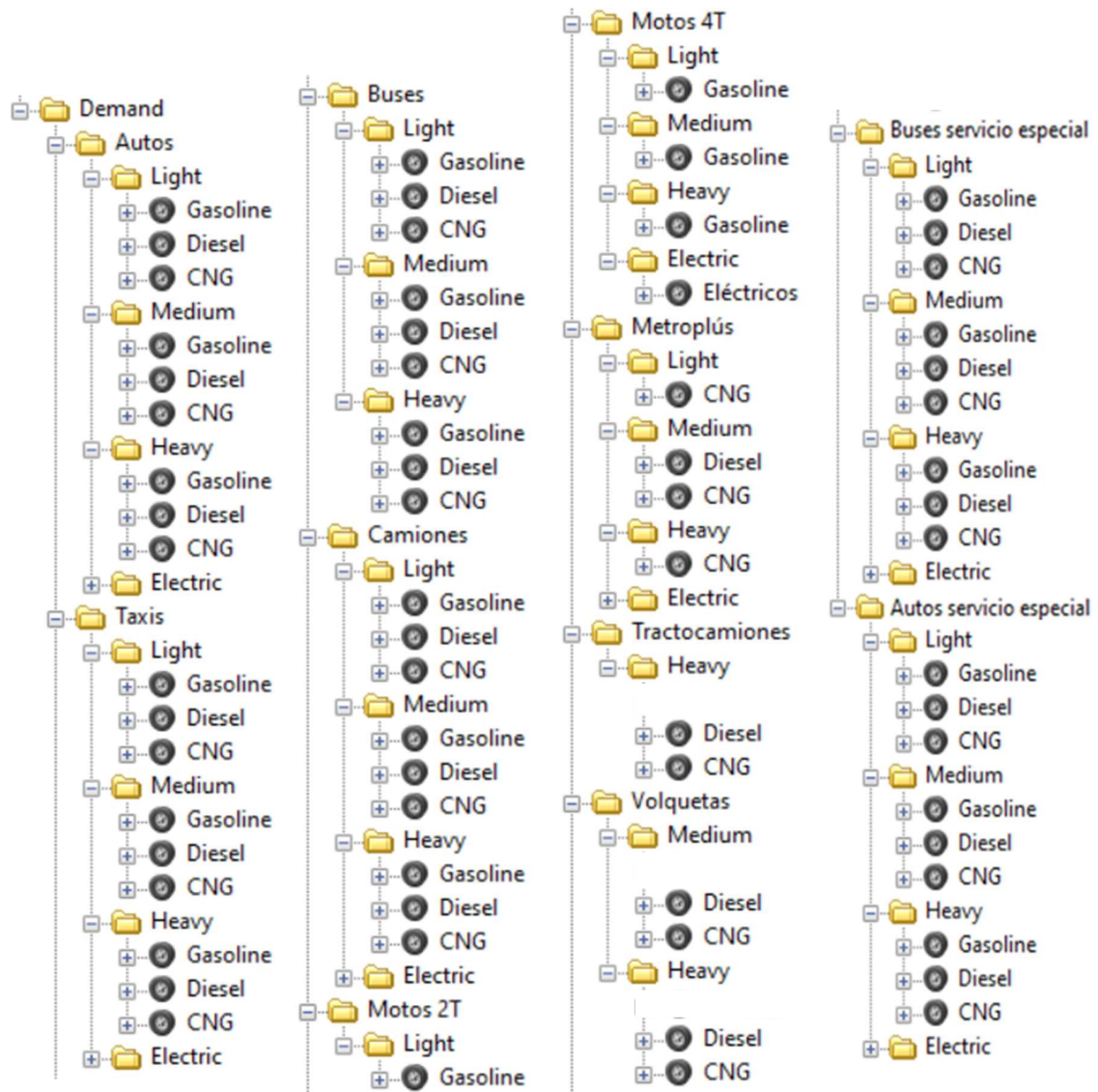
Tabla 3. Tipo de caracterización del parque automotor usada en el modelo LEAP

Clase o tipo de vehículo	Tamaño (cilindraje en centímetros cúbicos - cc.)	Tipo de combustible
Autos	Ligeros (cc ≤ 1500)	Gasolina Diésel Gas natural vehicular (GNV)
Taxis	Medianos (1500 < cc ≤ 3000)	
Autos servicio especial	Pesados (cc > 3000)	
Motos 2T	Ligeras (cc ≤ 100)	
Motos 4T	Medianas (100 < cc ≤ 300)	
Buses	Pesadas (cc > 300)	
Buses servicio especial	Livianos (cc ≤ 3000) Medianos (3000 < cc ≤ 6000) Pesados (cc > 6000)	
Camiones		
Metroplús		
Tractocamiones		
Volquetas		

La clasificación del parque automotor según la Tabla 3 permite asignar a cada nivel las variables descritas en la Tabla 1, tales como kilometraje, factores de emisión y rendimiento del combustible.

Los registros clasificados se visualizan en el modelo LEAP con la estructura que se presenta en la Figura 1.

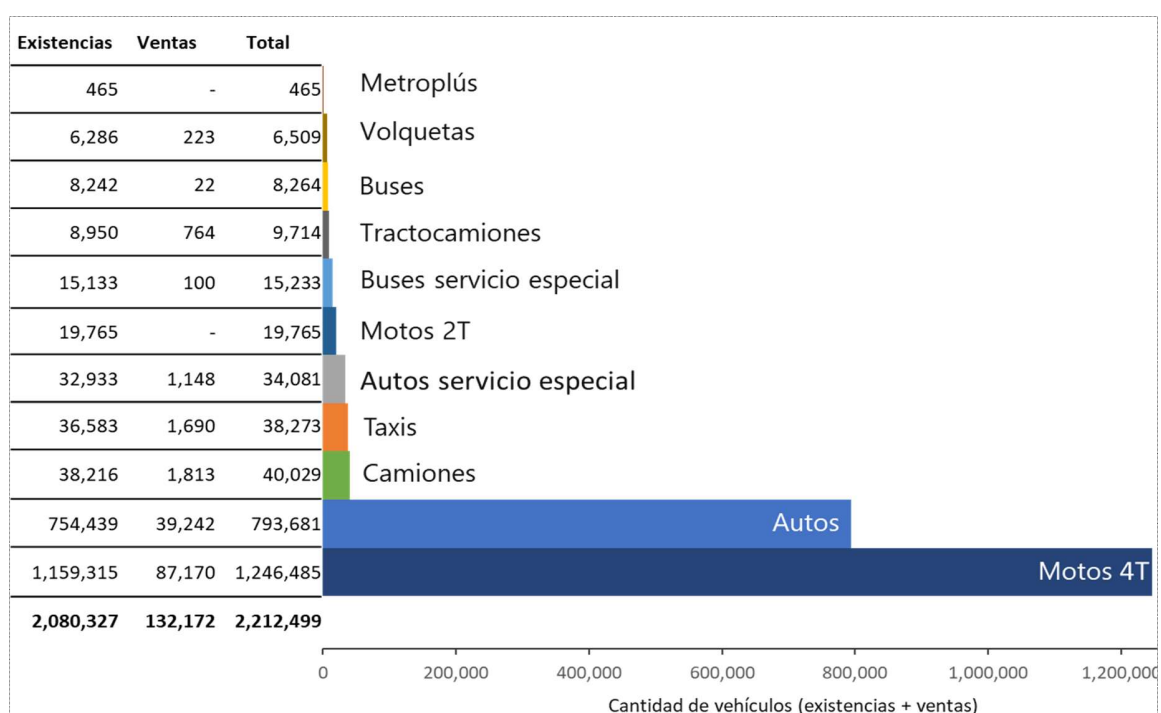
Figura 1. Estructura del árbol de categorías de LEAP



### 3.1 CARACTERIZACIÓN DEL PARQUE AUTOMOTOR

Los datos obtenidos a través del RUNT y bases de datos complementarias, permitieron categorizar el parque automotor de acuerdo con las tablas previamente mostradas, siguiendo la distinción entre registros de “existencias” y “ventas”. En este proceso, los vehículos que se matricularon en el año 2022 se clasifican como ventas, mientras que los demás se consideran existencias. En la Figura 2 se representa gráficamente lo descrito anteriormente.

Figura 2. Vehículos registrados en el Valle de Aburrá para el año 2022.



Contar con la base de datos de RUNT representó un significativo avance en la calidad, confiabilidad y organización de los datos. Cabe destacar que se asume que los vehículos activos registrados en el RUNT, y por consiguiente en las secretarías de tránsito, están

circulando en el Valle de Aburrá. Aunque esta suposición posee cierto grado de incertidumbre, constituye la información más precisa disponible.

Es importante señalar que, además de los vehículos registrados en el Valle de Aburrá que no circulan en la región, también hay vehículos de otros municipios circulando en el Valle. Esta dinámica podría compensar las posibles disparidades presentes en los datos.

La metodología de cálculo requiere que se especifiquen los porcentajes relativos al tamaño y al tipo de combustible utilizados para cada categoría vehicular. La desagregación detallada se muestra en la siguiente tabla (Tabla 4). Los porcentajes en **negrita** indican la representatividad de cada categoría en el total del parque automotor, mientras que los porcentajes en *cursiva* indican los porcentajes dentro de una misma categoría en función del tamaño y el combustible.

La distribución por tamaño y combustible en cada categoría mantiene una tendencia muy similar a la observada en el año 2018. No obstante, se resaltan las siguientes modificaciones: se ha incrementado la participación del gas natural y el modo eléctrico en la categoría de autos, así como en la de taxis, donde se registró una disminución en el número de vehículos a diésel, atribuida a una mejora en la calidad de los datos. Se incorporaron tractocamiones y volquetas a gas natural, mientras que descendió tanto el porcentaje como la cantidad de camiones que funcionan con este combustible. Los vehículos catalogados como híbridos se asignaron a la categoría eléctrico y aquellos que utilizan gas-gasolina se clasificaron bajo la categoría gas.

En el Anexo 1 se presenta la base datos y la distribución porcentual por categorías.

Tabla 4. Distribución porcentual del parque automotor para el año 2022

Clase			Existencias		Ventas	
<b>Autos</b>			<b>36.3%</b>	<b>29.7%</b>		
Ligeros			39.2%	47.4%		
	Gasolina		99.2%	99.8%		
	Diésel		0.2%	0%		
	GNV		0.6%	0.2%		
Medianos			55.4%	48.5%		
	Gasolina		88.7%	85.6%		
	Diésel		9.9%	14.3%		
	GNV		1.4%	0.1%		
Pesados			5.4%	3.4%		
	Gasolina		88.2%	90.8%		
	Diésel		7.8%	9.0%		
	GNV		3.9%	0.2%		
Eléctrico			0.09%	0.75%		
	Eléctrico		100%	100%		
<b>Taxis</b>			<b>1.8%</b>	<b>1.3%</b>		
Ligeros			96.2%	98.3%		
	Gasolina		98.2%	100%		
	Diésel		0.02%	0%		
	GNV		1.8%	0%		
Medianos			3.7%	1.7%		
	Gasolina		89.1%	85.7%		
	Diésel		7.2%	14.3%		
	GNV		3.7%	0%		
Pesados			0.132%	0%		
	Gasolina		45.5%	0%		
	Diésel		54.5%	0%		
	GNV		0%	0%		
Eléctrico			0.05%	0%		
	Eléctrico		100.0%	100.0%		
<b>Buses</b>			<b>0.40%</b>	<b>0.02%</b>		
Livianos			6.07%	0%		
	Gasolina		16.4%	0%		
	Diésel		81.6%	0%		
	GNV		2.0%	0%		
Medianos			90.4%	100%		
	Gasolina		1.8%	0%		
	Diésel		98.1%	100%		
	GNV		0.1%	0%		
Pesados			3.6%	0%		
	Gasolina		10.2%	0%		
	Diésel		84.0%	0%		
	GNV		5.8%	0%		
<b>Camiones</b>			<b>1.8%</b>	<b>1.4%</b>		
Livianos			16.1%	17.8%		
	Gasolina		11.5%	0%		
	Diésel		87.9%	100%		
	GNV		0.6%	0%		
Medianos			61.1%	49.1%		
	Gasolina		19.9%	0%		
	Diésel		79.1%	99.8%		
	GNV		1.0%	0.2%		
Pesados			22.4%	26.2%		
	Gasolina		9.4%	0.0%		
	Diésel		89.7%	89.5%		
	GNV		0.9%	10.5%		
Eléctrico			0.49%	6.89%		
	Eléctrico		100%	100%		
<b>Motos 2T</b>			<b>1.0%</b>	<b>0%</b>		
Ligeros			100%	0%		
	Gasolina		100.0%	100.0%		
<b>Motos 4T</b>			<b>55.7%</b>	<b>66.0%</b>		
Ligeros			23.8%	5.4%		
	Gasolina		100%	100%		
Medianos			72.9%	89.6%		
	Gasolina		100%	100%		
Pesados			3.0%	4.4%		
	Gasolina		100.0%	100%		
	Eléctrico		0.2%	0.6%		
	Eléctrico		100%	100%		
<b>Metroplús</b>			<b>0.02%</b>	<b>0%</b>		
Livianos			23.2%	0%		
	GNV		100.0%	100%		
Medianos			55.7%	0%		
	Diésel		25.1%	0%		
	GNV		74.9%	0%		
Pesados			16.6%	0%		
	GNV		100.0%	0%		
	Eléctrico		4.5%	0%		
	Eléctrico		100%	100%		
<b>Tractocamión</b>			<b>0.4%</b>	<b>0.6%</b>		
	Pesados		100%	100%		
	Diésel		99.2%	95.3%		
	GNV		0.8%	4.7%		
<b>Volquetas</b>			<b>0.3%</b>	<b>0.2%</b>		
	Medianos		24.7%	8.5%		
	Diésel		99.5%	100%		
	GNV		0.5%	0%		
	Pesados		75.3%	91.5%		
	Diésel		99.8%	99.5%		
	GNV		0.2%	0.5%		
<b>Autos servicio especial</b>			<b>1.6%</b>	<b>0.9%</b>		
	Ligeros		40.5%	29.3%		
	Gasolina		98.0%	99.4%		
	Diésel		0.4%	0%		
	GNV		1.6%	0.6%		
	Medianos		53.1%	67.2%		
	Gasolina		40.8%	26.8%		
	Diésel		55.1%	72.9%		
	GNV		4.1%	0.4%		
	Pesados		5.9%	1.9%		
	Gasolina		60.4%	10.6%		
	Diésel		38.2%	89.4%		
	GNV		1.4%	0.0%		
	Eléctrico		0.47%	1.53%		
	Eléctrico		100%	100%		
<b>Buses servicio especial</b>			<b>0.7%</b>	<b>0.1%</b>		
	Livianos		43.4%	39.0%		
	Gasolina		30.2%	0.0%		
	Diésel		67.6%	100%		
	GNV		2.2%	0.0%		
	Medianos		46.3%	57.0%		
	Gasolina		30.4%	0.0%		
	Diésel		69.3%	100.0%		
	GNV		0.3%	0.0%		
	Pesados		9.9%	3.0%		
	Gasolina		19.6%	0.0%		
	Diésel		79.9%	100.0%		
	GNV		0.6%	0.0%		
	Eléctrico		0.3%	1.0%		
	Eléctrico		100%	100%		

### 3.2 PERFILES DE ANTIGÜEDAD

Los perfiles de antigüedad se relacionan con el ascenso tecnológico del parque automotor y son útiles para comprender el envejecimiento de los vehículos, lo que puede ser fundamental en la toma de decisiones relacionadas con la gestión de la flota y planificación de políticas para reducir emisiones.

Se construyeron 68 perfiles basados en la clase, el cilindraje y el combustible para alimentar el modelo. En la Figura 3 se agruparon los perfiles de ciclo de vida por categoría para ilustrar la distribución etaria de la flota matriculada en el Valle de Aburrá.

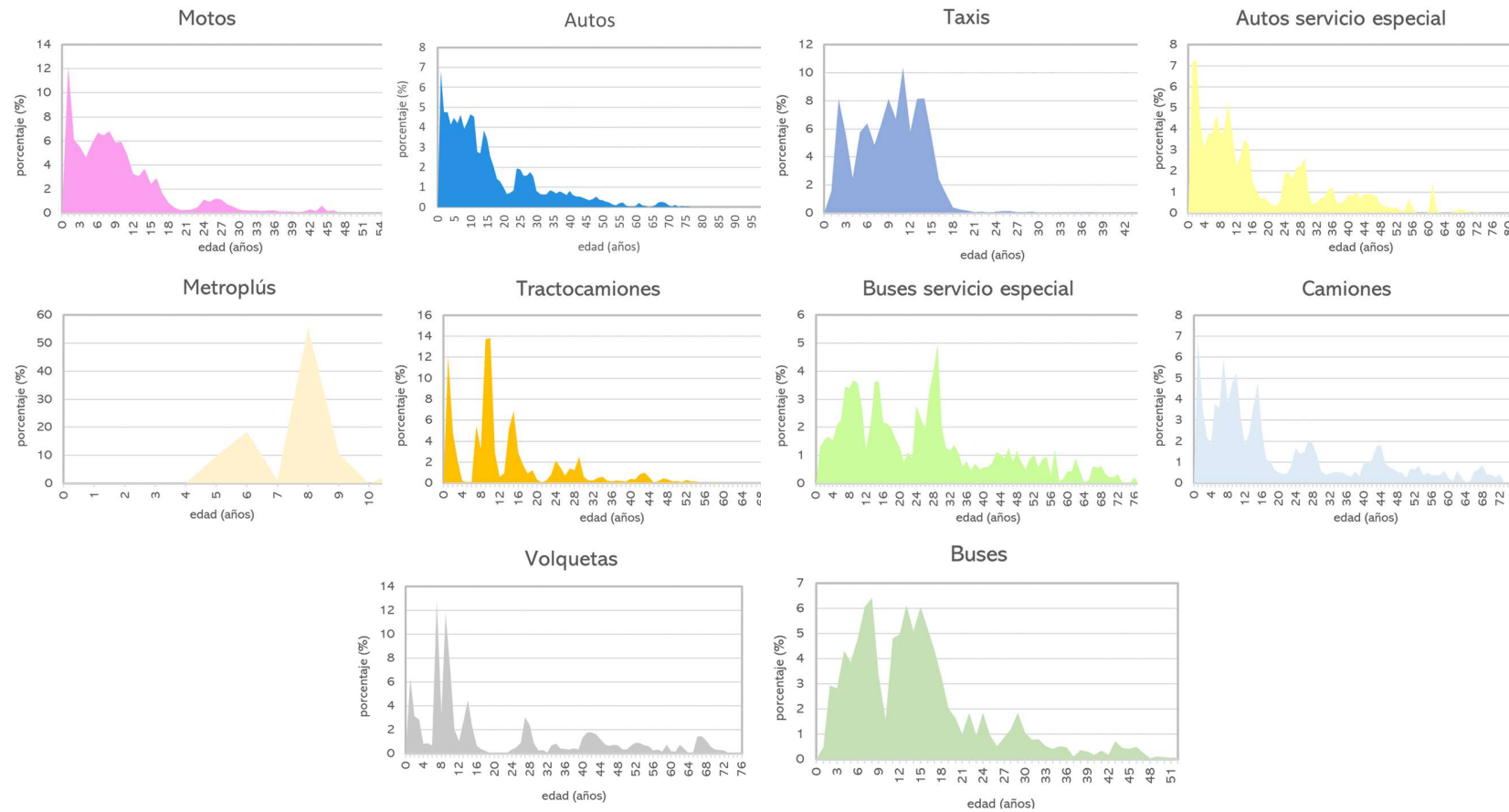
Más del 50% de la flota en las categorías de autos, motos, taxis y autos de servicio especial tienen menos de 11 años, mientras que la proporción de vehículos antiguos, con más de 20 años, es inferior al 10% para motos y taxis, al 20% para autos y al 33% para autos de servicio especial. Estos datos sugieren que las categorías motos, taxis y autos experimentan una constante renovación.

Los vehículos del sistema Metroplús tienen una antigüedad menor a 11 años.

En las demás categorías, a pesar de la presencia de vehículos con modelos recientes que incorporan nuevas tecnologías, persiste la circulación de modelos más antiguos. Este comportamiento es especialmente notable en categorías como volquetas y camiones, donde más del 30% de la flota corresponde a vehículos con más de 20 años de antigüedad.

En el Anexo 2 se presentan los perfiles de antigüedad para cada categoría ingresados al modelo LEAP.

Figura 3. Perfiles de antigüedad por categoría vehicular del parque automotor registrado en el Valle de Aburrá



### 3.3 DISTANCIA ANUAL RECORRIDA

Se establece un valor inicial para la distancia anual promedio recorrida por categoría, la cual se define como VKT (por sus siglas en inglés, Vehicle Kilometer Travelled). Para definir estas distancias o kilometrajes se partió de los datos y análisis realizados en la actualización del inventario de emisiones año base 2018 y se complementó y ajustó con información disponible de los CDAs (Centros de Diagnóstico Automotor), mediante el suministro de información por parte del equipo de vigilancia a fuentes móviles de la Entidad). También se tuvo en cuenta la consulta en páginas web de venta de vehículos, revisión de datos de la resolución 901 de 2019 dirigida al transporte de carga y datos suministrados directamente por la Secretaría de Movilidad del Medellín y la Subdirección de Transporte del AMVA. Se llevaron a cabo reuniones con representantes de algunos gremios del transporte de carga, público y especial con el propósito de validar la información y solicitar conceptos.

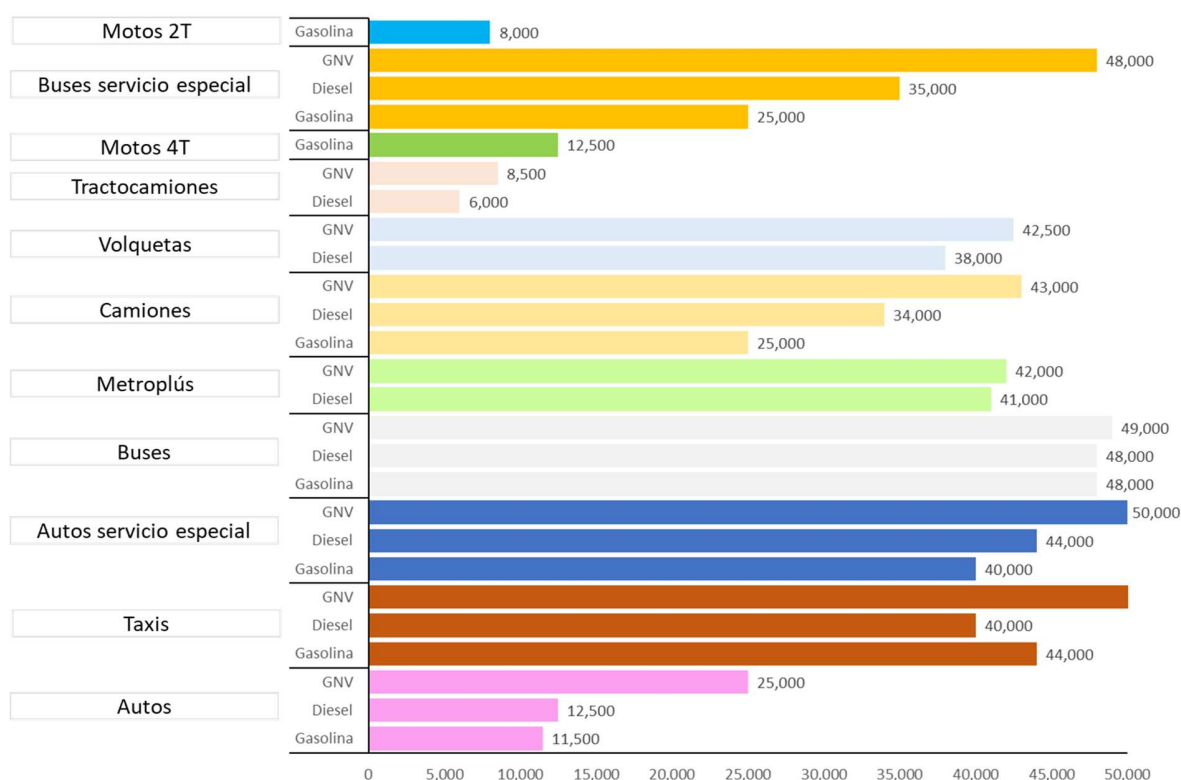
Como resultado de la búsqueda y revisión de la información se observó que en términos generales se presentó una ligera reducción de los kilómetros recorridos durante el año 2022 en comparación con el 2018. Esta situación se atribuye a diversos factores, entre ellos, el incremento en la congestión debido al aumento en el número de vehículos, la ampliación en la oferta de servicios y cambios en la prestación del servicio público individual. En cuanto al transporte de carga (logístico) podría estar experimentando un cambio en la dinámica, orientándose hacia estrategias que involucran un mayor número de vehículos para atender trayectos de menor longitud.

En la configuración del modelo LEAP, se ha diseñado un perfil de degradación para la variable kilometraje. Este perfil ocasiona que el valor anual de los kilómetros disminuya a medida que el vehículo envejece, partiendo de los datos de la Figura 4 como valor inicial o semilla. (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2012).

En el Anexo 3 se presenta la base datos de los CDA y la información complementaria que se empleó para definir los kilómetros recorridos.



Figura 4. Kilómetros anuales promedio recorridos en el Valle de Aburrá por categoría vehicular.



### 3.4 FACTORES DE EMISIÓN

Desde la primera versión del inventario de fuentes móviles en 2011, se han empleado principalmente factores de emisión provenientes del modelo IVE (International Vehicle Emissions). Esta base de datos incorpora factores altamente específicos en relación con las tecnologías vehiculares. Para su aplicación se corrigen a condiciones locales de altura, humedad y calidad del combustible. (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2013).

Como se mencionó anteriormente, la elección se basa en la tecnología vehicular, y en nuestro caso, se vincula el contenido de azufre en los combustibles como un factor determinante en la introducción de tecnologías más avanzadas en el país.

En esta actualización del inventario se adicionó una nueva tecnología para las motos 4T a partir del 2021 siguiendo lo señalado en la Ley 1972 de 2019 que estableció que “a partir del 1° de enero de 2021 todas las motocicletas que se fabriquen ensamblen o importen al país deben cumplir con los límites máximos permisibles de emisión de contaminantes al aire correspondientes a tecnologías Euro 3” (Congreso de la República de Colombia, 2019). Los factores de emisión para esta nueva tecnología se tomaron de la base de datos de la Agencia Europea del Medio Ambiente (European Environment Agency, 2021).

Adicionalmente, es importante destacar que desde 2018 se incorporaron los factores de emisión locales para PM<sub>2.5</sub>, CO y NO<sub>x</sub>, los cuales fueron obtenidos durante la ejecución del proyecto FEVA I para motos 4T y autos a gasolina y FEVA II para buses y camiones diésel. El ajuste se implementó en los perfiles de degradación de los factores de emisión en los modelos específicos de las categorías medidas. (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2019).

Los factores de emisión para los contaminantes CO<sub>2</sub> y SO<sub>x</sub> se obtienen mediante un balance de masa, utilizando datos específicos de la composición y características de los combustibles. En este enfoque se asume la conversión completa del carbono y el azufre. La siguiente tabla muestra los valores obtenidos.

Tabla 5. Factores de emisión para CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>

Combustible	Contenido de carbono (%)*	Contenido de azufre (ppm)**	PCI (MJ/kg)*	Factor de emisión (kg/TJ)	
				CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
Gasolina	86.5	44	45.02	70,401.6	1.95
Diesel	86.4	11	43.98	71,983.1	0.50
Gas natural vehicular	73.0	0.1	47.12	56,766.2	0.00424

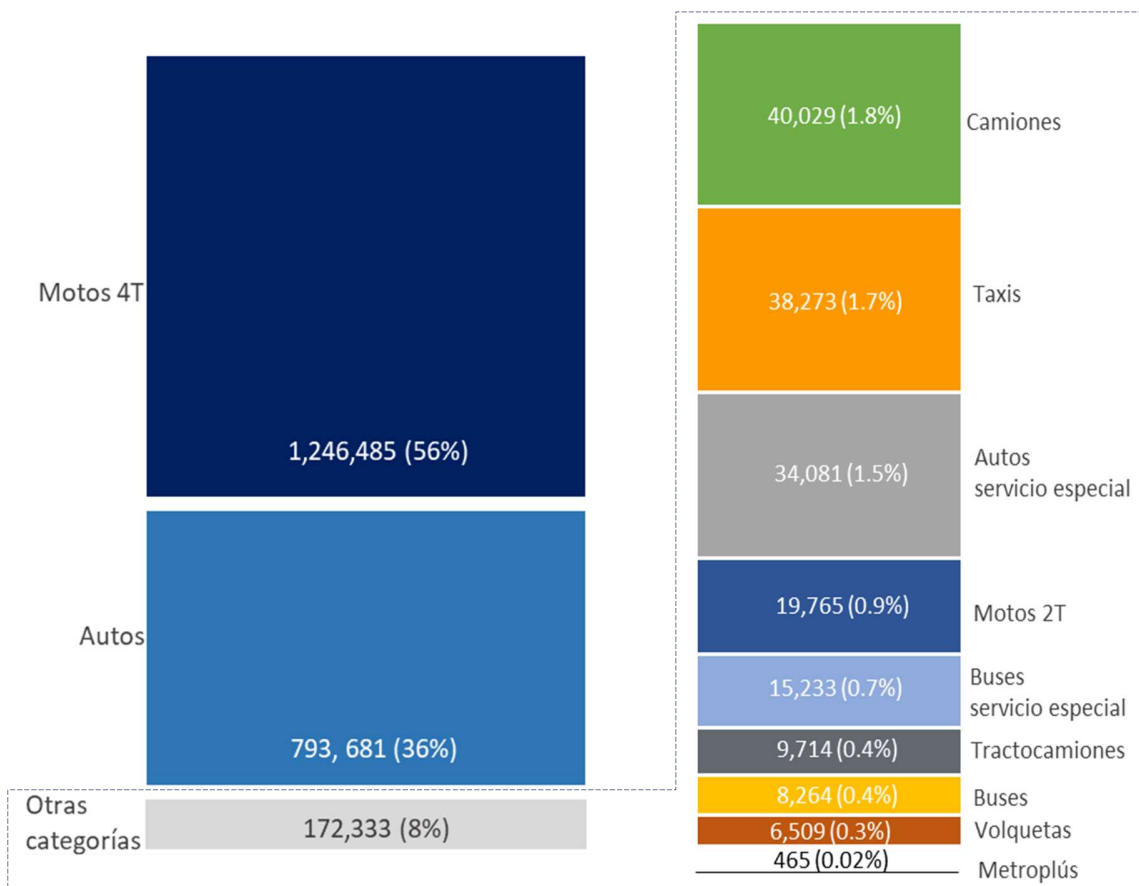
\*Unidad de Planeación Minero Energética, \*\*ECOPETROL

Los factores de emisión completos por categoría se especifican en el Anexo 4.

## 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

En la siguiente figura se detalla la composición del parque automotor del Valle de Aburrá con la respectiva distribución porcentual

Figura 5. Composición del parque automotor del valle de Aburrá, año 2022.



El parque automotor del Valle de Aburrá está compuesto por 2,212,499 vehículos. De los cuales el 80% son motos 4T (1,246,485) y autos (793,681). Solo las motos son más de la mitad de todo el parque automotor registrado.

Las denominadas otras categorías corresponden al 8% del total y se distribuyen: 40,029 camiones, 38,273 taxis, 34,081 autos de servicio especial, 19,765 motos 2T, 15,233 buses servicio especial, 9,714 tractocamiones, 8,264 buses, 6,509 volquetas y 465 buses del sistema Metroplús.

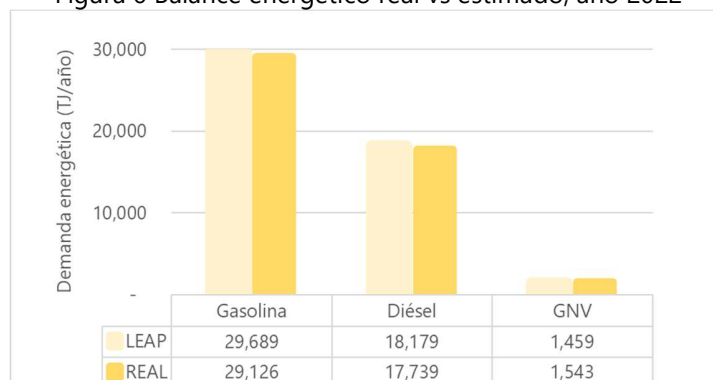
El número de motos 2T ha permanecido constante desde que se estableció en 19,765 en la actualización del inventario del año 2015. No se dispone de información que permita actualizar esta cifra, sin embargo, los datos de actividad asociados a esta categoría son bajos ya que las motos 2T desempeñan un papel secundario en la movilidad de la región, particularmente en términos de emisiones.

La demanda energética indica la cantidad de energía que se requiere para alimentar los diferentes modos de transporte en función del consumo de combustible. Como se mencionó previamente, se cuenta con los datos sobre ventas de diésel, gasolina y gas natural vehicular en el Valle de Aburrá para 2022, los cuales fueron proporcionados por la UPME.

El modelo, con los datos suministrados efectúa un balance de energía y estima la demanda energética por tipo de combustible, la cual se compara con los datos previamente procesados de la UPME. En este punto, es necesario calibrar el modelo para que la demanda estimada no supere el 5% del valor absoluto de la demanda real. Este procedimiento implica ajustar los kilómetros anuales recorridos asignados a distintas categorías, con el objetivo de aproximarse más a la realidad.

La Figura 6 ilustra la validación del modelo LEAP al comparar el balance energético simulado con el real. El error relativo se estimó en 3%.

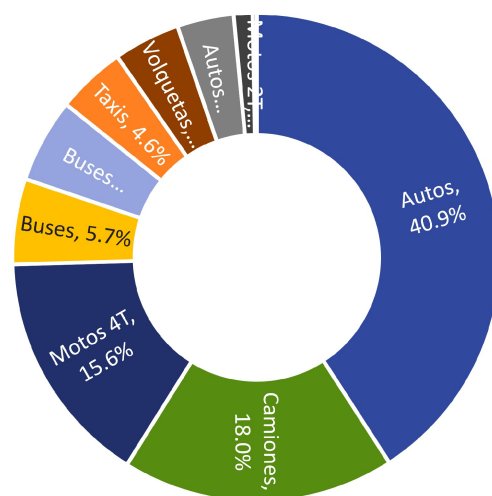
Figura 6 Balance energético real vs estimado, año 2022



La Tabla 6 muestra la demanda energética estimada por categoría vehicular.

Tabla 6. Demanda energética del parque automotor en el Valle de Aburrá por categoría vehicular para el año 2022 en Terajoule (TJ)

Clase	Demanda energética (TJ/año)				
	Gasolina	Diésel	GNV	Total	%
Autos	17,701.89	1,375.04	1,076.88	20,153.82	40.9%
Camiones	658.79	8,150.06	92.76	8,901.60	18.0%
Motos 4T	7,710.98	-	-	7,710.98	15.6%
Buses	50.43	2,735.09	11.45	2,796.97	5.7%
Buses servicio especial	501.04	2,203.02	33.37	2,737.44	5.5%
Taxis	2,215.42	3.95	40.30	2,259.66	4.6%
Volquetas	-	2,165.07	3.37	2,168.45	4.4%
Autos servicio especial	850.51	926.97	77.32	1,854.81	3.8%
Tractocamiones	-	599.77	8.72	608.49	1.2%
Metroplús	-	19.75	115.31	135.05	0.3%
Motos 2T	0.35	-	-	0.35	0.001%
<b>Total</b>	<b>29,689.42</b>	<b>18,178.72</b>	<b>1,459.48</b>	<b>49,327.62</b>	-



El consumo energético más elevado está vinculado principalmente a los autos, seguidos de los camiones y las motos 4T. Estas tres categorías destacan por tener el mayor número de vehículos registrados. En el caso de la gasolina, los autos, motos y taxis presentan los consumos más significativos; en el diésel, los camiones, buses y buses de servicio especial, mientras que, en el gas natural, son los autos y los camiones quienes lideran en términos de consumo energético.

#### 4.1 EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO

A continuación, se presentan las emisiones de contaminantes criterio generadas por las fuentes móviles estimadas para el año base 2022 en el Valle de Aburrá.

Tabla 7. Emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular en toneladas (t), año 2022.

Categoría vehicular	Emisiones (t/año)				
	CO	SO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>	COV
Camiones	373,085.80	5.36	1,281.27	6,514.72	19,078.68
Volquetas	2,320.24	1.08	894.29	1,332.60	286.39
Buses servicio especial	197,594.27	2.08	781.49	2,467.39	10,278.63
Buses	18,869.67	1.47	252.49	1,646.33	1,211.54
Motos 4T	32,384.15	15.04	117.29	1,481.49	3,056.19
Autos	98,687.41	35.21	100.27	2,925.97	2,612.10
Tractocamiones	381.01	0.30	68.42	353.06	59.81
Autos servicio especial	1,873.43	2.12	20.22	267.24	85.94
Taxis	661.07	4.32	2.63	155.01	72.29
Motos 2T	19.17	0.00	0.16	0.01	7.54
Metroplús	82.15	0.01	0.09	9.05	0.41
<b>Total</b>	<b>725,958.37</b>	<b>66.99</b>	<b>3,518.62</b>	<b>17,152.88</b>	<b>36,749.51</b>

Las emisiones generadas por las fuentes móviles durante el proceso de combustión para el año 2022, se estimaron en 725,958 t/año de CO, 67 t/año de SO<sub>x</sub>, 3,519 t/año de PM<sub>2.5</sub>, 17,153 t/año de NO<sub>x</sub> y 36,750 t/año de COV,

Los camiones lideran el aporte en las emisiones de CO, PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>x</sub> y COV, permaneciendo como una categoría principal. Estos resultados son los esperados teniendo en cuenta que, aunque ingresaron vehículos nuevos en los últimos cuatro años, aún permanecen camiones de más de 30 años de antigüedad cuyos factores de emisión son más altos.

Las emisiones de PM<sub>2.5</sub>, además de tener como principal aportante a los camiones, también se ven afectadas en gran medida por las volquetas y los buses de servicio especial. Esto se debe a que en estas categorías predomina el uso de diésel y un gran porcentaje de estos vehículos aún tienen tecnologías vehiculares inferiores a euro IV que no brindan un control eficiente de partículas. Entre los tres aportan el 84% de las emisiones de este contaminante.

La disminución del contenido de azufre en el diésel, y en particular en la gasolina, ha resultado en la reducción de las emisiones de SO<sub>x</sub> en comparación con el año 2018 (53%).

Como las emisiones de este contaminante depende el consumo de combustible y del contenido de azufre que es más elevado en la gasolina; los autos y las motos continúan siendo las principales fuentes contribuyentes a estas emisiones.

Los camiones, autos y buses de servicio especial tienen los mayores aportes a las emisiones de  $\text{NO}_x$  y CO con un 70% y 92% respectivamente. En cuanto a los COV, las motos también cumplen un papel significativo en el aporte. En términos generales, los vehículos a gasolina son los principales generadores de COV. En el caso específico de los buses de servicio especial y camiones a gasolina, aunque su presencia es limitada en número, el factor de emisión es notablemente elevado, lo que resulta en una contribución significativa a las emisiones totales de COV.

Las siguientes figuras detallan la distribución porcentual de los contaminantes criterio por categoría vehicular.

Figura 7. Distribución porcentual de emisiones de SO<sub>x</sub> por categoría vehicular, año 2022.

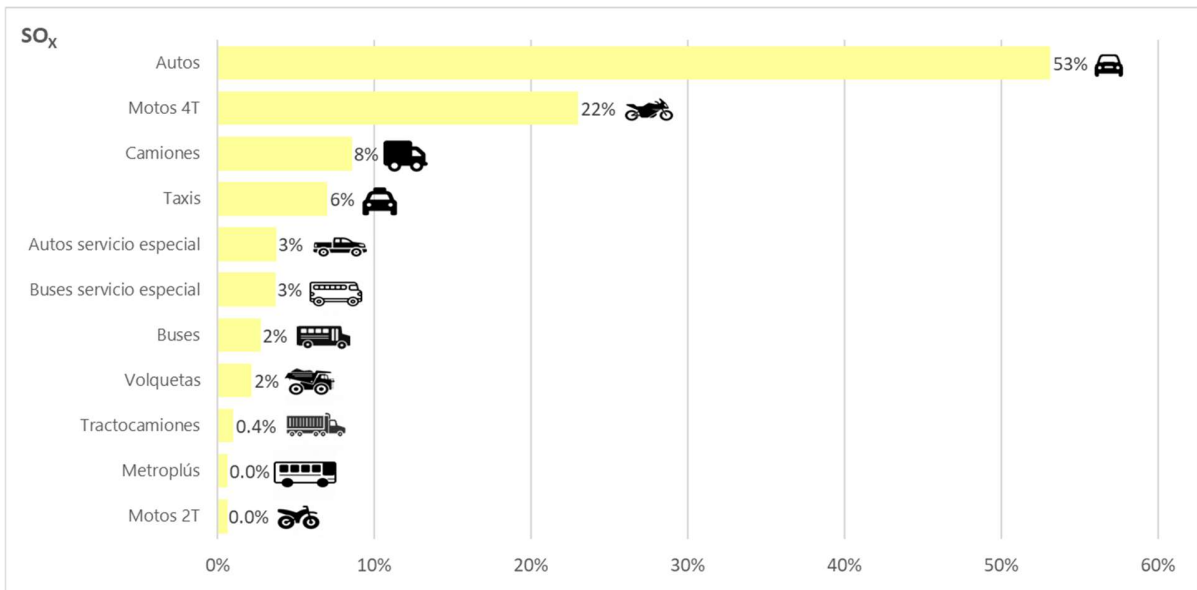


Figura 8. Distribución porcentual de emisiones de PM<sub>2.5</sub> por categoría vehicular, año 2022.

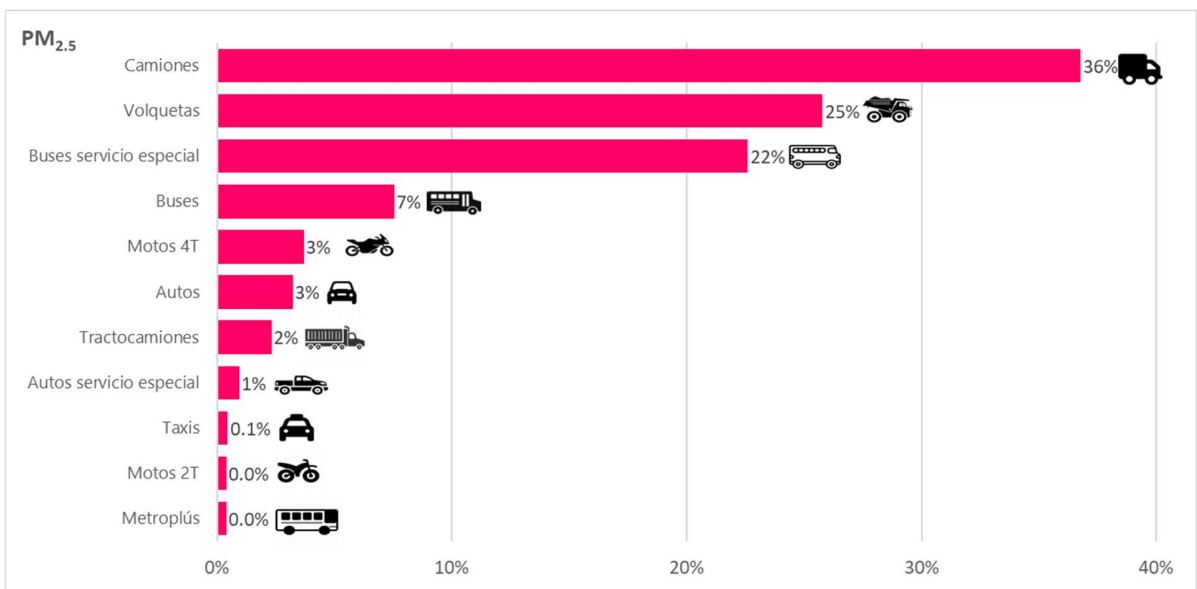




Figura 9. Distribución porcentual de emisiones de NO<sub>x</sub> por categoría vehicular, año 2022.

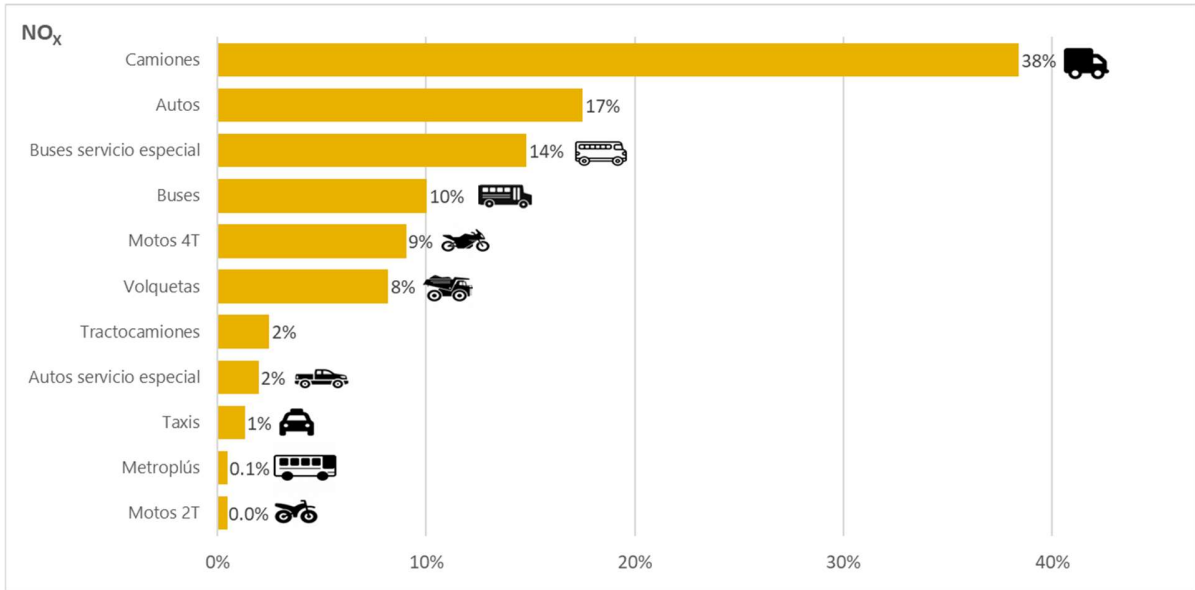


Figura 10. Distribución porcentual de emisiones de COV por categoría vehicular, año 2022.

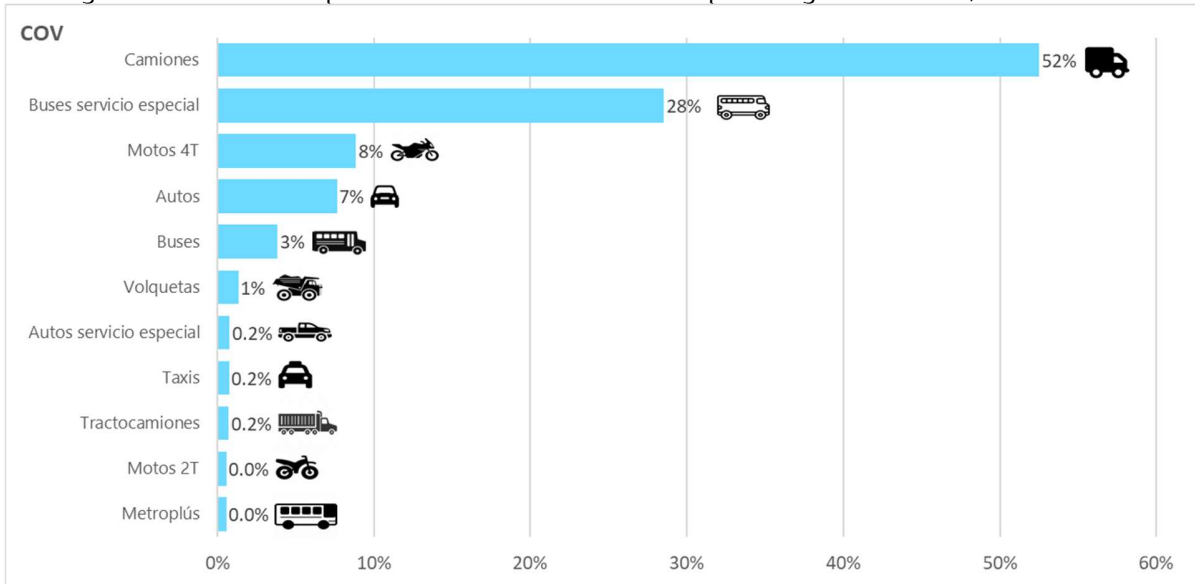
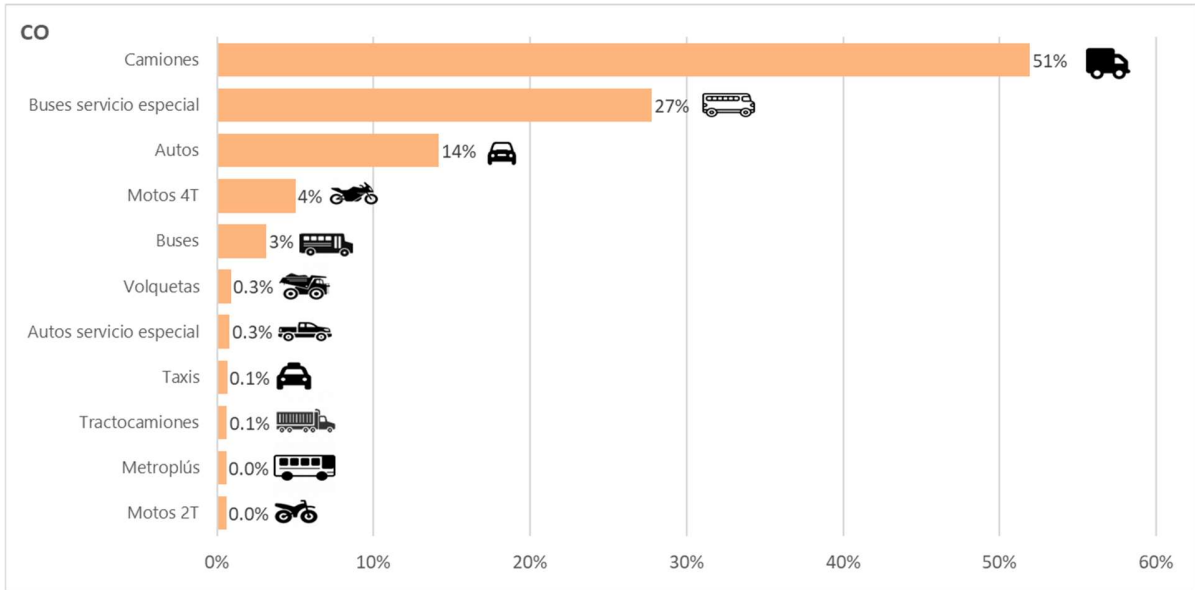
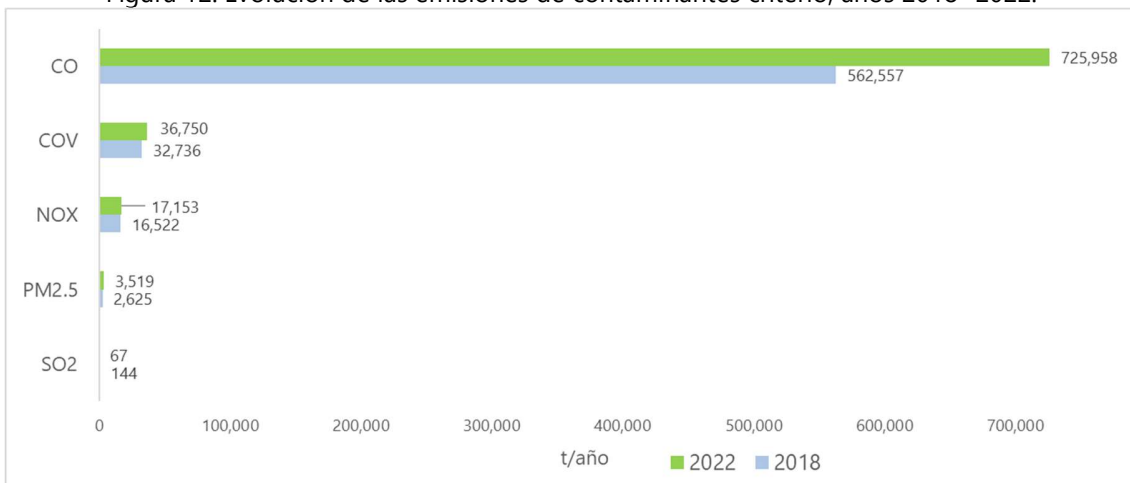


Figura 11. Distribución porcentual de emisiones de CO por categoría vehicular, año 2022.



La siguiente figura muestra el cambio en las emisiones de los contaminantes criterio entre el año 2018 y el 2022.

Figura 12. Evolución de las emisiones de contaminantes criterio, años 2018 -2022.



En el Anexo 5 se hace una comparación gráfica de las emisiones entre los años 2018 y 2022 por categoría vehicular y por combustible.

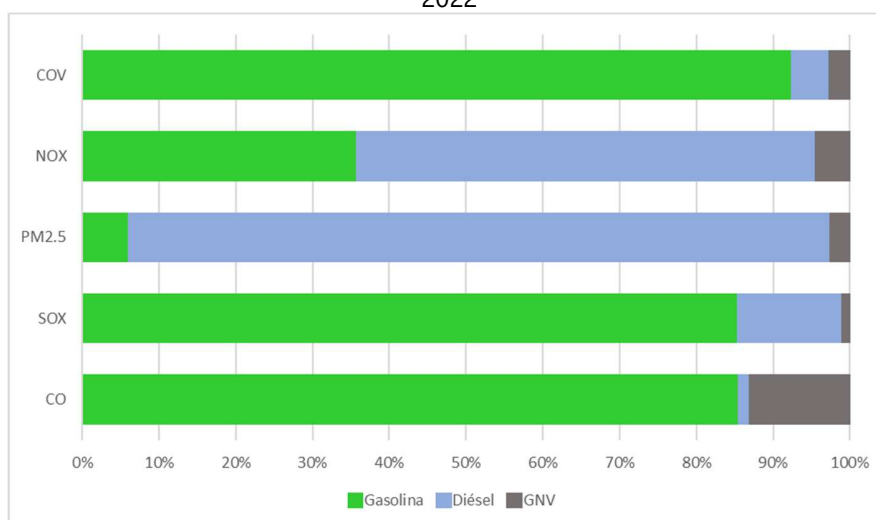
La Tabla 8 y la Figura 13 Figura 1 contienen las emisiones de los contaminantes criterio por tipo de combustible y la respectiva distribución porcentual.

Tabla 8. Emisiones de contaminantes criterio por combustible en toneladas (t), año 2022

Combustible	CO	SO <sub>x</sub>	PM <sub>2.5</sub>	NO <sub>x</sub>	COV
Gasolina	628,407.88	57.89	247.13	6,318.37	34,350.91
Diésel	10,018.08	9.09	3,218.40	10,241.03	1,784.03
GNV	87,532.41	0.01	53.09	593.48	614.58
<b>Total</b>	<b>725,958.37</b>	<b>66.99</b>	<b>3,518.62</b>	<b>17,152.88</b>	<b>36,749.51</b>

La gasolina es responsable del 93% de las emisiones de COV, del 86% de las emisiones de SO<sub>x</sub>. y del 87% de las emisiones de CO. El diésel en cambio, aporta en mayor medida a las emisiones de PM<sub>2.5</sub> (91%) y NO<sub>x</sub> (60%). Estos datos resaltan la importancia de considerar la influencia de los tipos de combustible en las emisiones específicas de contaminantes.

Figura 13 Distribución porcentual de emisiones de contaminantes criterio por combustible, año 2022



## 4.2 EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Se estimaron las emisiones de los gases de efecto invernadero metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Los resultados obtenidos se reportan detalladamente en las siguientes tablas y gráficos por tipo de categoría y combustible. Al final de cada tabla se registran las emisiones términos de CO<sub>2</sub>-eq de acuerdo con el potencial de calentamiento global (PCG) definido por el IPCC en el quinto informe de evaluación (AR5). Se asignó un PCG de 28 para el metano y de 265 para el óxido nitroso<sup>3</sup>.

Tabla 9. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por categoría vehicular en toneladas (t), año 2022

Categoría vehicular	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Camiones	638,758.61	3,719.38	24.89
Volquetas	156,150.44	81.20	6.36
Buses servicio especial	195,885.56	1,318.75	4.92
Buses	201,222.13	124.41	6.97
Motos 4T	543,241.75	813.05	5.33
Autos	1,407,285.81	17,963.74	69.61
Tractocamiones	43,699.09	1.36	1.61
Autos servicio especial	131,081.64	252.74	6.56
Taxis	158,648.87	19.00	4.22
Motos 2T	24.90	0.99	-
Metroplús	7,967.94	14.31	0.79
<b>Total</b>	<b>3,483,966.75</b>	<b>24,308.94</b>	<b>131.26</b>
<b>Total CO<sub>2</sub>-eq</b>	<b>4,199,400.59</b>		

Tabla 10. Emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por combustible en toneladas (t), año 2022

<sup>3</sup> [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5\\_Chapter08\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter08_FINAL.pdf)

Combustible	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Gasolina	2,091,631.35	4,702.65	76.4
Diésel	1,309,486.07	-	48.42
GNV	82,849.33	19,606.29	6.44
<b>Total</b>	<b>3,483,966.75</b>	<b>24,308.94</b>	<b>131.26</b>
<b>Total CO<sub>2</sub>-eq</b>	<b>4,199,400.59</b>		

Figura 14. Distribución porcentual de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por categoría vehicular, año 2022.

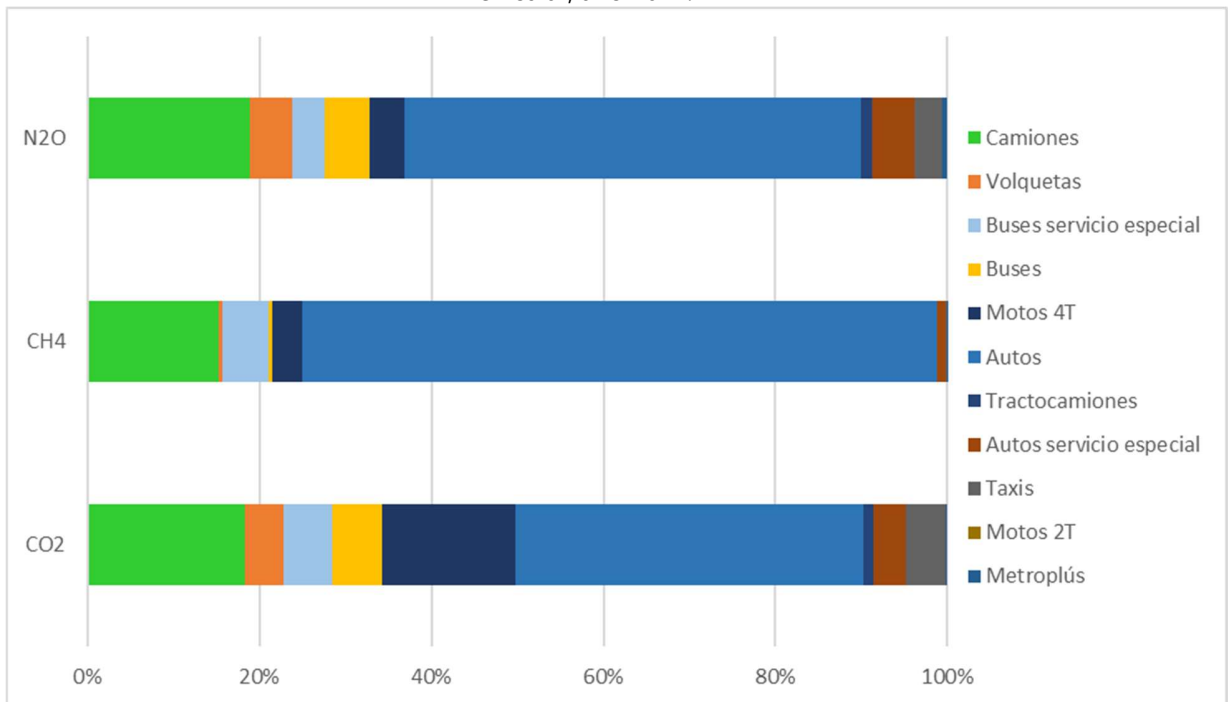
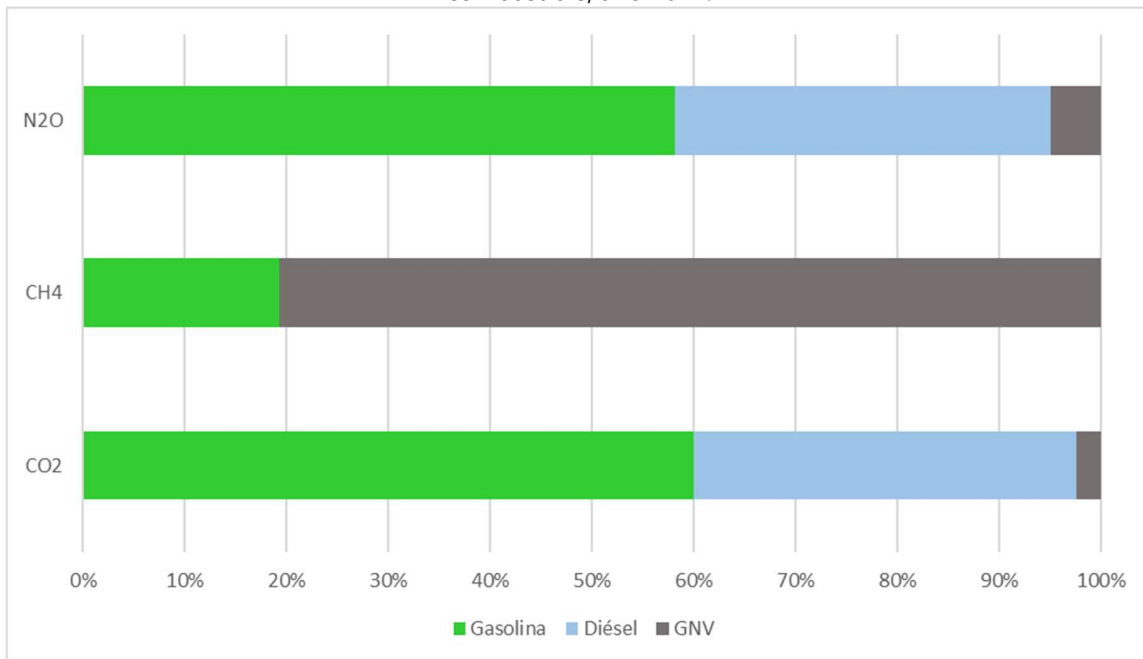


Figura 15. Distribución porcentual de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) por combustible, año 2022.



Los autos se destacan como la categoría con el mayor impacto en las emisiones de gases de efecto invernadero, lo cual está estrechamente relacionado con la elevada demanda energética derivada del consumo de gasolina y de gas natural debido a la considerable cantidad de vehículos, que representan el 36% del parque automotor.

Aunque las motos 4T y los camiones tienen una participación considerablemente menor en comparación con los autos, se destaca el aporte de los camiones a las emisiones de N<sub>2</sub>O en un 19% y el de las motos a las emisiones de CO<sub>2</sub> de un 16%.

Por tipo de combustible, la gasolina desempeña un papel preponderante en las emisiones de GEI, haciendo los mayores aportes al CO<sub>2</sub> (60%) y al N<sub>2</sub>O (58%). Por su parte, del gas natural representa más del 80% a las emisiones de CH<sub>4</sub> y el diésel alcanza un 37% a las emisiones de N<sub>2</sub>O.

## 5 CONCLUSIONES

Las emisiones de contaminantes criterio en el año 2022 aumentaron respecto al 2018 en un 34% para el  $PM_{2.5}$ , 4%  $NO_x$ , 12% COV y 29% para CO. El ingreso de vehículos con mejores tecnologías en estos últimos años y la reducción en las distancias recorridas en ciertas categorías ocasionaron que el aumento de las emisiones no fuera tan marcado. Para  $PM_{2.5}$  el incremento fue mayor ya que los vehículos antiguos que aún persisten en el parque automotor del Valle de Aburrá tienen asociados factores de emisión muy altos. El  $SO_x$  disminuyó un 53%, esto se debe a la reducción del contenido de azufre en el diésel y particularmente la gasolina.

En esta actualización del inventario se mejoró la calidad de la información utilizada para caracterizar el parque automotor. No obstante, se detectaron errores en el diligenciamiento y asignaciones de algunos parámetros, como el tipo de combustible o registros nulos para campos como el cilindraje. En relación con el kilometraje, la base de datos de los CDA presenta algunas inconsistencias en el diligenciamiento, datos faltantes y poca uniformidad entre los formatos y las variables, lo que dificultó el procesamiento de la información. Además, se resalta la importancia de contar con una mejor calidad en las bases de datos del transporte público individual que permita diferenciar con mayor precisión los taxis de los autos de servicio especial.

En el corto plazo, se tiene previsto caracterizar el transporte de carga en el Valle de Aburrá, una categoría clave en las emisiones de contaminantes atmosféricos. Esta iniciativa no solo contribuirá a validar, sino también a mejorar las bases de datos del inventario.

Las emisiones de los buses han experimentado un leve aumento en el aporte de algunos contaminantes, principalmente impulsado por el incremento en su número. Durante el proceso de caracterización, se identificó un reporte de buses a gasolina dentro de esta categoría, los cuales exhiben factores de emisión notablemente elevados para este tipo de vehículos en contaminantes como el monóxido de carbono y los compuestos orgánicos volátiles. Además de este hallazgo, se observó un aumento en los factores de emisión de  $PM_{2.5}$ , relacionado con el envejecimiento de los vehículos más antiguos de esta categoría (perfil de degradación del factor de emisión), los cuales continúan circulando en el Valle.



Con la entrada en vigor de la Ley 1972 de 2019, que establece que las fuentes móviles con motor ciclo diésel que se fabriquen, ensamblen o importen al país deben cumplir los estándares de la norma euro VI a partir del 1 de enero de 2023, se anticipa un impacto positivo en las emisiones de  $PM_{2.5}$ . Sin embargo, resulta imperativo implementar un control exhaustivo sobre los vehículos más antiguos que aún circulan y que, al envejecer, tienden a emitir mayores cantidades de contaminantes.

Aunque la gasolina contribuye con solo el 7% a las emisiones de  $PM_{2.5}$ , cifra que, si bien no es despreciable, resulta baja en comparación con los aportes del diésel, desempeña un papel significativo en la emisión de precursores de  $PM_{2.5}$ , como el  $SO_x$  y COV. Por ende, realizar un seguimiento de estas emisiones y fomentar reducciones tendrá un impacto positivo en la calidad del aire.

La caracterización del transporte de carga, especialmente de volquetas, reveló una oportunidad clave para mejorar la gestión y eficiencia de esta flota. Se identificó en la base de datos de vehículos registrados y activos, que el 30% de las volquetas medianas a diésel tiene 50 o más años de antigüedad. En reuniones con representantes del gremio de carga, se exploró la posibilidad de que un porcentaje de las volquetas registradas estén operando fuera del Valle de Aburrá. Esta situación, plantea una oportunidad valiosa para propiciar un intercambio de información más detallada que permita afinar aún más el inventario de emisiones, contribuyendo así a una gestión más precisa y efectiva de las emisiones en el sector de transporte de carga.



## 6 REFERENCIAS

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana. (2012). *Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá, año base 2011. Convenio 243.*
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana. (2013). *Actualización del Sistema de Modelización Atmosférica SIGMA. Convenio de asociación 256 de 2013.*
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana. (2019). *Sistematización, implementación y apropiación social del Plan Integral de Gestión de Calidad del Aire 2017-2030. Contrato de Ciencia y Tecnología 1179 de 2018.*
- Congreso de la República de Colombia. (2019). *Ley 1972 de 2019.*  
<https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/06/ley-1972-2019.pdf>
- European Environment Agency. (2021). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. Update Oct. 2021.* <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019/part-b-sectoral-guidance-chapters/1-energy/1-a-combustion/1-a-3-b-i>
- Stockholm Environment Institute. (2020). *Low Emissions Analysis Platform (LEAP) (2020.1.0.104 (64 bits)).*