

**CONTRATO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
N° 1179 DE 2018**



**ACTUALIZACIÓN INVENTARIO DE EMISIONES  
ATMOSFÉRICAS DEL VALLE DE ABURRÁ – AÑO 2018**

---

Diciembre de 2019



**Universidad  
Pontificia  
Bolivariana**

Vigilada Mineducación





## CONTRATO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA N° 1179 DE 2018

### UN PROYECTO DE:

### ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ

Eugenio Prieto Soto

#### **Director**

María del Pilar Restrepo Mesa

#### **Subdirectora Ambiental**

Diana Fernanda Castro Henao

#### **Líder Programa Gestión Ambiental**

### EJECUTA:

Universidad Pontificia Bolivariana  
Grupo de Investigaciones Ambientales

---

María Victoria Toro Gómez I.Q. MSc. PhD.

Eliana Molina Vásquez I.S. MSc.

Alejandro Marín Sánchez I.Q. MSc.

Liseth Galeano Ruiz Ec. MSc

Alexis Orrego Villegas I.Sis. Esp.

María Isabel González Ospino I.Q. Esp.

María Luisa Jaramillo Jaramillo I.Ag. Esp.

Paola Andrea Gómez Arias I.C. Esp.

Óscar Fabián Arcos Jiménez I.Q. Esp.

Santiago Moncada Rojas I.E.

Sebastián Ruiz Gómez I.Q.

### SUPERVISIÓN

Área Metropolitana del Valle de Aburrá

Ana Zuleima Orrego Guarín. I.Q Esp.

#### **Profesional Universitaria**

Laura Catalina Gil Salazar I.A. Esp.

Tatiana Marcela Mosquera Rivas Adm. MSc.

#### **Apoyo a la supervisión**



# Contenido

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>7</b>
<b>RESUMEN EJECUTIVO</b> .....	<b>8</b>
<b>1. MODELO DE INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFERICAS DEL VALLE DE ABURRÁ</b> .....	<b>13</b>
<b>2. FUENTES MÓVILES EN RUTA</b> .....	<b>14</b>
2.1. METODOLOGÍA.....	16
2.2. DATOS DE ENTRADA.....	17
2.2.1. Clasificación del parque automotor.....	17
2.2.2. Vehículos registrados .....	20
2.2.3. Perfil de antigüedad.....	25
2.2.4. Kilometraje.....	27
2.2.5. Rendimiento del combustible.....	29
2.2.6. Factores de emisión.....	29
2.3. RESULTADOS.....	30
2.3.1. Demanda energética del parque automotor .....	30
2.3.2. Composición del parque automotor del Valle de Aburrá.....	31
2.3.3. Emisiones de contaminantes criterio .....	33
2.3.4. Emisiones de gases de efecto invernadero.....	37
2.3.5. Otras emisiones.....	39
<b>3. FUENTES MÓVILES FUERA DE RUTA (OFF-ROAD)</b> .....	<b>40</b>
3.1. LEGISLACIÓN INTERNACIONAL .....	40
3.1.1. Metodología EURO.....	41
3.1.2. Metodología EPA.....	43
3.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA NACIONAL.....	44
3.3. ESTIMACIÓN DEL PARQUE FUERA DE RUTA (OFF-ROAD) .....	45
<b>4. FUENTES FIJAS PUNTALES INDUSTRIALES</b> .....	<b>47</b>
4.1. METODOLOGÍA.....	47
4.2. DATOS DE ENTRADA.....	48
4.3. RESULTADOS.....	48
4.3.1. Subsectores industriales y densificación industrial.....	48
4.3.2. Emisión de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero .....	51
4.3.3. Demanda energética.....	56

4.3.4. Emisiones de gases tóxicos.....	60
4.3.5. Resolución 912 de 2017.....	61
<b>5. FUENTES DE ÁREA INDUSTRIALES .....</b>	<b>63</b>
5.1. METODOLOGÍA.....	63
5.2. DATOS DE ENTRADA.....	64
5.3. RESULTADOS.....	64
5.3.1. Estaciones de servicio de combustible .....	64
5.3.2. Tanques de almacenamiento de combustible (Centrales mayoristas).....	66
5.3.3. Emisiones evaporativas de procesos industriales.....	67
5.3.4. Emisiones fugitivas sector construcción .....	68
5.3.5. Emisiones Atmosféricas En Fuentes De Área .....	68
<b>6. FUENTES DE ÁREA – FRENOS Y DESGASTE DE LLANTAS .....</b>	<b>70</b>
6.1. METODOLÓGÍA DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR DESGASTE DE FRENOS Y NEUMÁTICOS .....	70
6.2. EMISIONES POR EL DESGASTE DE FRENOS Y NEUMÁTICOS EN EL VALLE DE ABURRÁ.....	71
<b>7. FUENTES DE ÁREA BIOGÉNICAS - VEGETACION .....</b>	<b>73</b>
7.1. RESULTADO DE EMISIONES EN FUENTES BIOGÉNICAS.....	73
7.2. FUENTES BIOGÉNICAS EN EL VALLE DE ABURRÁ .....	74
<b>8. EMISIONES TOTALES DEL AREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ .....</b>	<b>75</b>
<b>9. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES Y VALIDACIÓN DEL INVENTARIO.....</b>	<b>79</b>
9.1. FUENTES MÓVILES EN RUTA .....	79
9.1.1. Incertidumbre del Modelo Leap .....	79
9.1.2. Validación de MODELO LEAP .....	84
9.1.3. Comparación con otros inventarios internacionales .....	85
9.2. FUENTES FIJAS INDUSTRIALES .....	86
9.2.1. Incertidumbres de calculo de emisiones Datos de registro de emisiones .....	86
9.2.2. Incertidumbres de calculo de emisiones Factor de Emisión .....	88
9.3. VALIDACIÓN CON EL SISTEMA DE MODELIZACIÓN ATMOSFÉRICA.....	89
9.4. INCERTIDUMBRE TOTAL DEL INVENTARIO.....	94
<b>10. CONCLUSIONES.....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>100</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>101</b>

## Lista de Figuras

Figura RE 1 Distribución de emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular, año 2018 .	9
Figura RE 2 Distribución de emisiones de contaminantes atmosféricos por subsector industrial año base 2018.....	10
Figura RE 3 Distribución de las emisiones de contaminantes criterio en fuentes fijas, fuentes móviles y fuentes de área año base 2018.....	12
Figura 4 Fuentes Estimadas en el Inventario .....	13
Figura 5 Dominio de MODEAM .....	14
Figura 6 Usuarios de LEAP en Colombia .....	16
Figura 7 Árbol de categorías vehiculares utilizadas en el modelo LEAP.....	19
Figura 8 Cantidad de vehículos distribuidos en existencias y ventas, categoría vehicular, cilindraje y tipo de combustible para el año 2018* .....	24
Figura 9 Perfil de antigüedad por categoría vehicular del parque automotor del Valle de Aburrá para el año 2018* .....	26
Figura 10 Kilometraje promedio anual recorrido por los vehículos en el Valle de Aburrá para el año 2018* .....	28
Figura 11 Demanda energética del parque automotor del Valle de Aburrá por categoría vehicular (TJ), año 2018* .....	30
Figura 12 Composición del parque automotor del Valle de Aburrá, año 2018* .....	32
Figura 13 Distribución de emisiones de PM <sub>2.5</sub> por categoría vehicular, año 2018* .....	34
Figura 14 Distribución de emisiones de CO por categoría vehicular, año 2018* .....	34
Figura 15 Distribución de emisiones de NO <sub>x</sub> por categoría vehicular, año 2018* .....	35
Figura 16 Distribución de emisiones de SO <sub>x</sub> por categoría vehicular, año 2018* .....	35
Figura 17 Distribución de emisiones de VOC por categoría vehicular, año 2018* .....	36
Figura 18 Distribución de emisiones por tipo de combustible, año 2018.....	37
Figura 19 Distribución de emisiones de gases de efecto invernadero por categoría vehicular, año 2018.....	38
Figura 20 Diagrama de flujo metodología EURO.....	41
Figura 21 Distribución densidad de empresas y fuentes industriales por municipio año base 2018 .	49
Figura 22 Densidad de empresas y fuentes industriales por subsector industrial año base 2018.....	51
Figura 23 Distribución de emisiones de contaminantes atmosféricos por subsector industrial año base 2018.....	54
Figura 24 Distribución de emisiones de contaminantes atmosféricos por municipio año base 2018	56
Figura 25 Distribución de la demanda energética por tipo de combustible año base 2018 .....	57

Figura 26 Distribución de emisiones de contaminantes atmosféricos por tipo de combustible año base 2018.....	58
Figura 27 Consumo de combustible por sector económico. ....	59
Figura 28 Variación relativa de emisiones de contaminantes criterio para el año 2018 .....	60
Figura 29 Distribución del consumo de combustible en el Valle de Aburra en el año 2018.....	64
Figura 30 Distribución de emisiones estimadas de VOC provenientes de estaciones de servicio por municipio, año 2018.....	66
Figura 31 Distribución de emisiones de VOC (t/año) de tanques de almacenamiento de combustible, año 2018 .....	67
Figura 32 Distribución de emisiones de VOC causadas por emisiones evaporativas industriales, año 2018.....	68
Figura 33 Distribución de emisiones de VOC en el Valle de Aburrá año base 2018 .....	69
Figura 34 Distribución de las emisiones de PM10 por el desgaste de frenos y neumáticos.....	72
Figura 35 Aportes de emisiones de CO y CO <sub>2</sub> de fuentes industriales y fuentes móviles.....	76
Figura 36 Aportes de emisiones de otros contaminantes por las diferentes fuentes inventariadas...	76
Figura 37 Aportes de emisiones de contaminantes criterio por las diferentes fuentes inventariadas.	77
Figura 38 Grafica de caja y bigotes kilómetros recorridos al año categoría motos 4T.....	82
Figura 39 Grafica de cajas y bigotes kilómetros recorridos al año categoría autos.....	83
Figura 40 Balance energético real y estimado, año 2018* .....	85
Figura 42 Comparación de la concentración simulada vs medida de PM <sub>2.5</sub> en la estación Itagüí - Casa de Justicia.....	91
Figura 43 Comparación de la concentración simulada vs real de PM <sub>2.5</sub> en la estación Medellín-Altavista – I.E. Pedro Octavio Amado .....	91
Figura 44 Comparación de los perfiles de concentración de PM <sub>2.5</sub> (estimado vs medido) en la estación Itagüí - Casa de Justicia.....	92
Figura 45 Comparación de los perfiles de concentración de PM <sub>2.5</sub> (estimado vs medido) en la estación Medellín-Altavista – I.E. Pedro Octavio Amado .....	93

## Lista de Tablas

Tabla 1 Resumen descriptivo metodología inventario fuentes móviles en ruta año base 2018.....	15
Tabla 2 Algoritmos de Cálculo de LEAP .....	16
Tabla 3 Distribución del parque automotor en el modelo LEAP.....	18
Tabla 4 Existencias y ventas de vehículos registrados en el Valle de Aburra para el año 2018*.....	20
Tabla 5 Distribución porcentual del parque automotor por categoría vehicular, cilindraje y tipo de combustible para el año 2018*.....	21
Tabla 6 Factores de emisión de CO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> * .....	30
Tabla 7 Emisión de contaminantes criterio por categoría vehicular (t), año 2018* .....	33
Tabla 8 Emisión de contaminantes criterio por tipo de combustible (t), año 2018* .....	36
Tabla 9 Potenciales de Calentamiento Global.....	37
Tabla 10 Emisión de gases de efecto invernadero por categoría vehicular (t), año 2018*.....	38
Tabla 11 Emisión de algunos aromáticos por categoría vehicular (t), año 2018* .....	39
Tabla 12 Maquinaria de construcción registrada en el Valle de Aburrá para el año 2018* .....	46
Tabla 13 Resumen descriptivo metodología inventario fuentes fijas año base 2018.....	47
Tabla 14 Distribución densidad de empresas y fuentes industriales por municipio año base 2018 ..	49
Tabla 15 Densidad de empresas y fuentes industriales por subsector industrial año base 2018 .....	50
Tabla 16 Emisiones (t/año) de contaminantes atmosféricos por subsector industrial año base 2018	53
Tabla 17 Emisiones (t/año) de contaminantes atmosféricos por municipio año base 2018 .....	55
Tabla 18 Demanda energética por tipo de combustible año base 2018.....	56
Tabla 19 Emisiones (t/año) de contaminantes atmosféricos por tipo de combustible año base 2018 .....	57
Tabla 20 Emisiones de gases tóxicos por subsector industrial para el año 2018.....	60
Tabla 21 Emisiones de gases tóxicos por municipio para el año 2018.....	61
Tabla 22 Resumen descriptivo metodología inventario fuentes de área año base 2018.....	63
Tabla 23 Consumo de Gasolina y Diésel en el Valle de Aburra para el año 2018.....	64
Tabla 24 Emisiones estimadas de VOC a partir de las estaciones de servicio de combustible, año 2018.....	65
Tabla 25 Emisiones de VOC en tanques de almacenamiento de combustible, año 2018.....	66
Tabla 26 Emisiones de VOC evaporativas industriales, año 2018 .....	67
Tabla 27 Emisiones fugitivas de MP y PM10 sector construcción .....	68
Tabla 28 Emisiones totales de VOC año base 2018.....	69
Tabla 29 Factores de emisión de PM10 para el desgaste de frenos y neumáticos.....	71

Tabla 30 Emisiones de PM10 por el desgaste de frenos y neumáticos, año 2018.....	71
Tabla 31 Emisiones biogénicas en el Valle de Aburrá (t/año)*.....	73
Tabla 32 Área vegetativa del Valle de Aburrá .....	74
Tabla 33 Emisiones totales por cada tipo de fuente.....	78
Tabla 34 Análisis del porcentaje de error entre los datos de las STT y el RUNT* .....	81
Tabla 35 Análisis del porcentaje de error entre kilómetros recorridos del modelo LEAP y las bases de datos aportadas* .....	83
Tabla 36 Análisis del porcentaje de error entre el balance energético real y el estimado (TJ)* .....	85
Tabla 37 Emisiones atmosféricas per cápita por fuentes móviles en varios centros urbanos de Latinoamérica (kg/año/habitante) * .....	86
Tabla 38 Comparación número de empresas registradas.....	87
Tabla 39 Evaluación rating en calderas sector industrial.....	89
Tabla 41 Desempeño del modelo con la metodología de interferencia difusa .....	94
Tabla 42 Aporte total de incertidumbre inventario año base 2018 para material particulado fino PM2.5 .....	96

## INTRODUCCIÓN

**E**l Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire para el Valle de Aburrá 2017-2030 – PIGECA- es el instrumento de gestión que identifica las necesidades de la región metropolitana del Valle de Aburrá y establece las estrategias y medidas requeridas para que los habitantes del territorio cuenten con una mejor calidad del aire al año 2030. El PIGECA fue adoptado mediante el Acuerdo Metropolitano N°16 del 06 de diciembre de 2017 y tiene como objetivo cuidar, proteger y mantener la calidad del aire del territorio para salvaguardar la salud pública, elevar el bienestar social y propiciar un desarrollo metropolitano sostenible, en una región con tendencia a ser baja en emisiones de carbono y contaminantes en emisiones.

Para el logro de sus objetivos, el PIGECA estableció estrategias y metas de disminución de la contaminación a corto, mediano y largo plazo en cada uno de los actores involucrados en el problema de la contaminación, con el fin de contribuir colectivamente al mejoramiento de las condiciones de calidad del aire en la región metropolitana.

Con el propósito de brindar soporte técnico en la implementación del PIGECA, se firmó el Contrato de Ciencia y Tecnología N°1179 de 2018 entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad Pontificia Bolivariana, el cual tiene entre sus alcances generar la apropiación del conocimiento científico del Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire en el Valle de Aburrá 2017-2030 (PIGECA) por parte de los sectores y las autoridades locales e impulsar su implementación, a partir de la optimización y aplicación del Sistema de Modelización Atmosférica (SMA), herramienta tecnológica que permite la evaluación permanente de la calidad del aire; la revisión y aplicación de los indicadores del Plan, a partir de la generación de un software para la evaluación y seguimiento al plan; el apoyo en la formulación de normas; el soporte en la ejecución del Plan Operacional para Enfrentar Episodios de Contaminación Atmosférica (POECA) y la evaluación del impacto de la molestia por olores ofensivos, con el fin de fortalecer las capacidades del Área Metropolitana del Valle de Aburrá como autoridad ambiental y de movilidad.

En este contexto se presenta en este documento los resultados de la actualización del inventario de emisiones atmosféricas con año base 2018, asociado al alcance del contrato “optimización y aplicación del Sistema de Modelización Atmosférica (SMA), herramienta tecnológica que permite la evaluación permanente de la calidad del aire”.

## RESUMEN EJECUTIVO

De acuerdo con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, un inventario de emisiones atmosféricas es “una base de datos que enumera, por fuente, la cantidad de contaminantes atmosféricos liberados a la atmosfera durante un año u otro período de tiempo”. Esta herramienta permite dirigir las acciones regulatorias a las fuentes de mayor aporte de contaminantes además son un insumo para la ejecución de los modelos matemáticos usados para la estimación la calidad del aire futura. (United States Environmental Protection Agency, 2019). De esta forma es posible fijar límites, tomar medidas de prevención y crear estrategias de reducción de emisiones.

En vista de la importancia que tienen estos inventarios para la gestión de la calidad del aire, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá ha venido desarrollando desde el año 1996, junto con instituciones de educación superior de la región, el inventario de emisiones atmosféricas para el Valle de Aburrá. Desde entonces, el inventario se ha actualizado a través de diferentes convenios, aplicando la metodología Bottom-Up que consiste en la recolección detallada de los datos de las fuentes fijas, móviles y de área para la estimación de las emisiones de contaminantes criterio, gases efecto invernadero, y contaminantes no convencionales que en total suman 203 especies para este último, con año base 2018 en un dominio de 60 x 60 kilómetros.

El cálculo de las emisiones para fuentes móviles en ruta se realiza aplicando el modelo LEAP (Longe-range Energy Alternatives Planning System), el cual permite el desarrollo de estudios de planeación energética y de mitigación de gases efecto invernadero y otros contaminantes del aire, desarrollado en el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo. Este modelo se viene implementando en el Valle de Aburrá desde el año 2011 y sus posteriores actualizaciones (2013, 2015 y 2016).

La cuantificación de las emisiones provenientes del sector industrial se obtiene de los datos reportados sobre las mediciones o monitoreos isocinéticos de las fuentes fijas de las empresas que están registradas con expedientes metropolitanos. Para aquellos procesos o fuentes que no se tengan dichas mediciones, las emisiones se estiman aplicando los factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA. AP-42) en algunos procesos se emplean los factores de emisión de la Agencia Ambiental Europea (EEA). La cantidad de fuentes de emisión y ductos con monitoreo de emisiones se construyó y validó junto con el grupo de Control y Vigilancia del AMVA.

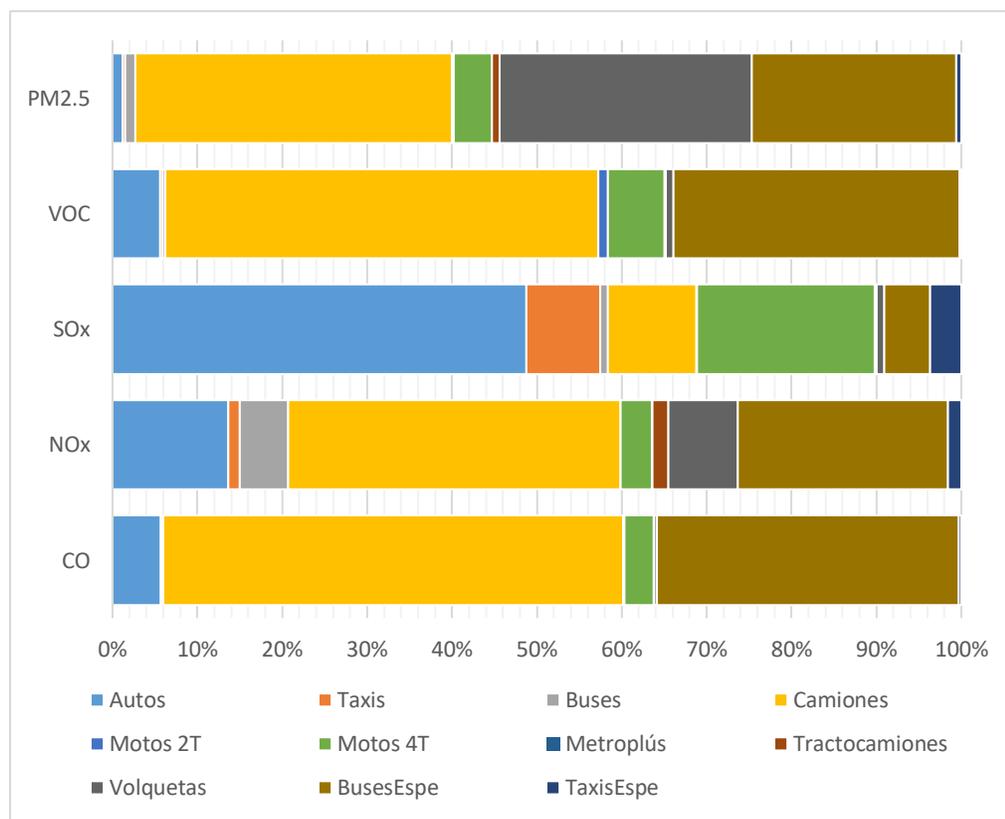
Adicional a las emisiones atmosféricas provenientes de fuentes fijas, se consideran las fuentes de área, principalmente en la emisión de los Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC), en estaciones de servicio de combustible, centrales mayoristas y empresas con procesos generadores de emisiones evaporativas.

### FUENTES MÓVILES EN RUTA

De acuerdo con los datos proporcionados por las Secretarías de Tránsito y Transporte de los diez municipios que conforman el Valle de Aburrá, el parque automotor estaba conformado para el año 2018 por 1,550,973 vehículos; de los cuales el 54.58% son motocicletas (53.30% motos 4T y el 1.27% a motos 2T); los automóviles con un 38.26% siendo estas dos categorías las de mayor cantidad en el valle. El 7.16% restante son aportados en su mayoría por las categorías camiones y taxis con un 1.97% y 1.96% respectivamente, seguidos de las categorías de autos servicio especial con un 1.18% y los buses servicio especial con un 0.93% de participación.

Los camiones, volquetas y buses especiales son los mayores emisores de material particulado fino PM<sub>2.5</sub>. En cuanto a los compuestos orgánicos volátiles, las categorías camiones y buses especiales son los de mayor aporte al igual que para el CO y los óxidos de nitrógeno NO<sub>x</sub>. Finalizando, las categorías que más aportan a los óxidos de azufre SO<sub>x</sub> son los autos y las motos con cerca del 70.0% tal como se muestra en la Figura RE 1.

Figura RE 1 Distribución de emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular, año 2018



Fuente: elaboración propia

La gasolina es el principal responsable por las emisiones de gases como CO, SO<sub>x</sub> y VOC, con el 94%, 93% y 94% respectivamente. El diésel es el principal aportante de NO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub> con el 63% y el 90% de las emisiones de estos contaminantes. El GNV por su parte hace una contribución principal a las emisiones de CO con el 4% y en un 2% al NO<sub>x</sub>, sin contar las emisiones de metano.

### FUENTES FIJAS INDUSTRIALES

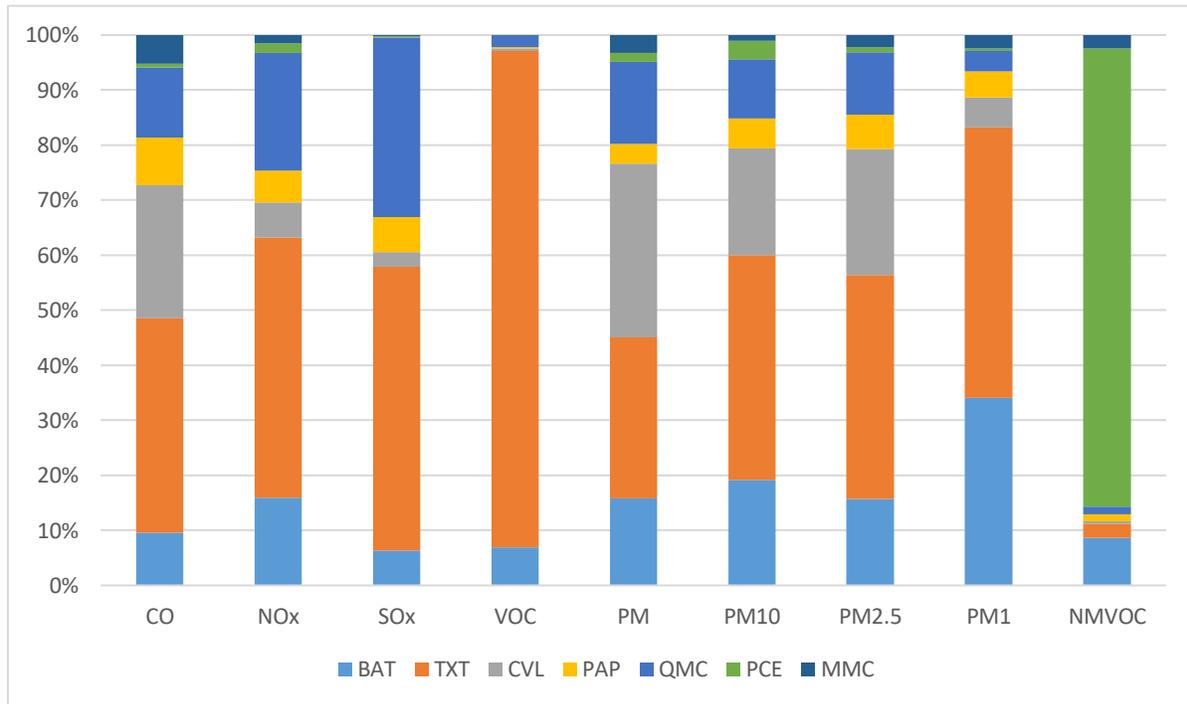
En el Valle de Aburrá se encontró un total de 2,138 fuentes asociadas a 698 empresas, para aquellos procesos con emisiones atmosféricas que cuentan con seguimiento por parte del grupo de Control y Vigilancia del AMVA.

De acuerdo con los registros, en los municipios de Medellín e Itagüí se encuentran asentadas el 72% de las empresas que liberan al aire contaminantes por procesos y ductos y que representan a su vez el 65% de las fuentes totales de todo el Valle de Aburrá. Adicionalmente, los subsectores de textil (TXT), bebidas, alimentos y tabaco (BAT) y metalmecánico (MMC) son los que agrupan un poco más de la mitad de las empresas y fuentes totales.

Para el inventario año base 2018, la emisión de contaminantes criterio por parte de las empresas del Valle de Aburrá fueron de 3,228 t de CO, 2,346 t de NO<sub>x</sub>, 3,376 t de SO<sub>x</sub>, 7,109 t de VOC, 1,243 t de PM, 385 t de PM<sub>10</sub>, 248 t de PM<sub>2.5</sub>, 69 t de PM<sub>1</sub>, 5,573 t de NMVOC. En materia de gases de efecto invernadero, se emitieron 1,653,225 t de CO<sub>2</sub>, 60 t de CH<sub>4</sub> y 27 t de N<sub>2</sub>O.

En el sector industrial la energía consumida, proviene principalmente del uso del gas natural con una representatividad del 60%, seguido por el carbón mineral con un 31%, el fuel oil con un 5% y la biomasa y otros combustibles con un 2%.

Figura RE 2 Distribución de emisiones de contaminantes atmosféricos por subsector industrial año base 2018



Fuente: elaboración propia

### **FUENTES DE ÁREA INDUSTRIALES**

En el Valle de Aburrá el municipio con mayor consumo tanto de gasolina como de diésel es Medellín, donde se consume el 63% y 45% respectivamente de estos combustibles. Por otra parte, los municipios de Bello, Envigado e Itagüí presentan un consumo de gasolina del 9.0%, 8.0% y 7.8% respectivamente, mientras que para el caso del diésel son los municipios de Itagüí, Bello y Sabaneta los que registran el mayor consumo luego de Medellín con un 12.3%, 9.4% y 8.6%.

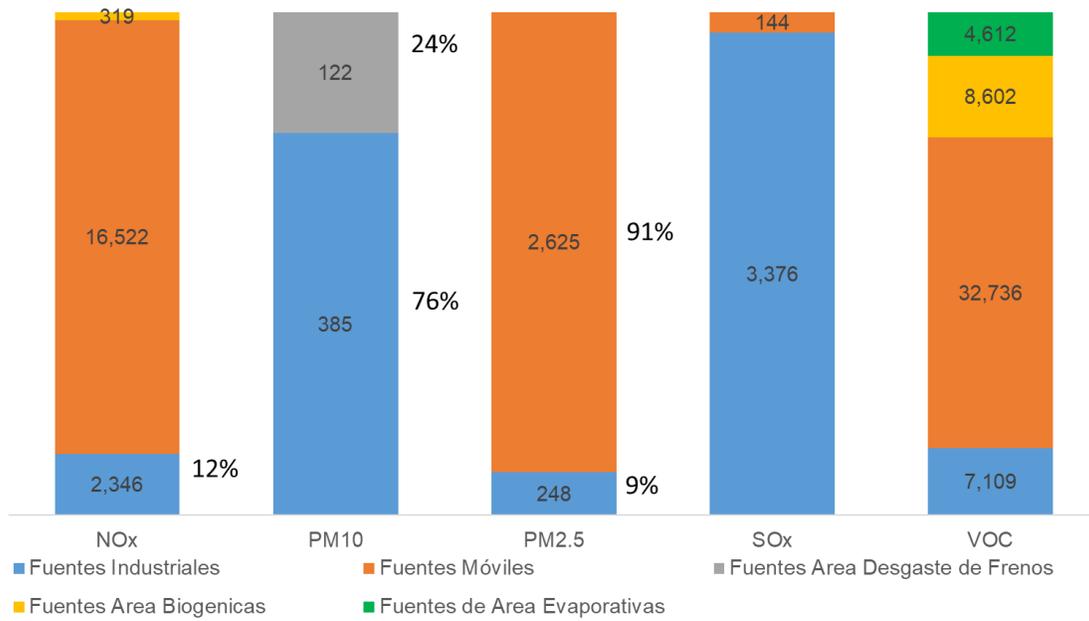
Mediante factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), se estimaron las emisiones de los compuestos orgánicos volátiles (VOC) provenientes de las estaciones de servicio donde el aporte más importante proviene de la gasolina (2,177 t/año), con mayor representatividad en el municipio de Medellín, seguido por Bello, Envigado e Itagüí; de igual manera en el caso del diésel (79 t/año), el mayor aporte se presenta en Medellín, Itagüí y Bello. Adicionalmente se estimaron las emisiones fugitivas de material particulado provenientes de actividades de explotación de material minero en el sector de la construcción, considerando las canteras presentes en los municipios de Bello y Girardota, dando como resultado una emisión de 6.37 t/año de MP y 3.19 t/año para PM<sub>10</sub>.

En las centrales mayoristas, el 67% de las emisiones del VOC proviene de se debe al almacenamiento de gasolina a motor en tanques techo fijo y en los procesos industriales, se destaca un aporte del 74% asociado a la producción de cerveza y bebidas destiladas seguido de un 20% debido al recubrimiento de rollos metálicos y latas.

### **APORTES DE EMISIONES POR FUENTES DE EMISIÓN**

Con los resultados anteriormente descritos, en la Figura RE 3 se puede visualizar el aporte de las fuentes móviles, fijas y de área, a las emisiones de contaminantes criterio en el Valle de Aburrá, con año base 2018. En la figura se puede observar que las mayores emisiones en los óxidos de nitrógeno, compuestos orgánicos volátiles (VOC) y material particulado menos a 2.5 micrómetros son aportados por el transporte rodado, mientras que las industrias son representativas en las emisiones de los óxidos de azufre con 3,376 toneladas por año y de material particulado respirable PM<sub>10</sub>, se resalta en la figura que la emisión de los VOC también aparecen otras fuentes que aportan estas sustancias como son las fuentes biogénicas y las fuentes evaporativas que incluyen las estaciones de servicio de combustible.

Figura RE 3 Distribución de las emisiones de contaminantes criterio en fuentes fijas, fuentes móviles y fuentes de área año base 2018



Fuente: elaboración propia

## 1. MODELO DE INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DEL VALLE DE ABURRÁ

El modelo de inventario de emisiones del valle de Aburrá -MODEAM- es una herramienta para la gestión y control de emisiones por parte de las autoridades ambientales dentro de su jurisdicción.

El propósito del inventario de emisiones comprende los siguientes aspectos:

- Conocer el aporte de cada sector económico a las emisiones totales, lo cual permite una adecuada asignación de responsabilidades y focalización de medidas de reducción.
- Evaluar las estrategias de control de la contaminación atmosférica.

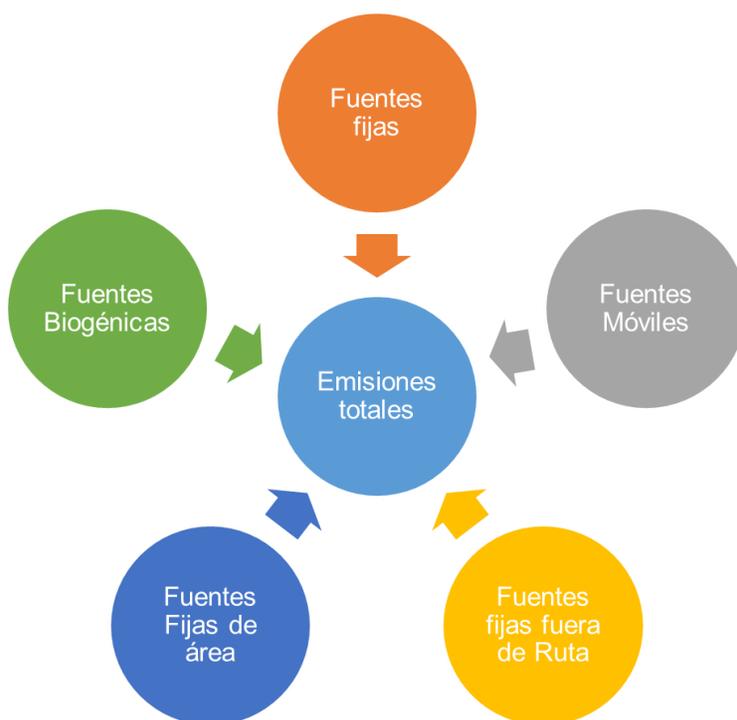
- Ser una herramienta de soporte para la toma de decisiones en los planes de gestión de la calidad del aire.

- Servir de base a la modelización de la dispersión de contaminantes y analizar zonas de altas y bajas emisiones.

- Generar escenarios futuros para establecer cuál sería el panorama de la calidad del aire de acuerdo con las acciones tomadas en el presente.

El modelo de inventario de emisiones MODEAM, está configurado para la estimación de las emisiones de las fuentes, mostradas en la Figura 5, que se encuentran asentadas en la jurisdicción del Área Metropolitana del Valle de Aburrá con corte al año 2018. Se elige este año puesto que la información se recolecta una vez terminadas las actividades que producen contaminantes hasta el 31 de diciembre de este año.

Figura 4 Fuentes Estimadas en el Inventario



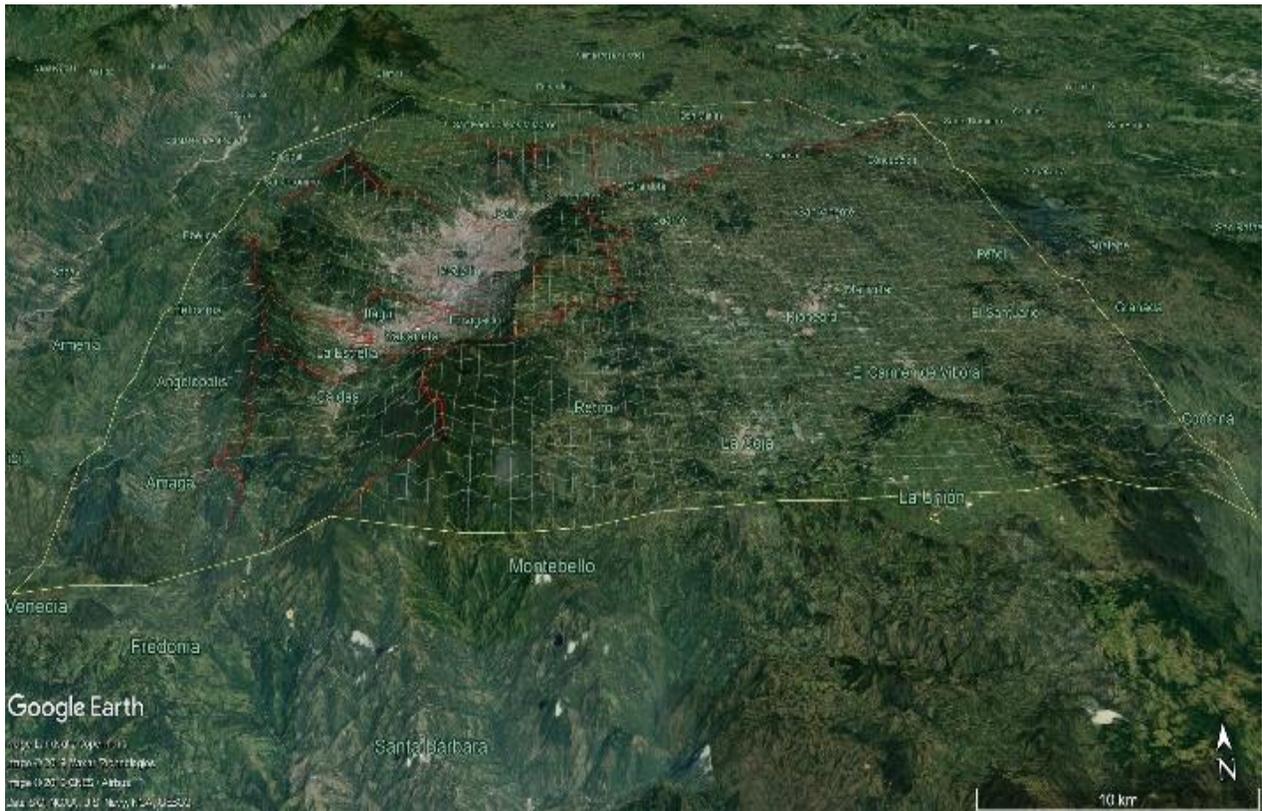
Fuente: elaboración propia

La intención es conocer cuál fue el comportamiento de las variables productivas y de transporte durante el año y con esto conocer el desempeño de los planes de gestión, que se logra comparando su comportamiento con las concentraciones de los contaminantes en las estaciones de calidad del aire para el mismo año. Los resultados permiten establecer si las medidas

de reducción aplicadas han permitido mejorar el recurso aire.

Para el desarrollo del inventario se definió un dominio de 60km x 60km, con resolución espacial de 1 km<sup>2</sup> y resolución temporal de 1 hora con proyección anual. (Figura 5)

Figura 5 Dominio de MODEAM



Fuente: elaboración propia, Google Earth

*En los apartados siguientes se describe la metodología, datos de entrada y resultados para cada fuente de emisión considerada.*

## 2. FUENTES MÓVILES EN RUTA

Las fuentes móviles en ruta, de acuerdo con los resultados de los inventarios realizados desde el 2011, son la fuente de mayor aporte a la contaminación del aire en el Valle de Aburrá especialmente para las

especies PM<sub>2.5</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y compuestos orgánicos volátiles VOC (por sus siglas en inglés).

En los siguientes apartados se detalla la metodología empleada para la estimación de las emisiones de las diferentes categorías vehiculares; y explica las estrategias de recolección, análisis y revisión de los datos utilizados. Los resultados del inventario se presentan en forma de cuadros y figuras que

reflejan las emisiones por categoría vehicular y por tipo de combustible.

Para la actualización del inventario con corte al año 2018 se aplicaron las variables que se resumen en la Tabla 1.

**Tabla 1 Resumen descriptivo metodología inventario fuentes móviles en ruta año base 2018**

<b>FUENTES MÓVILES EN RUTA</b>	
Grupo de Fuente	Fuentes móviles
Sub Grupo	Fuentes móviles en ruta o en carretera
Categorías	Autos, Taxis, Autos Servicio Especial, Buses, Buses Servicio Especial, Camiones, Motos 2T, Motos 4T, Metroplús, Tractocamiones, Volquetas.
Sub Categoría	Livianos, Medianos, Pesados
Uso Final	Gasolina, Diésel, Gas Natural Vehicular(GNV), Eléctrico.
Modelo empleado para la estimación de las emisiones	Modelo LEAP (Longe-range Energy Alternatives Planning System), el cual permite el desarrollo de estudios de planeación energética y de mitigación de gases efecto invernadero y otros contaminantes del aire, desarrollado en el Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo. Este modelo se viene implementando en el Valle de Aburrá desde el año 2011 y sus posteriores actualizaciones (2013,2015 y 2016).
Tipo de Metodología	Botton Up
Factores de Emisión	Del modelo IVE (International Vehicle Emissions), para los contaminantes VOC, CO, NO <sub>x</sub> , PM <sub>2.5</sub> , NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> O y CH <sub>4</sub> , ajustados con los resultados de los factores de emisión medidos en la región (Proyectos FEVA I* y FEVA II**). Los factores de emisión del CO <sub>2</sub> y SO <sub>2</sub> se calculan por balance de masa.
Fuente de Información	Base de datos de todos los vehículos registrados en las 10 secretarías de tránsito y transporte (STT) que conforman el Valle de Aburrá, además de las bases de datos del transporte público individual (TPI), transporte público colectivo (TPC), Metroplús y vehículos chatarrizados. Bases de datos de todos los Centros de Diagnóstico Automotor (CDAs) del Valle de Aburrá y de las unidades móviles de medición de gases del AMVA. Consumo total de gasolina y diésel facilitado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y consumo de gas natural vehicular (GNV) proporcionado por Empresas Públicas de Medellín (EPM) para el Valle de Aburrá en el 2018 Bases de datos del parque automotor de diferentes empresas de la región donde se especifica el consumo de combustible y los kilómetros recorridos al año 2018.

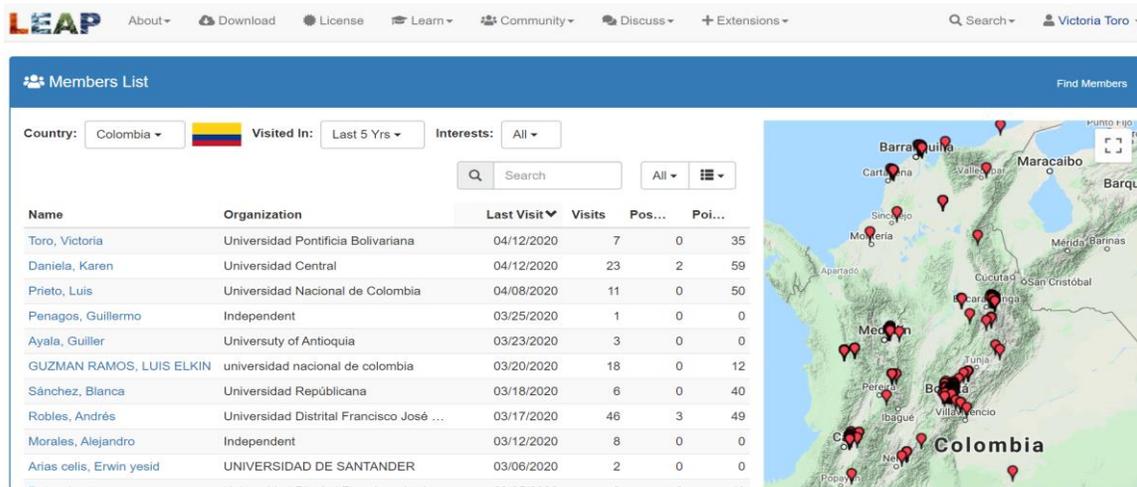
*Fuente: elaboración propia \* "Articulación Universidad-Empresa-Estado para establecer los factores de emisión reales de vehículos livianos y motocicletas en el Valle de Aburrá (FEVA-I)" (Convenio 1096 de 2016 entre el AMVA y la Universidad de Antioquia), \*\* "Articulación Universidad-Empresa-Estado 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).*

## 2.1. METODOLOGÍA

Para la estimación de las emisiones se ejecuta uno de los modelos más usados en el país - Modelo LEAP (Longe-range Energy

Alternatives Planning System) – tal como se visualiza en la Figura 6, dentro de los que se encuentra el IDEAM que usa el modelo para la estimación de emisiones en el país.

Figura 6 Usuarios de LEAP en Colombia



Fuente: <https://www.energycommunity.org/>

"LEAP es una herramienta de modelización integrada y basada en escenarios que se puede utilizar para rastrear el consumo de energía, la producción y la extracción de recursos en todos los sectores de una economía. Se puede utilizar para dar cuenta de las fuentes y sumideros de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector energético y del sector no energético. Además, de rastrear las emisiones de GEI, LEAP

también se puede usar para analizar las emisiones de contaminantes del aire locales y regionales" [1]

Los algoritmos usados para la estimación de las emisiones se describen en las siguientes ecuaciones con las variables asociadas (Heaps, 2016). (Tabla 2)

Tabla 2 Algoritmos de Cálculo de LEAP

Ecuaciones Generales	
	$\text{Emission}_{t,y,v,p} = \sum (\text{Stock}_{t,y,v} \times \text{Mileage}_{t,y,v} \times \text{EmissionFactor}_{t,v,p} \times \text{EmDegradation}_{t,y-v,p})$
Ecuación general para la estimación de emisiones para cualquier contaminante <b>p</b>	<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</p>

### Ecuaciones Generales

*Sales*: es el número de vehículos que entran al parque automotor en un año en particular, puede calcularse con información sobre las ventas históricas,  
*Survival*: la fracción de vehículos que sobreviven después de un determinado número de años.

$$FuelEconomy_{t,y,v} = FuelEconomy_{t,y} \times FeDegradation_{t,y-v}$$

Rendimiento del combustible por tipo de vehículo.

*FuelEconomy*: es el combustible utilizado por unidad de distancia recorrida por el vehículo,  
*FeDegradation*: es un factor que representa el cambio en el rendimiento de combustible a medida que el vehículo envejece. Es igual a 1 cuando  $y=v$ . Es igual a 1 cuando  $y=v$ .

Factor de Emisión: cantidad de contaminantes **p** que emite por cada kilómetro recorrido por tipo de vehículo tipo **t** y modelo **v**

*EmissionFactor*: International Vehicle emisión Factor (e.g. gramos/kilómetro) de un vehículo nuevo de modelo **v**,

$$V(t) = V(t - 1) \times \exp(t \times constant)$$

Factor de degradación que representa el cambio en el factor de emisión del contaminante **p** a medida que el vehículo envejece el vehículo **t y v**.

*t*: es la edad del vehículo en años.  
*V*: es el valor de la variable que se degrada, en este caso el kilometraje anual.  
*Constant(c)*: es un valor constante que se ajusta de acuerdo a los datos reales.

Emisión gases GEI. CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero)

$$Emission_{t,y,v,p} = EnergyConsumption_{t,y,v} \times EmissionFactor_{t,v,p} \times EmDegradation_{t,y-v,p}$$

Consumo de energía

$$EnergyConsumption_{t,y,v} = Stock_{t,y,v} \times Mileage_{t,y,v} \times FuelEconomy_{t,y,v}$$

Distancia recorrida

$$Mileage_{t,y,v} = Mileage_{t,y} \times MiDegradation_{t,y-v}$$

*Mileage*: es la distancia anual recorrida por el vehículo.  
*MiDegradation*: es un factor que representa el cambio en el kilometraje a medida que el vehículo envejece. Es igual a 1 cuando  $y=v$

Fuente: Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP)

## 2.2. DATOS DE ENTRADA

En esta sección se presentan los datos con los que se alimenta el modelo LEAP para obtener la demanda energética y las emisiones del parque automotor de Valle de Aburrá. Toda la información recolectada de las diferentes fuentes fue procesada en el programa R, lenguaje de programación que permite el manejo de grandes volúmenes de datos y un mejor análisis de la información.

### 2.2.1. CLASIFICACIÓN DEL PARQUE AUTOMOTOR

Tal como se mencionó anteriormente, los datos registrados en el sistema nacional de tránsito fueron recolectados y clasificados de acuerdo al tipo, tamaño, combustible y tecnología como lo requiere el modelo LEAP.

A cada nivel se le asocia una intensidad energética o rendimiento del combustible, un factor de emisión del modelo IVE y los

kilómetros recorridos. En la Tabla 3 se visualiza la distribución y caracterización vehicular y en la Figura 7 se muestra la

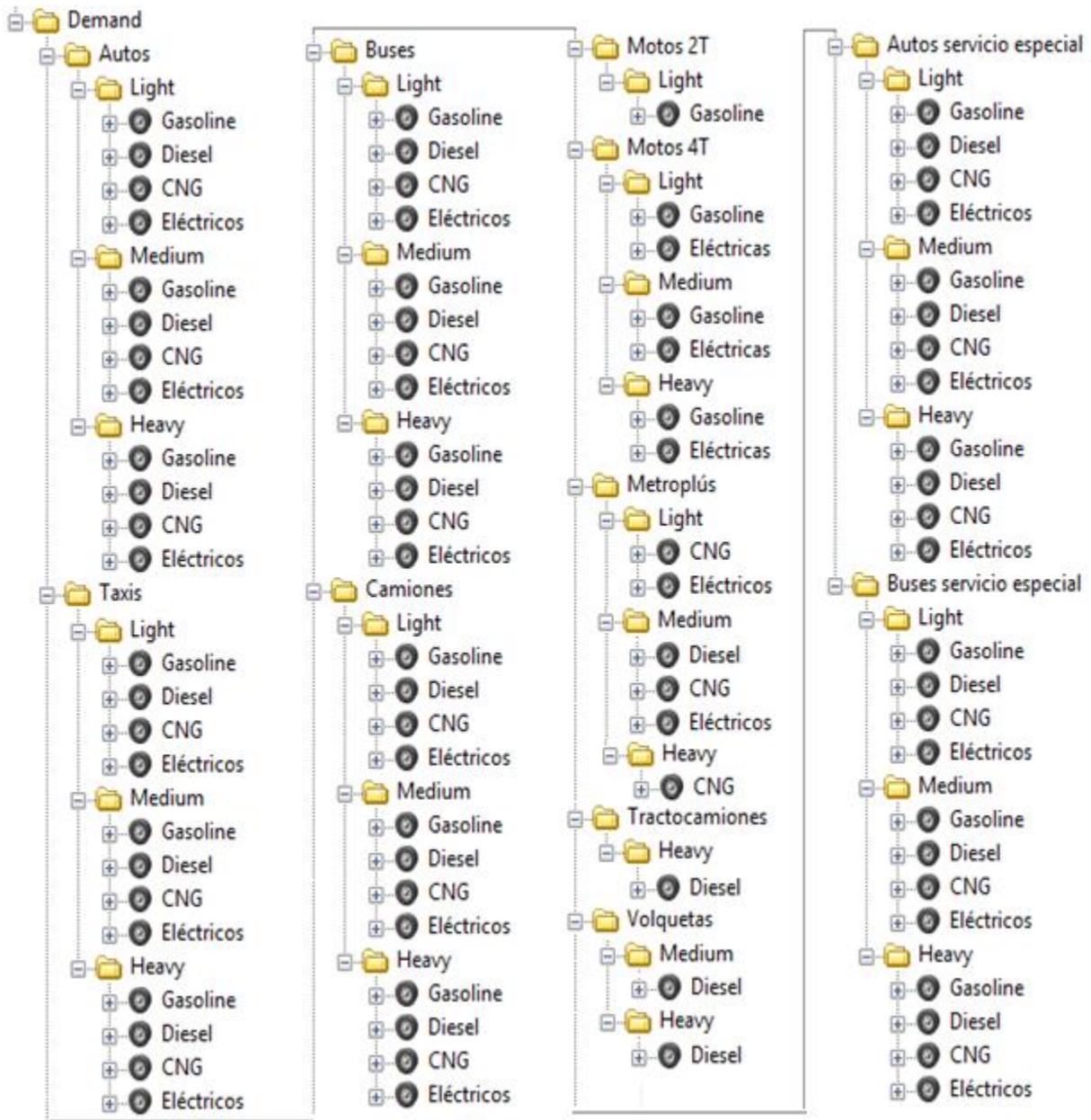
estructura de la tipología de los vehículos y combustibles del LEAP.

**Tabla 3 Distribución del parque automotor en el modelo LEAP**

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>Tamaño (centímetros cúbicos)</b>	<b>Tecnología de conversiones energía</b>
Autos	Livianos (cc ≤ 1500)	Motor a gasolina Motor a diésel Motor a gas natural vehicular (GNV)
Taxis	Medianos (1500 < cc ≤ 3000)	
Autos servicio especial	Pesados (cc > 3000)	
Motos 2T	Livianos (cc ≤ 100)	
Motos 4T	Medianos (100 < cc ≤ 300)	
	Pesados (cc > 300)	
Buses	Livianos (cc ≤ 3000)	
Buses servicio especial	Medianos (3000 < cc ≤ 6000)	
Camiones	Pesados (cc > 6000)	
Metroplús		
Tractocamiones		
Volquetas		

*Fuente: elaboración propia*

Figura 7 Árbol de categorías vehiculares utilizadas en el modelo LEAP



Fuente: elaboración propia

## 2.2.2. VEHÍCULOS REGISTRADOS

Con la información suministrada por las diez secretarías de tránsito y transporte (STT) de los municipios que conforman el Valle de Aburrá y tomando en cuenta solo los vehículos activos, en la Tabla 4 se presenta el número de vehículos registrados en la región divididos en existencias (stock) y ventas (sales), perteneciendo a la categoría “stock”

los vehículos de modelo anterior a 2018 y a la categoría “sales” los vehículos de modelo 2018.

*Para la presente actualización la información del tipo de combustible fue suministrada por las STT de los municipios que conforman el Valle de Aburrá y no se utilizó la distribución extraída utilizando los datos de los CDAs, como se venía trabajando en las anteriores actualizaciones.*

Tabla 4 Existencias y ventas de vehículos registrados en el Valle de Aburra para el año 2018\*

Categoría vehicular	Existencias (stock)	Ventas (sales)	Total
Autos	563,234	30,231	593,465
Taxis	29,410	1,019	30,429
Autos servicio especial	17,392	957	18,349
Buses	4,985	307	5,292
Buses servicio especial	14,227	222	14,449
Camiones	29,901	670	30,571
Motocicletas 2 Tiempos	19,765	0	19,765
Motocicletas 4 Tiempos	775,206	51,508	826,714
Metroplús	447	1	448
Tractocamiones	6,505	23	6,528
Volquetas	4,909	54	4,963
<b>TOTAL</b>	<b>1,465,981</b>	<b>84,992</b>	<b>1,550,973</b>

Fuente: elaboración propia con información suministrada por las STT y Movilidad AMVA \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

El modelo LEAP no solo requiere la cantidad de vehículos por categoría, sino también una discriminación porcentual por rango de cilindraje y tipo de combustible. En la Tabla 5 se muestra esta distribución porcentual en las columnas “Existencias” y “Ventas”, donde los números en negrita suman 100% (corresponde a las categorías autos, taxis, autos servicio especial, buses, buses servicio especial, buses, camiones, motos 2T, motos 4T, Metroplús, tractocamiones y volquetas); los números en

cursiva suman 100% dentro de cada categoría vehicular (corresponde a las subcategorías livianos, medianos, pesados) y los números en tipografía normal suman 100% dentro de cada subcategoría (corresponde a las tecnologías a gasolina, diésel, gas natural vehicular-GNV y eléctrico) y en la Figura 8 se observa la cantidad de vehículos empleando esta distribución.

Tabla 5 Distribución porcentual del parque automotor por categoría vehicular, cilindraje y tipo de combustible para el año 2018\*

		Existencias	Ventas
<b>AUTOS</b>		<b>38.42%</b>	<b>35.57%</b>
	Livianos (cc ≤ 1500)	42.25%	24.13%
	Gasolina	99.26%	99.77%
	Diésel	0.36%	0.00%
	GNV	0.34%	0.04%
	Eléctrico	0.04%	0.19%
	Medianos (1500 < cc ≤ 3000)	52.11%	71.94%
	Gasolina	92.89%	94.82%
	Diésel	5.60%	5.06%
	GNV	1.50%	0.11%
	Eléctrico	0.01%	0.02%
	Pesados (cc > 3000)	5.64%	3.93%
	Gasolina	93.41%	83.66%
	Diésel	4.27%	16.18%
	GNV	2.31%	0.17%
	Eléctrico	0.01%	0.00%
<b>TAXIS</b>		<b>2.01%</b>	<b>1.20%</b>
	Livianos (cc ≤ 1500)	84.10%	68.11%
	Gasolina	99.52%	100%
	Diésel	0.19%	0.00%
	GNV	0.29%	0.00%
	Medianos (1500 < cc ≤ 3000)	14.93%	31.11%
	Gasolina	53.60%	90.54%
	Diésel	44.26%	9.15%
	GNV	2.14%	0.32%
	Pesados (cc > 3000)	0.97%	0.79%
	Gasolina	55.79%	87.50%
	Diésel	43.51%	12.50%
	GNV	0.70%	0.00%
<b>AUTOS SERVICIO ESPECIAL</b>		<b>1.19%</b>	<b>1.13%</b>
	Livianos (cc ≤ 1500)	33.19%	23.09%
	Gasolina	91.58%	95.93%
	Diésel	2.13%	3.62%
	GNV	5.96%	0.00%
	Eléctrico	0.33%	0.45%
	Medianos (1500 < cc ≤ 3000)	59.69%	70.74%
	Gasolina	50.57%	48.74%
	Diésel	37.10%	51.56%
	GNV	12.28%	0.00%
	Eléctrico	0.05%	0.00%
	Pesados (cc > 3000)	7.12%	6.17%
	Gasolina	69.87%	28.81%
	Diésel	27.87%	71.19%
	GNV	2.26%	0.00%
<b>BUSES</b>		<b>0.34%</b>	<b>0.36%</b>

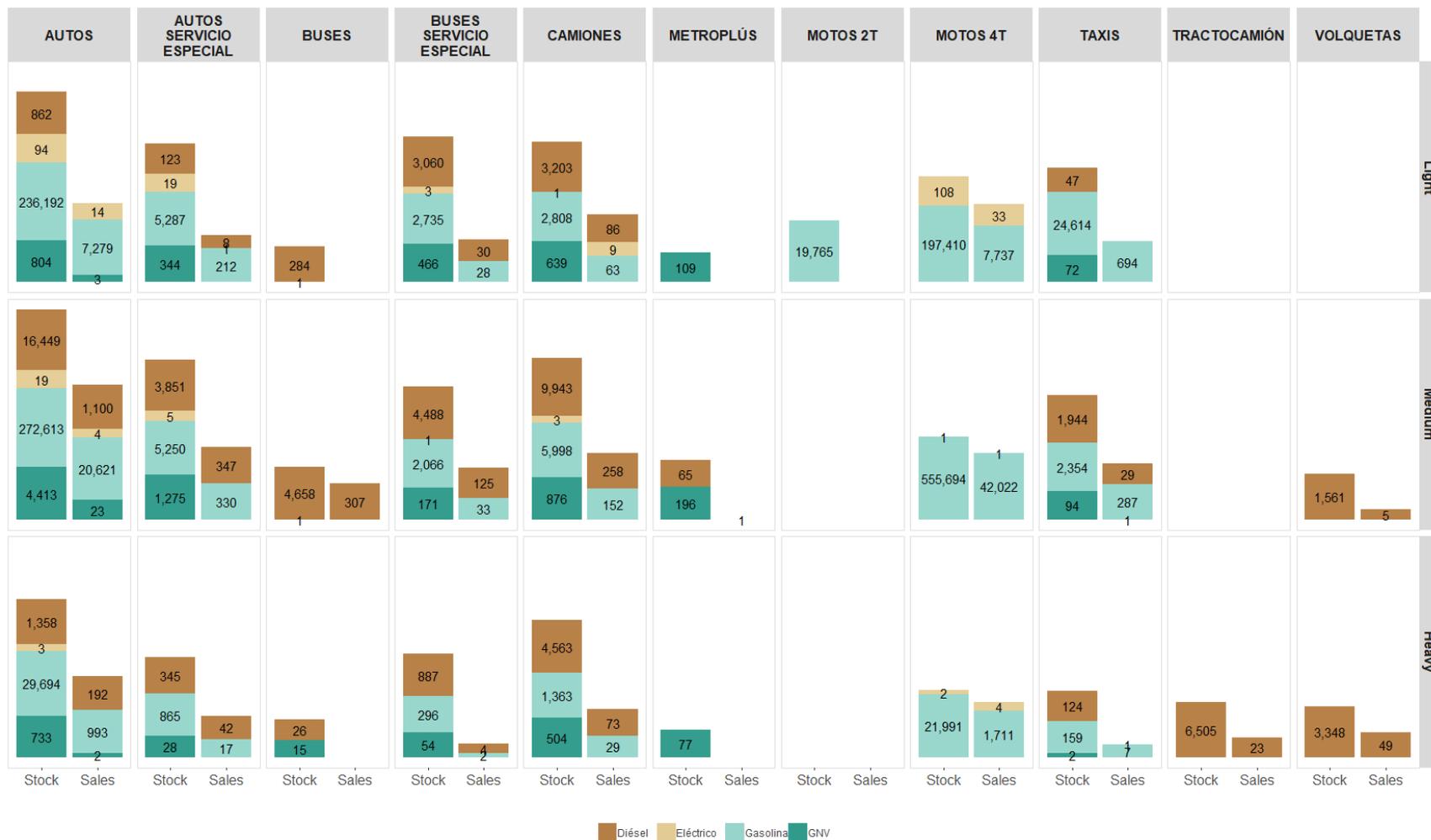
**ACTUALIZACIÓN INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DEL VALLE DE ABURRÁ – AÑO 2018**

		<b>Existencias</b>	<b>Ventas</b>
	Livianos (cc ≤ 3000)	5.72%	0.00%
	Gasolina	0.00%	0.00%
	Diésel	99.65%	0.00%
	GNV	0.35%	0.00%
	Medianos (3000 < cc ≤ 6000)	93.46%	100%
	Gasolina	0.02%	0.00%
	Diésel	99.98%	100%
	GNV	0.00%	0.00%
	Pesados (cc > 6000)	0.82%	0.00%
	Gasolina	0.00%	0.00%
	Diésel	63.41%	0.00%
	GNV	36.59%	0.00%
<b>BUSES SERVICIO ESPECIAL</b>		<b>0.97%</b>	<b>0.26%</b>
	Livianos (cc ≤ 3000)	44.03%	26.13%
	Gasolina	43.66%	48.28%
	Diésel	48.85%	51.72%
	GNV	7.44%	0.00%
	Eléctrico	0.05%	0.00%
	Medianos (3000 < cc ≤ 6000)	47.28%	71.17%
	Gasolina	30.72%	20.89%
	Diésel	66.73%	79.11%
	GNV	2.54%	0.00%
	Eléctrico	0.01%	0.00%
	Pesados (cc > 6000)	8.69%	2.70%
	Gasolina	23.93%	33.33%
	Diésel	71.71%	66.67%
	GNV	4.37%	0.00%
<b>CAMIONES</b>		<b>2.04%</b>	<b>0.79%</b>
	Livianos (cc ≤ 3000)	22.24%	23.58%
	Gasolina	42.22%	39.87%
	Diésel	48.16%	54.43%
	GNV	9.61%	0.00%
	Eléctrico	0.02%	5.70%
	Medianos (3000 < cc ≤ 6000)	56.25%	61.19%
	Gasolina	35.66%	37.07%
	Diésel	59.11%	62.93%
	GNV	5.11%	0.00%
	Eléctrico	0.02%	0.00%
	Pesados (cc > 6000)	21.50%	15.22%
	Gasolina	21.20%	28.43%
	Diésel	70.96%	71.57%
	GNV	7.84%	0.00%
<b>MOTOS 2T</b>		<b>1.35%</b>	<b>0.00%</b>
	Livianos (cc ≤ 100)	100%	0.00%
	Gasolina	100%	-

		Existencias	Ventas
<b>MOTOS 4T</b>		<b>52.88%</b>	<b>60.60%</b>
	Livianos (cc ≤ 100)	25.48%	15.09%
	Gasolina	99.95%	99.58%
	Eléctrico	0.05%	0.42%
	Medianos (100 < cc ≤ 300)	71.68%	81.59%
	Gasolina	100%	100%
	Eléctrico	0.00%	0.00%
	Pesados (cc > 300)	2.84%	3.33%
	Gasolina	99.99%	99.77%
	Eléctrico	0.01%	0.23%
<b>METROPLÚS</b>		<b>0.03%</b>	<b>0.00%</b>
	Livianos (cc ≤ 3000)	24.38%	0.00%
	GNV	100%	-
	Medianos (3000 < cc ≤ 6000)	58.39%	100%
	Diésel	24.90%	0.00%
	GNV	75.10%	0.00%
	Eléctrico	0.00%	100%
	Pesados (cc > 6000)	17.23%	0.00%
	GNV	100%	0.00%
<b>TRACTOCAMIONES</b>		<b>0.44%</b>	<b>0.03%</b>
	Pesados ( cc > 6000)	100%	100%
	Diésel	100%	100%
<b>VOLQUETAS</b>		<b>0.33%</b>	<b>0.06%</b>
	Medianos (3000 < cc ≤ 6000)	31.80%	9.26%
	Diésel	100%	100%
	Pesados ( cc > 6000)	68.20%	90.74%
	Diésel	100%	100%

Fuente: elaboración propia con información suministrada por las STT y Movilidad AMVA \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Figura 8 Cantidad de vehículos distribuidos en existencias y ventas, categoría vehicular, cilindraje y tipo de combustible para el año 2018\*



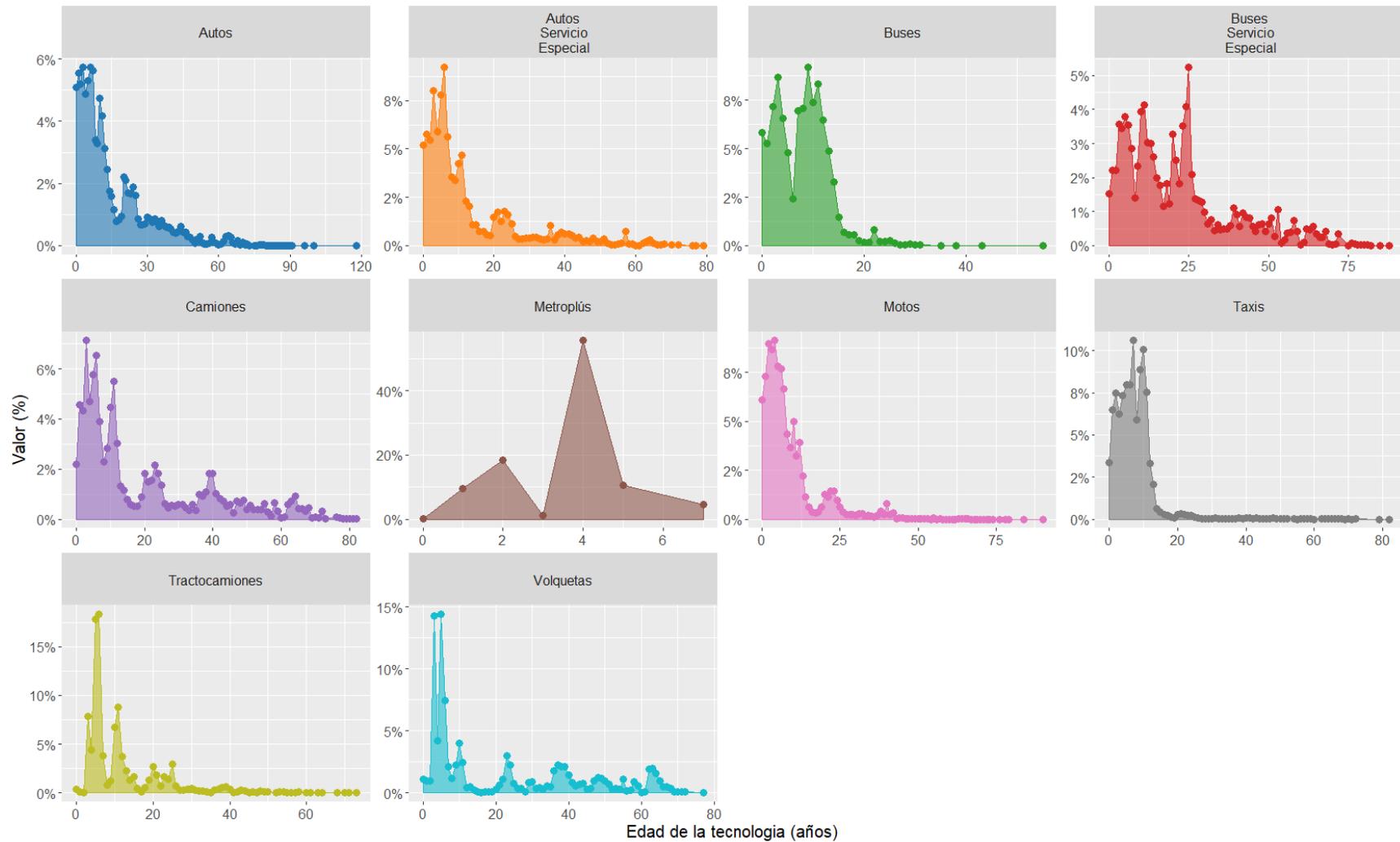
Fuente: elaboración propia con información suministrada por las STT y Movilidad AMVA \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

### **2.2.3. PERFIL DE ANTIGÜEDAD**

El perfil de antigüedad de los vehículos existentes es un perfil de ciclo de vida que describe la distribución etaria del parque automotor. Este perfil es asociado en el modelo LEAP a cada una de las tecnologías descritas anteriormente (por categoría vehicular, rango de cilindraje y tipo de combustible), en total se crean 70 perfiles de antigüedad con el fin de describir el parque automotor con la mayor exactitud posible (ver Anexo 2.1).

En la Figura 9 se presentan los perfiles de antigüedad por categoría vehicular donde se observa por ejemplo que para las categorías de motos, taxis, autos y autos de servicio especial, tienen en su mayoría menos de diez años de antigüedad lo que indica que cuenta con una proporción importante de tecnologías nuevas; en la categoría de buses aproximadamente el 80% tiene menos de veinte años de antigüedad y por último en las categorías de buses de servicio especial, camiones y volquetas se observa una proporción importante de vehículos de más de 25 años de antigüedad que se asocia a tecnologías más antiguas sin sistemas de control de emisiones.

Figura 9 Perfil de antigüedad por categoría vehicular del parque automotor del Valle de Aburrá para el año 2018\*



Fuente: elaboración propia con información suministrada por las STT y Movilidad AMVA \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

## 2.2.4. KILOMETRAJE

La distancia anual recorrida por vehículo VKT (Vehicle Kilometer Travelled) fue estimada a partir de diferentes fuentes:

- Categoría de autos, taxis, autos de servicio especial y motocicletas: se obtuvieron datos de kilometraje de concesionarios, páginas web de venta de vehículos y de los CDAs (Centros de Diagnóstico Automotor) del Valle de Aburrá; en el caso de las motos se contó con la colaboración de una empresa ensambladora de motos de la región.
- Camiones, volquetas, buses de servicio especial y tractocamiones: se contó con las bases de datos del parque automotor de algunas empresas transportadoras y de paquetero; para la categoría de tractocamiones los datos se estimaron a partir de información suministrada por el gremio de transporte de carga, en este caso, se asume que, de la distancia total recorrida por un tractocamión en un año, apenas una pequeña fracción se realiza dentro del Valle de Aburrá.
- Metroplús: se obtuvo información de kilómetros recorridos en el 2018 para cada uno de los vehículos de la Secretaría de Movilidad de Medellín
- Buses TPC (transporte público colectivo): se obtuvo información de los kilómetros recorridos totales por cuenca por parte de movilidad del Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Es importante anotar que solo se requiere una estimación inicial del kilometraje (VKT<sub>0</sub>), pues esta variable se ajusta con el rendimiento del combustible, es decir, hasta cerrar el balance energético, de tal manera que la demanda de energía

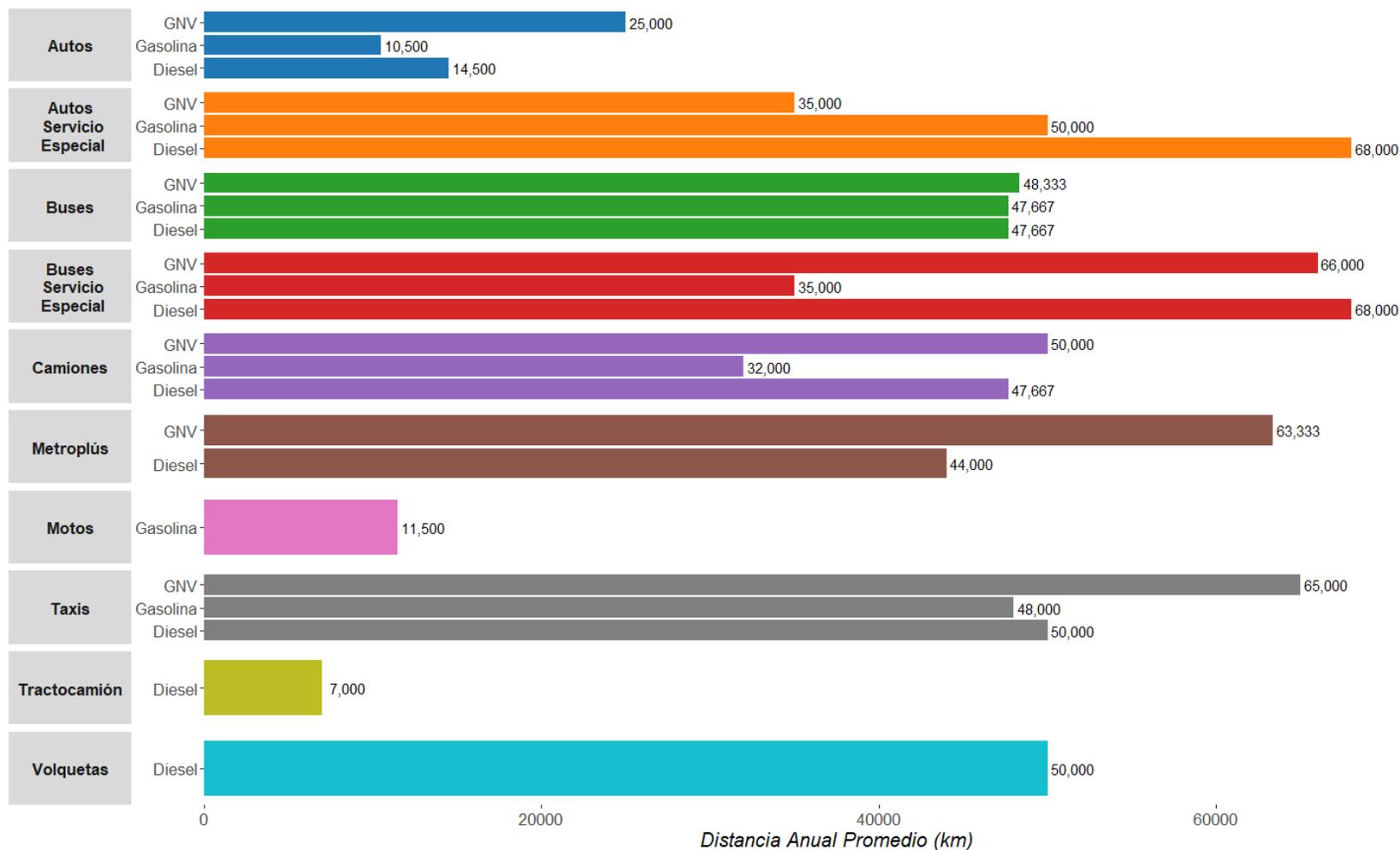
estimada sea igual a la demanda de energía real a partir de los consumos de gasolina, diésel y gas natural vehicular en el Valle de Aburrá. Así, al ajustar el balance energético se estimaron los kilómetros anuales recorridos promedio en el primer año de vida, cuyos valores se presentan en la Figura 10.

En esta figura se puede apreciar que los automóviles recorren una distancia anual que varía entre 10,500 y 25,000 km dependiendo del tipo de combustible. Los autos de servicio especial, taxis, metroplús y buses de servicio especial, son los vehículos que recorren mayor distancia anual con un promedio ponderado de 60,000 km, seguidos por las volquetas con 50,000 km. En cuanto a los camiones y los buses presentan un promedio de 45,000 km y las motos y tractocamiones un promedio anual de 11,500 y 7,000 km respectivamente.

La metodología empleada para determinar el perfil de degradación del kilometraje anual, el cual describe el modo en que decrece la distancia anual recorrida a medida que el vehículo envejece, se describe más a fondo en el informe final del inventario de fuentes móviles año base 2011 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2012).

*Los kilómetros recorridos de la categoría volquetas fue corroborada con información suministrada del Contrato "Estudio de Transporte de Carga en el Área Metropolitana del Valle del Aburrá", suscrito entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, donde se estimó un total de minutos por viaje día, incluyendo el tiempo estacionados mientras están cargando de 94.6 minutos y asumiendo una velocidad promedio de 35 km por hora, se estima un total de 182 kilómetros al día y si esto es multiplicado por 282 días laborales se tiene que en promedio en un año recorren 51,416 kilómetros.*

Figura 10 Kilometraje promedio anual recorrido por los vehículos en el Valle de Aburrá para el año 2018\*



Fuente: elaboración propia Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

### 2.2.5. RENDIMIENTO DEL COMBUSTIBLE

Como se viene realizando desde la implementación del modelo LEAP en el inventario del 2011, la información relacionada con el rendimiento de combustible fue obtenida del modelo International Vehicle Emissions, IVE, el cual fue desarrollado por el International Sustainable Systems Research Center (Davis, Lents, Osses, Nikkila, & Barth, 2005). Además, para la categoría motocicletas se obtuvo información por parte de una empresa ensambladora de este tipo de vehículos asentada en la región en la actualización realizada con año base 2015 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2013)

### 2.2.6. FACTORES DE EMISIÓN

Un factor de emisión vehicular se define como la relación entre una cantidad emitida de determinado contaminante por longitud y usualmente es expresado en gramos/kilómetro. Desde el 2011 y en las posteriores actualizaciones del inventario de fuentes móviles se vienen utilizando los factores de emisión del modelo International IVE (Vehicle Emissions) acorde con las tecnologías vehiculares disponible y corregidos a condiciones locales (humedad del 68% y altura de 1,538 msnm) y calidad del combustible, además se tienen en cuenta el calendario de introducción de tecnologías vehiculares con el fin de seleccionar adecuadamente los factores de emisión base (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2013).

De esta manera, del modelo IVE se obtienen los factores de emisión para los contaminantes VOC, CO, NO<sub>x</sub>, PM, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O

y CH<sub>4</sub>. Es importante resaltar que las emisiones de partículas por los tubos de escape vehiculares se ubican principalmente en el rango de tamaño del PM<sub>2,5</sub>, por lo tanto, todos los factores de emisión de PM corresponden a PM<sub>2,5</sub>. (Davis, Lents, Osses, Nikkila, & Barth, 2005)

También se incluyeron los factores de emisión medidos de PM<sub>2,5</sub>, CO y NO<sub>x</sub> por el proyecto FEVA I para motos 4T y autos a gasolina y de FEVA II para buses y camiones diésel en el perfil de degradación del factor de emisión, donde solo se modifica el valor del modelo medido en las categorías que aplica según la descripción de la tecnología vehicular medida y las que se venían trabajando con el modelo IVE.

En cuanto a los factores de emisión de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, estos se calculan por balance de masa asumiendo que todo el carbono y el azufre en el combustible se convierten en CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>, suposición válida, pues, aunque se generan otros contaminantes derivados del carbono y el azufre, las cantidades son mínimas si se comparan con el CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> producido.

El contenido de azufre para el presente informe se tomó del estudio “Evaluación de la conformidad en muestras de combustibles líquidos diésel y gasolina en sitios de distribución, mayorista y estaciones de servicio del Área Metropolitana del Valle de Aburrá” realizado entre la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá en el año 2018. En la Tabla 6 se presentan los respectivos factores de emisión calculados, en unidades de kilogramo/Terajoule.

Tabla 6 Factores de emisión de CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>\*

Combustible	PCI (MJ/kg) <sup>1</sup>	Contenido de C (%) <sup>1</sup>	Contenido de S (ppm) <sup>2</sup>	Factor de emisión (kg/TJ)	
				CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>
Gasolina	45.02	86.5	115.9	70,450.4	5.15
Diésel	43.98	86.4	13.9	72,034.0	0.63
Gas natural vehicular	47.12	73.0	0.1	56,804.4	0.0042

Fuente: <sup>1</sup> Unidad de Planeación Minero Energética. <sup>2</sup> AMVA-UNAL 2018 \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

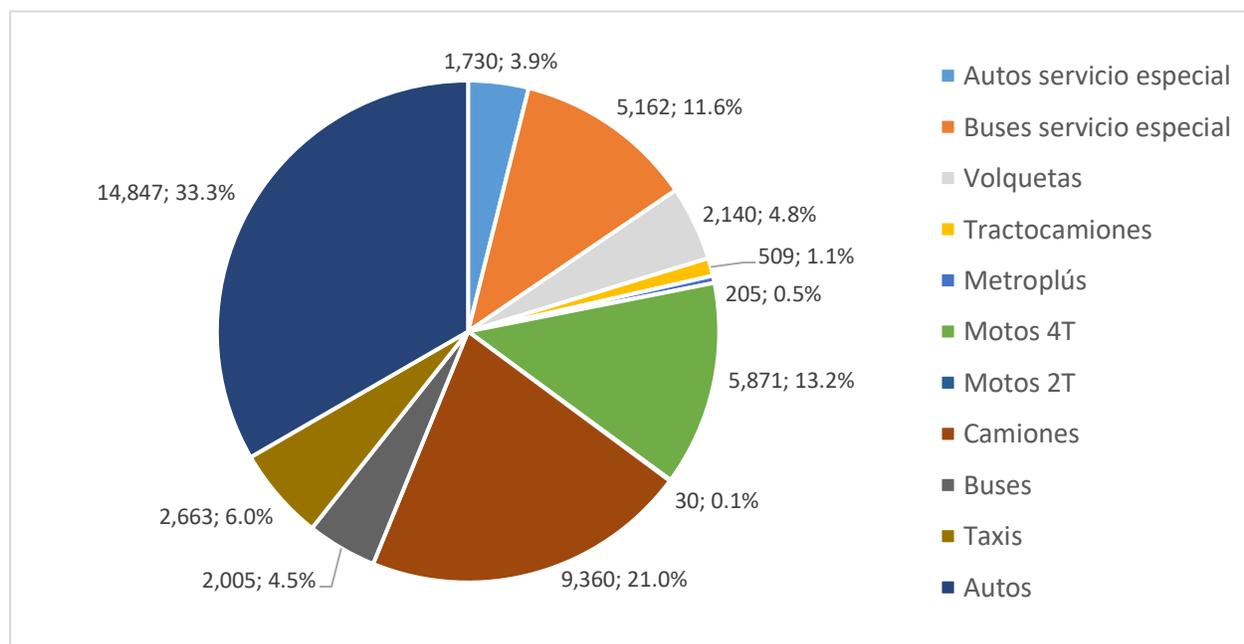
## 2.3. RESULTADOS

### 2.3.1. DEMANDA ENERGÉTICA DEL PARQUE AUTOMOTOR

De acuerdo a los resultados arrojados por el modelo LEAP con relación a la demanda energética del parque automotor del Valle de Aburrá discriminada por categoría vehicular (ver Figura 11), los

automóviles y los camiones son las categorías que lideran la demanda, los cuales consumieron respectivamente el 33.3% y el 21% del total de energía; después de éstas categorías se ubican las motos 4T y los buses de servicio especial demandando respectivamente el 13.2% y 11.6%, y por último se ubican los taxis que consumen tan solo el 6%.

Figura 11 Demanda energética del parque automotor del Valle de Aburrá por categoría vehicular (TJ), año 2018\*

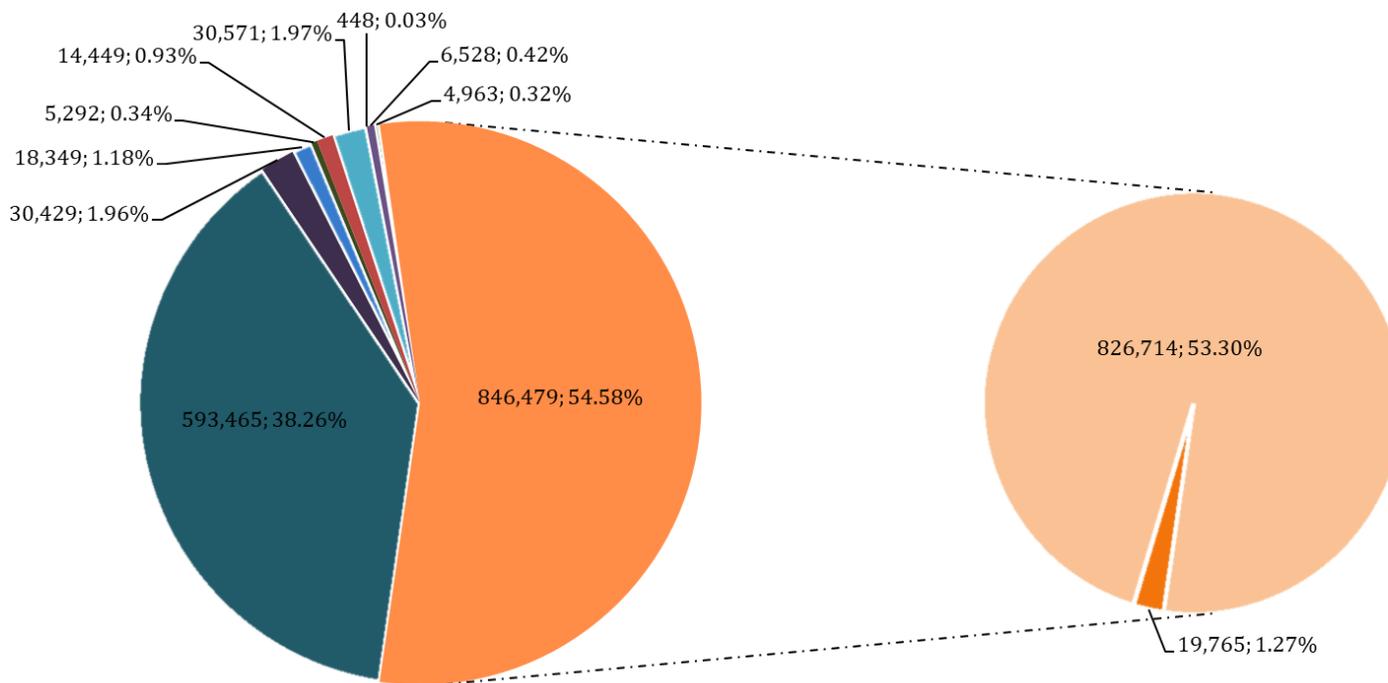


Fuente: elaboración propia \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

### **2.3.2. COMPOSICIÓN DEL PARQUE AUTOMOTOR DEL VALLE DE ABURRÁ**

Para el año 2018 el parque automotor estaba conformado por 1,550,973 vehículos, de los cuales la mayoría son motocicletas (54.58%) (ver Figura 12), seguida por la categoría automóviles (38.26%). Dentro de la categoría de motos, el 53.30% corresponden a motos 4T y el 1.27% a motos 2T; para el 7.16% que corresponde a otras categorías, se tiene que los camiones y los taxis son la mayoría con un 1.97% y 1.96% respectivamente seguidos de las categorías de autos de servicio especial con un 1.18% y los buses de servicio especial con un 0.93% de participación.

Figura 12 Composición del parque automotor del Valle de Aburrá, año 2018\*



- Automóviles
- Taxis
- Autos servicio especial
- Buses
- Buses servicio especial
- Camiones
- Metroplús
- Tractocamiones
- Volquetas
- Motos 2T
- Motos 4T

Fuente: elaboración propia \*Convención: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

### 2.3.3. EMISIONES DE CONTAMINANTES CRITERIO

La Tabla 7 presenta las emisiones de contaminante criterio discriminadas por categoría vehicular y de la Figura 13 a la Figura 17 la distribución porcentual del aporte de cada una de las categorías a estos contaminantes.

En estas graficas se puede observar que los camiones son los mayores emisores de PM<sub>2.5</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y VOC, aportando 37.2%, 54.2%, 39.2% y un 51% del total de las emisiones respectivamente. Las volquetas y los buses de servicio especial son las que siguen en aporte de emisiones. La categoría

que más aporta a los SO<sub>x</sub> son los autos con un 48.8% seguido de las motos 4T y los camiones con un 20.9% y un 10.4% respectivamente.

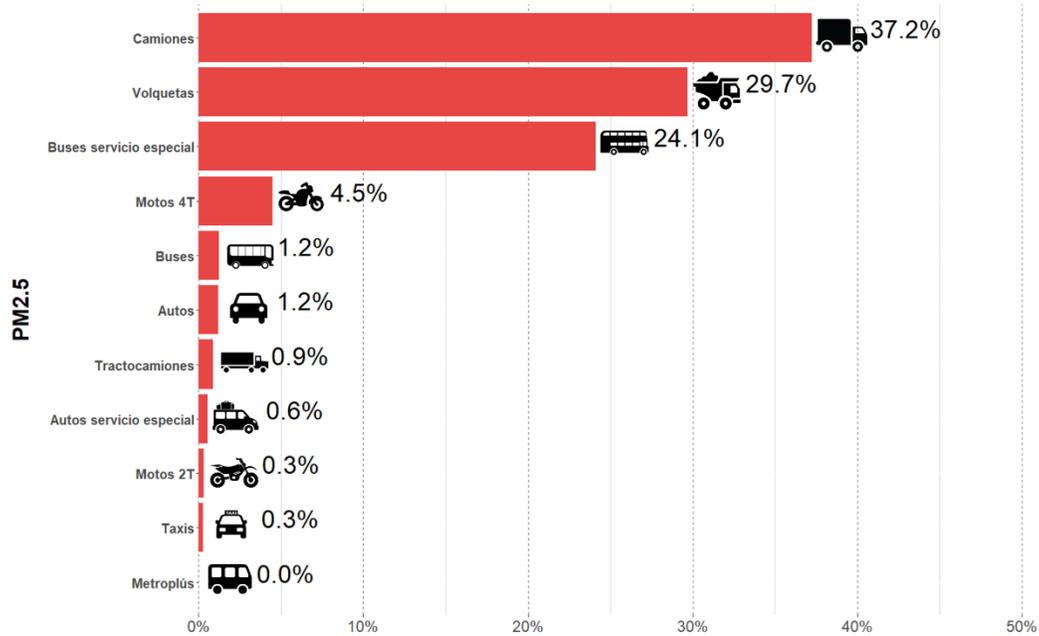
Lo que más se resalta en este punto es que los camiones, siendo una de las categorías con menor cantidad de vehículos, son los que mayor aporte hacen a las emisiones. Esto se debe principalmente a la edad del parque automotor, puesto que existen vehículos con más años de antigüedad que el promedio de las demás categorías, influyendo en la escogencia del factor de emisión y por tanto en el resultado de las emisiones.

Tabla 7 Emisión de contaminantes criterio por categoría vehicular (t), año 2018\*

Categoría	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	VOC	PM <sub>2.5</sub>
Autos	32,189	2,256	70	1,846	31
Taxis	873	223	13	79	7
Autos servicio especial	1,767	254	5	84	15
Buses	613	935	1	112	33
Buses servicio especial	200,133	4,091	8	11,023	633
Camiones	304,771	6,474	15	16,707	978
Motos 2T	828	1	0	353	8
Motos 4T	19,421	608	30	2,189	118
Metroplús	117	11	0	1	0
Tractocamiones	273	319	0	52	23
Volquetas	1,572	1,351	1	290	780
TOTAL	562,557	16,522	144	32,736	2,625

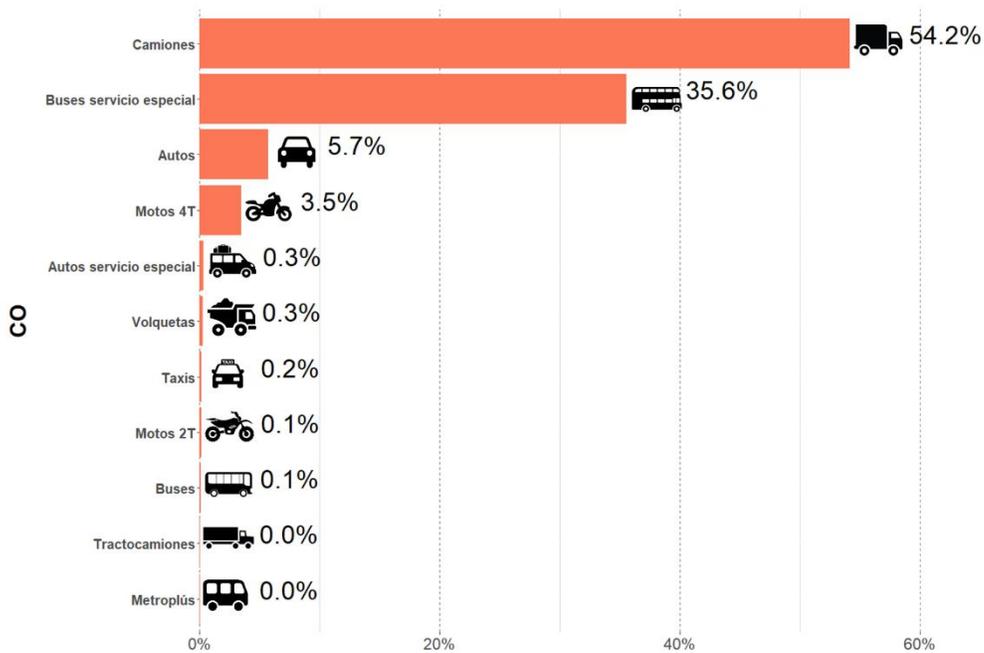
Fuente: elaboración propia \*Convención: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Figura 13 Distribución de emisiones de PM<sub>2.5</sub> por categoría vehicular, año 2018\*



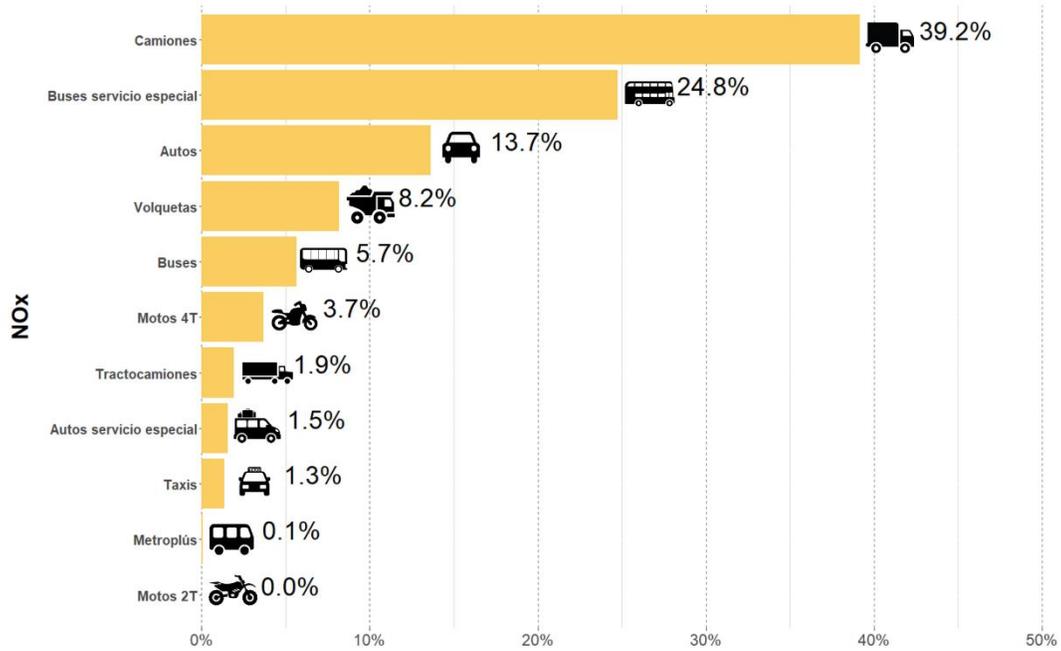
Fuente: elaboración propia \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Figura 14 Distribución de emisiones de CO por categoría vehicular, año 2018\*



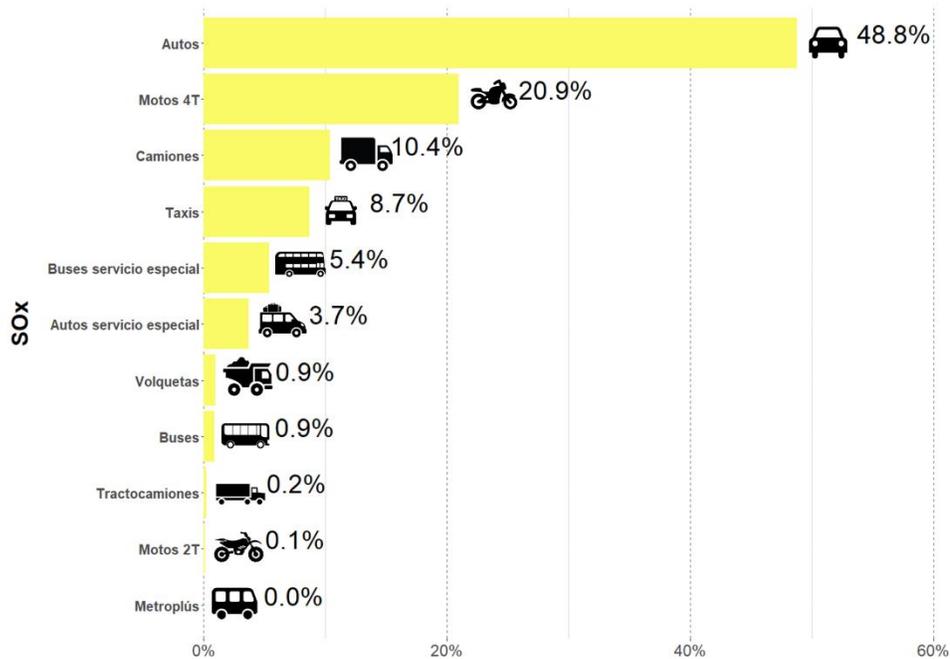
Fuente: elaboración propia \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Figura 15 Distribución de emisiones de NO<sub>x</sub> por categoría vehicular, año 2018\*



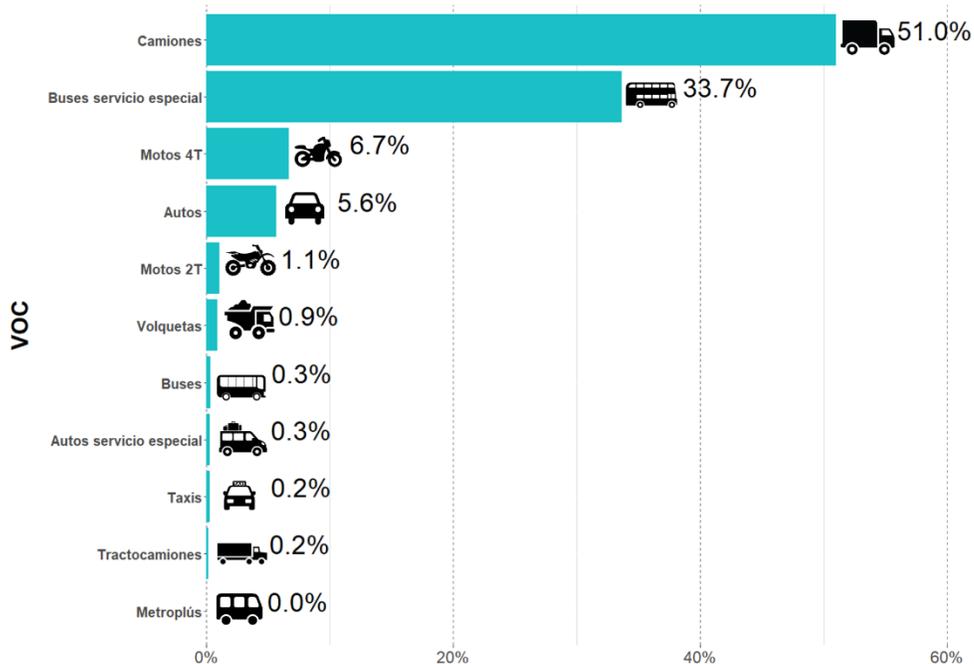
Fuente: elaboración propia \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Figura 16 Distribución de emisiones de SO<sub>x</sub> por categoría vehicular, año 2018\*



Fuente: elaboración propia \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Figura 17 Distribución de emisiones de VOC por categoría vehicular, año 2018\*



Fuente: elaboración propia \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Las emisiones por tipo de combustible se presentan en la Tabla 8 y la Figura 18. Se observa que la gasolina es el principal responsable por las emisiones de CO, SO<sub>x</sub> y VOC, con el 94%, 93% y 94% respectivamente. El diésel es el principal

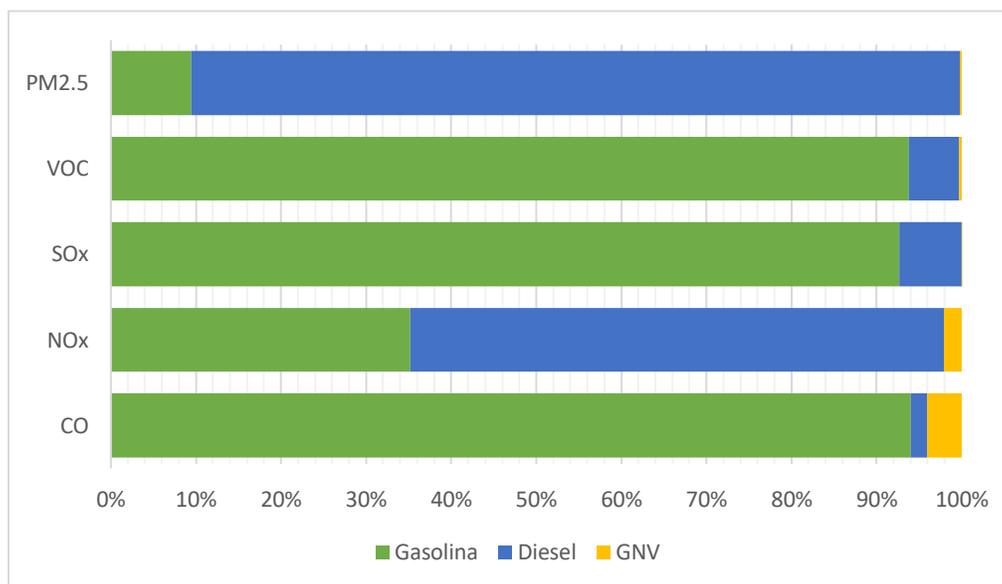
aportante de NO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub> con el 63% y el 90% de las emisiones de estos contaminantes. El GNV por su parte hace una contribución principal a las emisiones de CO con el 4% y en un 2% al NO<sub>x</sub>.

Tabla 8 Emisión de contaminantes criterio por tipo de combustible (t), año 2018\*

Combustible	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	VOC	PM <sub>2.5</sub>
Gasolina	529,077	5,819	134	30,709	248
Diésel	10,742	10,357	11	1,921	2,371
GNV	22,738	347	0	105	6
TOTAL	562,557	16,522	144	32,736	2,625

Fuente: elaboración propia \*Convención: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Figura 18 Distribución de emisiones por tipo de combustible, año 2018



Fuente: elaboración propia

### 2.3.4. EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO

Se analizaron las emisiones de dióxido de carbono, metano y óxido nitroso, así como de CO<sub>2</sub> equivalente utilizando los potenciales

de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) presentados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en el 4° Reporte de Evaluación. En la Tabla 9 se muestran los GWP usados.

Tabla 9 Potenciales de Calentamiento Global

Gas de efecto invernadero	GWP en 100 años
Dióxido de carbono	1
Metano	25
Óxido nitroso	298

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 10 y la Figura 19 se presentan las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de las fuentes móviles en el Valle de Aburrá. En éstas se observa que son los autos la categoría responsable por la mayoría de las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y óxido nitroso

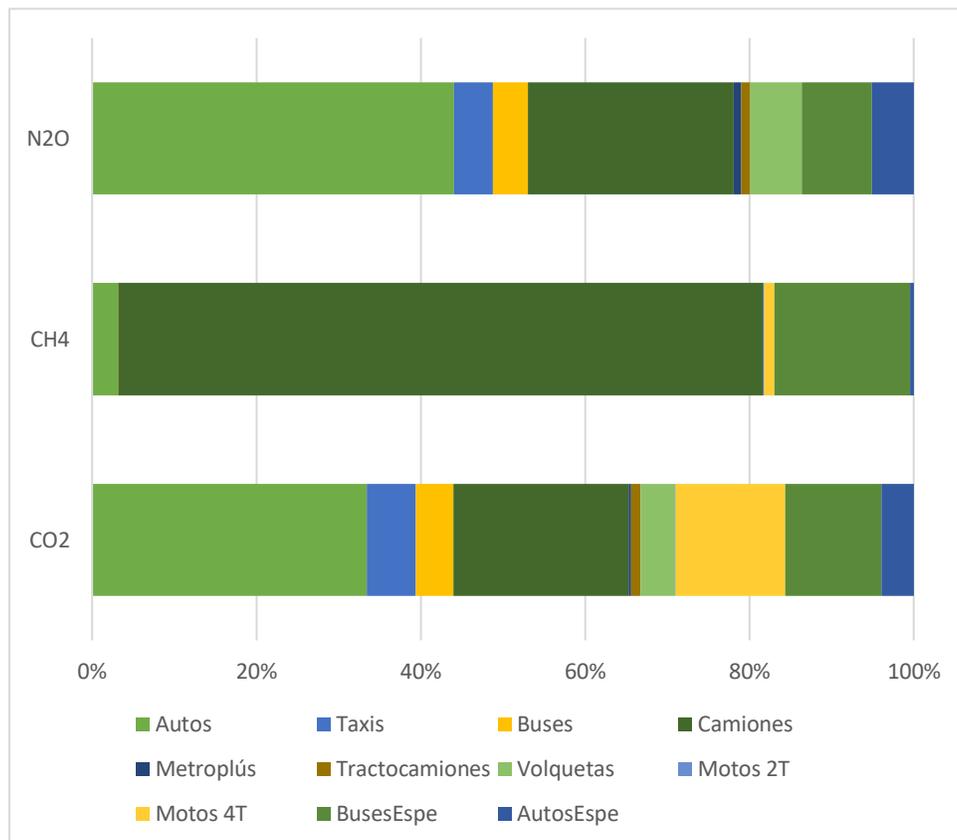
(N<sub>2</sub>O); no obstante, se resalta la contribución de la categoría camiones y la categoría de buses especiales a las emisiones de metano (CH<sub>4</sub>).

Tabla 10 Emisión de gases de efecto invernadero por categoría vehicular (t), año 2018\*

Categoría	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Autos	1,039,677	1,627	50
Taxis	187,664	20	6
Autos servicio especial	121,376	224	6
Buses	144,320	13	5
Buses servicio especial	366,054	8,490	10
Camiones	661,207	40,291	28
Motos 2T	2,117	46	0
Motos 4T	413,573	644	0
Metroplús	11,986	20	1
Tractocamiones	36,687	0	1
Volquetas	154,135	0	7
TOTAL	3,138,795	51,376	113
CO <sub>2</sub> -eq	4,456,974		

Fuente: elaboración propia \*Convención: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Figura 19 Distribución de emisiones de gases de efecto invernadero por categoría vehicular, año 2018



Fuente: elaboración propia

### 2.3.5. OTRAS EMISIONES

Aparte de los contaminantes criterio y los gases de efecto invernadero se estiman las emisiones de contaminantes no convencionales.

En la Tabla 11 se presentan las emisiones de algunos aromáticos especiados de los VOC los cuales pueden ser considerados tóxicos. Se adjunta archivo digital con los demás contaminantes no convencionales estimados dentro del presente inventario (Anexo 2.2)

Tabla 11 Emisión de algunos aromáticos por categoría vehicular (t), año 2018\*

Categoría	toluene	ethylbenzene	m,p-xylene	o-xylene	benzene
Autos	230	86	119	81	123
Taxis	10	4	5	3	5
Autos servicio especial	9	3	4	3	5
Buses	1	0	1	0	2
Buses servicio especial	1,338	498	696	472	720
Camiones	2,039	759	1,062	719	1,093
Motos 2T	45	17	24	16	24
Motos 4T	281	105	146	99	149
Metroplús	0	0	0	0	0
Tractocamiones	0	0	1	0	0
Volquetas	1	0	2	1	3
<b>TOTAL</b>	<b>3,953</b>	<b>1,472</b>	<b>2,060</b>	<b>1,394</b>	<b>2,124</b>

Fuente: elaboración propia \*Convención: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

### 3. FUENTES MÓVILES FUERA DE RUTA (OFF-ROAD)

En Colombia la resolución 910 de 2008 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial (MAVCT hoy MADS) define la maquinaria o vehículos NONROAD a cualquier máquina móvil, equipo industrial transportable o cualquier vehículo con o sin carrocería, que no ha sido diseñado para el transporte de pasajeros o carga en carretera, en el cual se ha instalado una máquina de combustión interna. Esta definición incluye, pero no está limitada a las maquinas instaladas en: \*Plataformas industriales de perforación, compresores, entre otros, \*Equipos de construcción, incluyendo motoniveladoras, tractores, excavadores hidráulicos, cargadores, entre otros, \*Equipos agrícolas, trilladoras, entre otros, \*Equipos para la silvicultura, \*Vehículos agrícolas auto-propulsados, \*Equipos para el manejo de materiales, \*Camiones para cargar y levantar, \*Equipos de mantenimiento de carreteras, \*Equipos para limpieza de nieve, \*Equipos para el soporte terrestre en los aeropuertos, \*Ascensores, \*Grúas móviles, \*Cuatrimotos. Los equipos que no están incluidos en esta definición son los barcos, las locomotoras, los aviones y los equipos de generación.

Una vez definidas las fuentes móviles fuera de ruta, en este capítulo se presenta la recopilación bibliográfica de las principales metodologías internacionales para el cálculo de las emisiones asociadas a las fuentes móviles fuera de ruta o para este caso la maquinaria pesada del sector de la construcción.

Además, se recopilan y describen los antecedentes nacionales más relevantes, con el objeto de conocer cómo está definido y regulado este sector, asimismo se recaba la información de la maquinaria de construcción existente en el Valle de Aburrá.

#### 3.1. LEGISLACIÓN INTERNACIONAL.

Se revisaron en los antecedentes internacionales dos metodologías para realizar el inventario de emisiones, las cuales se presentan a continuación:

1. Metodología EURO.
2. Metodología EPA.

En ambos casos la ecuación base es la siguiente:

$$E_i = N \times NA \times kW \times LF \times EF_i$$

Dónde:

$E_i$  = Emisiones del contaminante  $i$  durante el período, en [g],

$N$  = Población (unidades),

$NA$  = Nivel de actividad (horas de uso en el período), [h],

$kW$  = Potencia nominal promedio de la población, [kW],

$LF$  = Factor de carga típica (Load Factor, LF). Representa la fracción de la potencia nominal a la que típicamente opera la maquinaria.

$EF_i$  = Factor de emisión del contaminante  $i$  por unidad de trabajo [g/kW-h]

La metodología de la EPA corresponde a la definida en el documento "Exhaust and Crankcase Emission Factors for Nonroad Engine Modeling--Compression-Ignition", EPA Report No. NR-009d, July 2010.

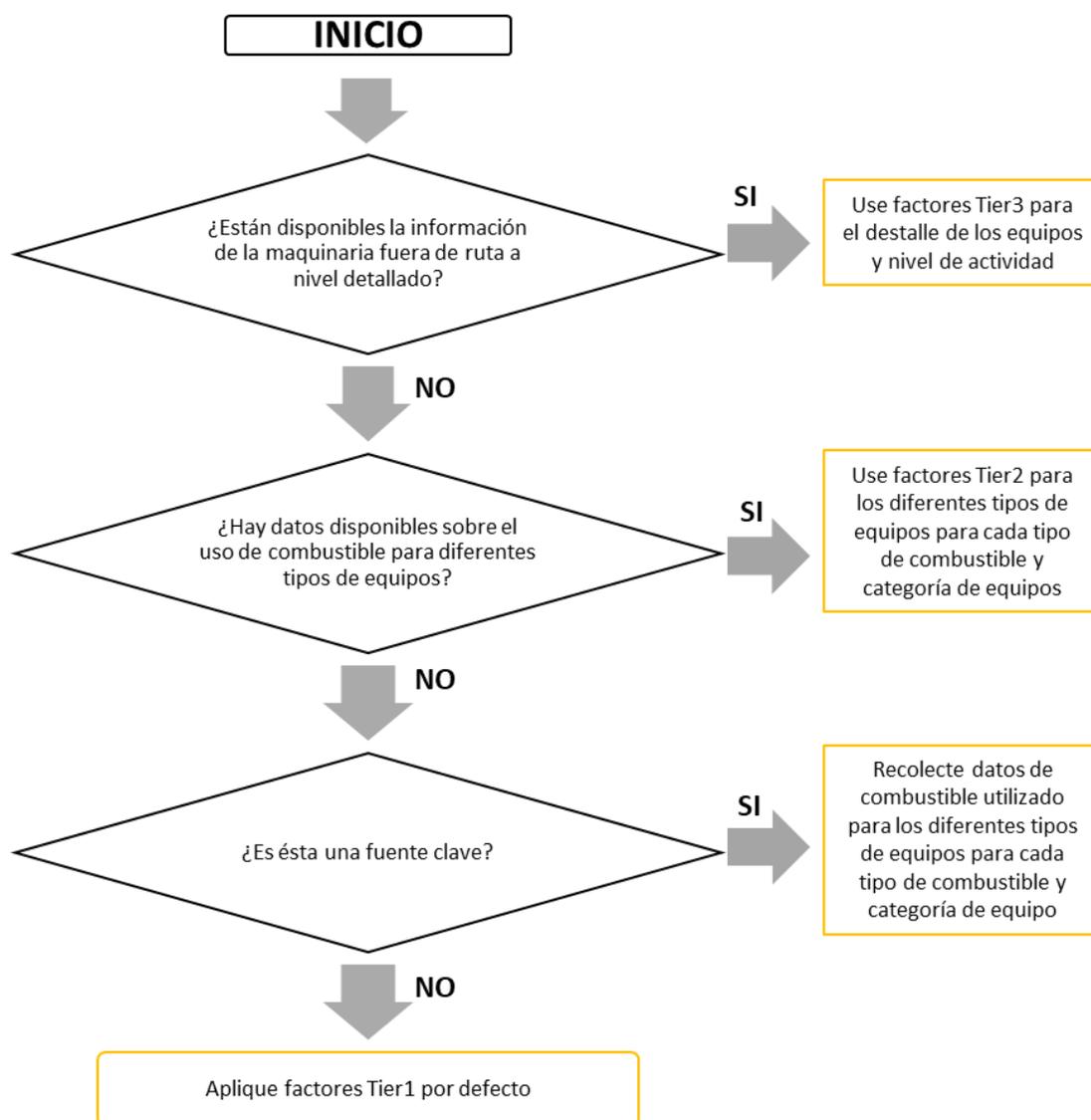
La metodología EURO corresponde a la definida en el documento “EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook - 2016”, de la Agencia Ambiental Europea.

Las ecuaciones que se utilizan para el cálculo de las emisiones en cada una de las metodologías se describen a continuación:

### 3.1.1. METODOLOGÍA EURO

El procedimiento para seleccionar el tipo de metodología específica y los factores que se emplearán, depende del análisis de la información disponible. (ver Figura 20).

Figura 20 Diagrama de flujo metodología EURO



Fuente: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook – 2016

**Tier1:** Las emisiones se estiman utilizando factores de emisión promedio y con una clasificación amplia de la maquinaria, tipo de combustible y el tipo de motor (dos tiempos o cuatro tiempos).

$$E_{pollutant} = \sum_{fueltype} FC_{fueltype} \times EF_{pollutant\ fueltype}$$

Dónde:

$E_{pollutant}$  = La emisión del contaminante especificado

$FC_{fueltype}$  = Consumo de combustible para cada combustible (diésel, GLP, gasolina de cuatro tiempos y gasolina de dos tiempos) para la categoría de fuente.

$EF_{pollutant}$  = Factor de emisión por contaminante y por tipo de combustible

Esta ecuación se aplica a nivel nacional, utilizando el consumo nacional anual de combustible, para encontrar la relación y estimar el consumo de combustible de la maquinaria fuera de ruta a partir de datos nacionales, se utiliza la siguiente ecuación:

$$F_{liquid} = 0.49 \times GVA$$

Dónde:

$F_{liquid}$  = Cantidad de combustible líquido utilizado por la maquinaria fuera de ruta en la fabricación y construcción (TJ)

$GVA$  = Valor agregado bruto para fabricación y construcción (valor actual de millones de euros).

**Tier2:** Para el cálculo de las emisiones se requiere la información clasificada según el tipo de combustible y la tecnología del motor.

$$E_i = \sum_j \sum_t FC_{j,t} \times EF_{i,j,t}$$

Dónde:

$E_i$  = Masa de emisiones de contaminantes  $i$  durante el periodo del inventario

$FC_{j,t}$  = Consumo de combustible del tipo de combustible  $j$  por equipos de categoría  $c$  y de tecnología, tipo  $t$

$EF_{i,j,t}$  = Factor de emisión promedio para el contaminante  $i$  para el tipo de combustible  $j$  para la categoría de equipo  $c$  y de tecnología tipo  $t$

$i$  = Tipo de contaminante

$j$  = Tipo de combustible (diésel, gasolina de cuatro tiempos, GLP y gasolina de dos tiempos)

$t$  = Tecnología de equipos todo terreno: <1981, 1981–1990, 1991 – Etapa I, Etapa I, Etapa II, Etapa IIIA, Etapa IIIB, Etapa IV, Etapa V)

**Tier3:** Se encuentra desagregada la información a nivel del equipo, incluido los datos operativos específicos y el tamaño del motor.

$$E = N \times HRS \times P \times (1 + DFA) \times LFA \times EF_{Base}$$

Dónde:

$E$  = Masa de emisiones de contaminantes  $i$  durante el período de inventario

$N$  = Numero de motores (Unidad)

$HRS$  = Horas de uso anual

$P$  = Tamaño del motor (kW)

$DFA$  = Factor de deterioro ajustado

$LFA$  = Ajuste del factor de carga

$EF_{Base}$  = Factor de emisión base (g/kWh)

En esta metodología, los parámetros  $N$ ,  $HRS$ ,  $P$ ,  $DFA$ ,  $LFA$ ,  $EF_{Base}$  de la fórmula anterior se dividen de la siguiente manera:

$N$  = Población de maquinaria / vehículos - se divide en diferentes niveles de tecnología y rangos de potencia

$HRS$  = Hora de trabajo anual - esta es una función de la edad del equipo / vehículos; por lo tanto, para cada subcategoría, se pueden definir patrones de uso dependientes de la edad

$P$  = Potencia - esta es una función de la distribución de potencia de los vehículos / maquinaria; por lo tanto, para cada subcategoría se puede definir una distribución de potencia individual dentro de los rangos de potencia dados

$DFA$  = Factor de deterioro: es una función del rango de potencia de los vehículos / maquinaria y el nivel de tecnología.

$LFA$  = Ajuste del factor de carga - esta es una función del nivel de tecnología.

$EF_{Base}$  = Factor de emisión - esto es, para cada contaminante, una función de los niveles de tecnología y la potencia de salida.

Para utilizar el enfoque anterior, es necesario estratificar la flota de maquinaria en términos de: nivel de tecnología, rango de potencia, carga, edad, así como las horas anuales de operación para cada una de estas clases.

### 3.1.2. METODOLOGÍA EPA

Utiliza la siguiente ecuación para el cálculo del factor de emisión:

$$EF_{aj}(HC, CO, NOx) = EF_{EE} \times TAF \times DF$$

Dónde:

$EF_{aj}$  = Factor de emisión ajustado por operación y deterioro, [g/kW-h],

$EF_{EE}$  = Factor de emisión en estado estacionario de un equipo nuevo (hora cero), [g/kW-h],

$TAF$  = Factor de ajuste transitorio para Tier 1 a Tier 3, depende del tipo de operación de la maquinaria. (Tier 4 TAF = 1) [sin unidad],

$DF$  = Factor de deterioro depende del envejecimiento del motor [sin unidad].

$EF_{EE}$ , corresponde típicamente al valor de certificación del motor, al valor límite de la norma o a valores experimentales. Para EPA se usa típicamente el valor de certificación de las emisiones medidas en las pruebas de dinamómetro de motor.

Para el material particulado se considera el contenido de azufre del combustible quemado modificando la ecuación de la siguiente manera:

$$EF_{aj}(PM) = EF_{EE} \times TAF \times DF - S_{PMaj}$$

Dónde:

$S_{PMaj}$  = Ajuste al factor de emisión de PM para tener en cuenta las variaciones en el contenido de azufre del combustible [g/kW-h].

Este ajuste representa la variación del contenido de azufre en el combustible comercial respecto del utilizado para la certificación, el que se utiliza para obtener los valores de EF de los equipos nuevos ( $EF_{EE}$ ), a continuación, se presenta la expresión para el ajuste por el contenido de azufre:

$$S_{PMaj} = BSFC \times 7.0 \times soxcnv \times 0.01 \times (soxbas - soxdsl)$$

Dónde:

$BSFC$  = Consumo específico de combustible al freno, [g/kW-h],

7.0 = Gramos de sulfato de PM / gramos de azufre en PM

$soxcnv$  = Gramos de azufre en PM / gramos de azufre en combustible consumido

0.01 = Conversión porcentaje a fracción

$soxbas$  = Contenido de azufre usado en el combustible de certificación [%],

$soxdsl$  = Contenido de azufre usado en el combustible de evaluación [%].

Los factores de emisión de  $CO_2$  y  $SO_2$ , por lo general son calculados con base en el consumo de combustible específico del freno (BSFC). A continuación, se presentan las ecuaciones para el cálculo de los factores de emisión:

$$EF(CO_2) = (BSFC - HC) \times 0.87 \times (44/12)$$

$$EF(SO_2) = (BSFC \times (1 - soxcnv) - HC) \times 0.01 \times soxdsl \times 2$$

Dónde:

$CO_2$  = Factor de emisión  $CO_2$  en [g/kW-h],

$BSFC$  = Consumo específico de combustible al freno, [g/kW-h],

$HC$  = Factor de emisión  $HC$  en [g/kW-h],

0.87 = Fracción de masa de carbón del diésel

44/12 = Proporción de  $CO_2$  en [g/kW-h],

$SO_2$  = Factor de emisión  $SO_2$  en [g/kW-h],

$soxcnv$  = Gramos de azufre en PM / gramos de azufre en combustible consumido

0.01 = Conversión porcentaje a fracción

$soxdsl$  = Contenido de azufre usado en el combustible de evaluación [%].

2 = Gramos de  $SO_2$  formados a partir de un gramo de azufre

### 3.2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA NACIONAL

A nivel nacional no existen resultados de inventarios de este tipo de maquinaria, asimismo en la guía para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas del MADS (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible) se clasifican las fuentes móviles en dos grandes categorías, según el diseño para la circulación: los vehículos en vía (on-road) y los vehículos fuera de vía (non-road) pero para efecto de esta guía solo se tiene en cuenta los vehículos clasificados para uso en carretera.

En cuanto al marco regulatorio para las emisiones de los vehículos fuera de vía (non-road) y sus niveles permisibles de emisión de contaminantes, en el artículo 2 de la resolución 910 de 2008 del MADS, se exceptúa de este cumplimiento las locomotoras, equipos fuera de carrera para combate o defensa, equipos o maquinaria para obras civiles (vibradores, grúas) o viales (retroexcavadoras, mezcladoras, cortadoras, compactadores, vibrocompactadores, terminadoras o finishers), equipos internos para manejo de carga en la industria y terminales, equipos para minería (retroexcavadoras, cargadores, palas, camiones con capacidad superior a 50 toneladas), equipos agrícolas ya sean movidas por llantas, rodillos, cadenas u orugas y en general los equipos establecidos como maquinaria o vehículos NONROAD, los vehículos dedicados a gas natural o GLP y las declaradas por la autoridad de tránsito como vehículos antiguos o clásicos.

Por último, el marco regulatorio para el registro de este tipo de vehículos, indica en el decreto 019 de 2012 del Departamento Administrativo de la Función Pública por el cual se dictan normas para suprimir o reformar regulaciones, procedimientos y trámites innecesarios existentes en la Administración Pública en el Artículo 11: "Incorpórese al RUNT, el Registro Nacional de Maquinaria Agrícola, Industrial y de Construcción Autopropulsada que sea adquirida, importada o ensamblada en el país, a partir de la sanción de la presente ley", la maquinaria ingresada con anterioridad a la expedición de este decreto, el registro es voluntario y con la resolución 1068 de 2015 del Ministerio de Transporte, se reglamenta el registro nacional de maquinaria agrícola, industrial y de construcción autopropulsada, englobadas en tres números únicos de identificación:

- Maquinaria agrícola: MA - seguido de seis dígitos.
- Maquinaria Industrial: MI - seguido de seis dígitos.
- Maquinaria Construcción o Minería: MC - seguido de seis dígitos.

### **3.3. ESTIMACIÓN DEL PARQUE FUERA DE RUTA (OFF-ROAD)**

Para estimar el parque automotor fuera de ruta año base 2018, se analizaron las bases de datos de los vehículos registrados en las diez STT que conforman el Valle de Aburrá, se enviaron oficios a varias empresas del sector de la construcción solicitando la base de datos de los equipos con los que contaban y se adelantaron reuniones con diferentes

gremios de la construcción. A continuación, se presentan los hallazgos de cada una de ellas.

Con la información suministrada en las STT y tomando solo en cuenta las placas iniciadas en MC, se obtuvo un total de 5,816 vehículos de construcción (ver Tabla 12) registrados en el Valle de Aburrá, evidenciando que lo que se encuentra registrado no es la realidad de la maquinaria que circula, además se está englobando la maquinaria de construcción junto con la maquinaria de minería.

En las reuniones realizadas con las agremiaciones y empresas de construcción, no se obtuvieron bases de datos, pero se realizaron los siguientes aportes:

- El alquiler de la maquinaria en obras de construcción residencial se hace por prestación de servicios y no se tienen bases de datos de esta maquinaria en las obras.
- Es una maquinaria sujeta a la demanda de obras y se encuentra en constante movimiento.
- Es necesario revisar bases de datos de las empresas aseguradoras de este tipo de maquinaria en la región, para tener información más real de estos equipos.
- Este tipo de maquinaria no se registra puesto que no circula en las vías, son transportadas a donde se requieren en camiones especiales.
- La maquinaria amarilla es un parque automotor muy viejo y la vida útil normalmente no se cumple.

Tabla 12 Maquinaria de construcción registrada en el Valle de Aburrá para el año 2018\*

Clase	Total
Aplanadora	2
Auto hormigonera	21
Bulldozer	424
Cargador	32
Cargadora frontal	401
Compactadora	36
Cribas	2
Dumper	152
Excavadora	2,258
Fresadora	1
Grúa	24
Manipulador telescópico	20
Maquinaria industrial	19
Mini cargador	476
Mini excavadora	213
Montacarga	20
Motoniveladora	197
Pavimentadora	10
Perforadora	12
Piloteadora	1
Plataforma de elevación	1
Retroexcavadora	1,215
Trituradora	9
Vibrocompactadora	270
TOTAL	5,816

Fuente: STT AMVA, \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Teniendo en cuenta todos los hallazgos anteriormente mencionados, se dificulta realizar un estimado del parque automotor de esta maquinaria a nivel Valle de Aburrá, tanto en la cantidad de vehículos como en las características de la flota requeridas para la realización de la estimación de las emisiones como el nivel de actividad, usos, potencias medidas, consumo de combustible, tipo de combustible entre otros parámetros.

Para llevar a cabo este inventario se recomienda realizar las siguientes actividades:

- Análisis regulatorio sobre maquinaria fuera de ruta y propuestas normativas.

- Una vez se tengan las normas regulatorias donde se obligue el registro de esta maquinaria, es posible avanzar en la solicitud de las bases de datos.
- Desarrollo de encuestas a usuarios y distribuidores.
- Recopilar bases de datos de importaciones para cotejarlas con las nuevas bases de datos del gobierno nacional.

## 4. FUENTES FIJAS PUNTUALES INDUSTRIALES

La actualización del inventario de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes fijas puntuales del sector industrial con año base 2018, tiene como propósito conocer la distribución y estado de los diferentes procesos realizados en el Valle de Aburrá, con el fin de dar soporte a la toma de decisiones relacionadas con escenarios de control y reducción de emisiones.

### 4.1. METODOLOGÍA

La metodología emplea los datos obtenidos de las mediciones o monitoreos isocinéticos a las fuentes fijas realizadas por las empresas; para los casos que no se tengan las mediciones respectivas, se estiman las emisiones con base en los factores de emisión usados por la Agencia de Protección

Ambiental de Estados Unidos (EPA. AP-42). La ecuación general para la estimación de emisiones es:

$$E = A \times EF \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

Dónde:

E es la emisión.

A es el nivel de actividad.

EF es el factor de emisión.

ER es la eficiencia del equipo de control de emisiones, %.

En la Tabla 13 se resumen las actividades desarrolladas y en el caso de requerir mayor detalle de los pasos abordados, remitirse al Informe Final del convenio de asociación CA-335 de 2016 entre AMVA-UPB, en el capítulo "Sistema de Modelización Atmosférica (SMA)".

Tabla 13 Resumen descriptivo metodología inventario fuentes fijas año base 2018

FUENTES FIJAS	
Grupo de Fuente	Fuentes fijas sector industrial
Sub Grupo	Fuentes fijas subsectores económicos (BAT, TXT, CVL, PAP, PCE, MMC, QMC, CUR, ASF, TER, MAD, OTR)
Categorías	Procesos o equipos generadores de emisiones atmosféricas (CAL, HOR, CAB, CAP, TMA, IMP, EXT, TYM, OTR).
Uso Final	Carbón, Gas Natural, Energía Eléctrica, biomasa, otros.
Metodología	Modelo IEFI (Inventario de Emisiones de Fuentes Industriales)
Factores de Emisión (FE)	FE reportados en el AP-42 Compilation of Air Pollution Emission factores de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. De igual manera se emplean, para algunas actividades industriales, los FE de la Agencia Ambiental Europea (EEA) en conjunto con el Programa cooperativo para el monitoreo y la evaluación de contaminantes del aire de largo alcance de transmisión (EMEP). Se reportan principalmente los contaminantes MP, PM10, PM <sub>2.5</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>2</sub> , VOC, CO y como gases de efecto invernadero el CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> y N <sub>2</sub> O. Es necesario destacar que en el modelo IEFI se estima la emisión de 179 especies o contaminantes.
Fuente de Información	Consulta de informes técnicos en el Sistema de Información Metropolitano (SIM), del grupo de Control y Vigilancia de la Subdirección Ambiental del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA). Revisión de monitoreos isocinéticos de las empresas en los expedientes metropolitanos de empresas que reposan en el AMVA.

Fuente: elaboración propia

## 4.2. DATOS DE ENTRADA

Mediante la consulta de expedientes metropolitanos, se extrae y actualiza la información técnica y operacional de las empresas, en función de sus procesos productivos, dando prioridad a datos como tipo de proceso o equipo, producción, consumo de combustible (si aplica), frecuencia de operación y las variables de medición en monitoreos isocinéticos como caudal, temperatura, presión y composición de los gases de salida. La base de datos actualizada se alimenta al aplicativo de fuentes fijas industriales, con el fin de realizar consultas y gestión de la información por parte de los grupos técnicos del AMVA y UPB.

En conjunto con el grupo de Control y Vigilancia del AMVA, se ha realizado la validación y actualización de información de aquellas empresas en el sector industrial que, han dado por terminada su operación, se trasladaron de domicilio o no requieren medición por su tipo de procesos al no generar emisiones de contaminantes atmosféricos.

Adicionalmente, se realizó la revisión detallada de la información de aquellas empresas categorizadas como mayores emisoras y con datos atípicos, permitiendo realizar ajustes a sus sistemas de control y demás datos operacionales.

## 4.3. RESULTADOS

Para el análisis de los datos correspondientes a las mediciones por monitoreos isocinéticos, se ha realizado la búsqueda y actualización de factores de emisión asociados a los diferentes procesos realizados en el Valle de Aburrá. Se adjunta el archivo en digital con la última actualización de los factores de emisión, alimentados al

aplicativo de fuentes industriales, mediante el Anexo 4.1 EF-AP42.

Como resultado de la revisión de expedientes y en colaboración con el grupo de Control y Vigilancia, se generó la base de datos para una primera versión del inventario de emisiones atmosféricas en fuentes fijas, analizando y ajustando aquellos procesos con datos operacionales anómalos, asignando el factor de emisión adecuado a su operación.

Se adjunta en el archivo de Excel la base de datos actualizada, con los datos correspondientes a los registros alimentados por parte del grupo de Control y Vigilancia y UPB.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la actualización del inventario de fuentes fijas año base 2018.

### 4.3.1. SUBSECTORES INDUSTRIALES Y DENSIFICACIÓN INDUSTRIAL

En la Tabla 14 se muestra la cantidad de empresas, las fuentes discriminadas por municipio y el porcentaje de representación del sector industrial asentado en el Valle de Aburrá. Los resultados muestran que se encontraron 698 empresas que emiten contaminantes al aire, responsables por un total de 2138 fuentes.

Se destaca que en los municipios de Medellín e Itagüí se concentra la mayor cantidad, tanto de empresas como de fuentes industriales, aportando entre ambos municipios el 73% de las empresas y el 65% de las fuentes, siendo Medellín el de mayor aporte con un 48% de asentamiento de empresas y del 40% de fuentes; para el municipio de Itagüí se tiene presencia del 25% de las empresas y el 25% de las fuentes totales, seguidamente se encuentran los

municipios de Sabaneta y La Estrella, que ambos aportan el 15% y 16% de las empresas y fuentes existentes respectivamente.

En comparación con los resultados obtenidos en la actualización del inventario año base 2016, se presentó un aumento general del 62% en el número de empresas y

de un 48% para el número de fuentes, en donde los mayores cambios se presentaron para los municipios de Medellín, Itagüí, Bello y La Estrella.

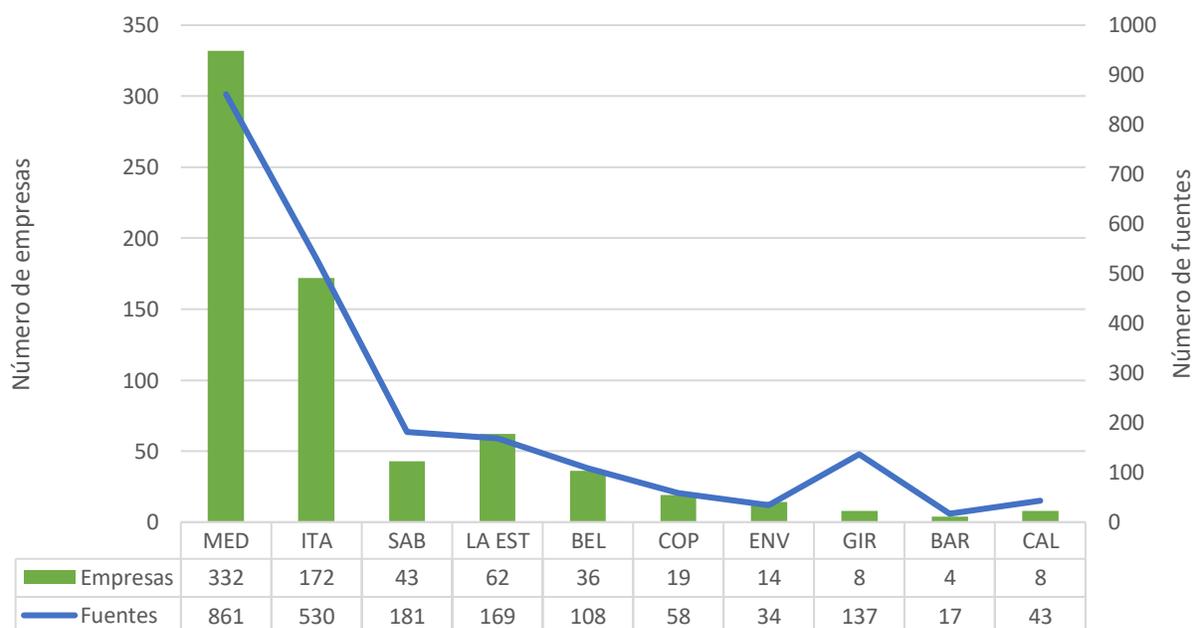
En la Figura 21 se observa el comportamiento del número de empresas y fuentes por municipio.

Tabla 14 Distribución densidad de empresas y fuentes industriales por municipio año base 2018

Municipio	Empresas	Fuentes	Empresas (%)	Fuentes (%)
Medellín	332	861	48%	40%
Itagüí	172	530	25%	25%
Sabaneta	43	181	6%	8%
La Estrella	62	169	9%	8%
Bello	36	108	5%	5%
Copacabana	19	58	3%	3%
Envigado	14	34	2%	2%
Girardota	8	137	1%	6%
Barbosa	4	17	1%	1%
Caldas	8	43	1%	2%
Total	698	2.138		

Fuente: elaboración propia

Figura 21 Distribución densidad de empresas y fuentes industriales por municipio año base 2018



Fuente: elaboración propia

De igual manera se realizó un análisis de densidad de empresas y fuentes por subsector industrial. En la Tabla 15 se muestran los resultados con el porcentaje de aporte de cada subsector, siendo la actividad productiva de los subsectores de bebidas, alimentos y tabaco (BAT), metalmecánico (MMC), el textil (TXT) y otros (OTR), los de mayor presencia de empresas y fuentes.

En contraste con el inventario año base 2016, los sectores con mayor crecimiento fueron los de bebidas, alimentos y tabaco (BAT), el terciario (TER) y otros (OTR),

presentando un aumento promedio del 188% en el número de empresas y del 172% en la cantidad de fuentes.

Adicionalmente se observa una disminución del 13% en el número de empresas del sector curtimbres y del 33% de sus fuentes.

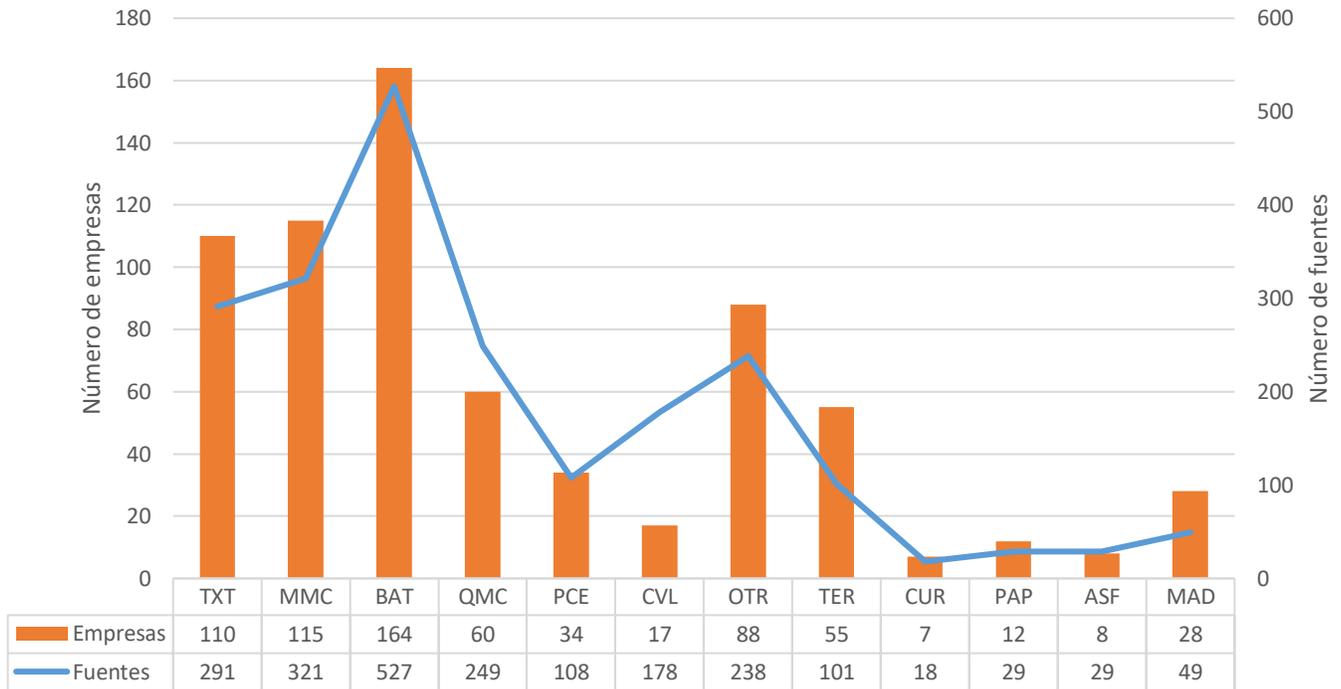
En la Figura 22 se muestra el comportamiento del número de empresas y fuentes por subsector industrial.

**Tabla 15 Densidad de empresas y fuentes industriales por subsector industrial año base 2018**

<b>Sector</b>	<b>Fuentes</b>	<b>Empresas</b>	<b>Fuentes (%)</b>	<b>Empresas (%)</b>
TXT	291	110	14%	16%
MMC	321	115	15%	16%
BAT	527	164	25%	23%
QMC	249	60	12%	9%
PCE	108	34	5%	5%
CVL	178	17	8%	2%
OTR	238	88	11%	13%
TER	101	55	5%	8%
CUR	18	7	1%	1%
PAP	29	12	1%	2%
ASF	29	8	1%	1%
MAD	49	28	2%	4%
<b>Total</b>	<b>2138</b>	<b>698</b>		

*Fuente: elaboración propia*

Figura 22 Densidad de empresas y fuentes industriales por subsector industrial año base 2018



Fuente: elaboración propia

### 4.3.2. EMISIÓN DE CONTAMINANTES CRITERIO Y GASES DE EFECTO INVERNADERO

Dentro del inventario de fuentes fijas, se tienen contemplados 179 contaminantes atmosféricos, que se agrupan en familias como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>), compuestos orgánicos volátiles (VOC), compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOC), material particulado total de diferentes tamaños (PM<sub>x</sub>) y para los gases de efecto invernadero se analizan el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O).

Las emisiones en (t/año) de los contaminantes atmosféricos evaluados se

visualizan en la Tabla 16 y en la Figura 23 por subsector industrial de mayor impacto o aporte, los cuales son el textil (TXT), el de bebidas y alimentos (BAT), el cerámico (CVL), el químico (QMC), el papelerero (PAP) y el subsector de plásticos (PCE).

A partir de los resultados de las emisiones obtenidas para los diferentes las industrias en el Valle de Aburrá, se observa al subsector Textil como la principal actividad económica emisora de la mayoría de los contaminantes criterio evaluados, con excepción de los NMVOC que es liberado especialmente por el subsector de Plásticos, Cauchos y Empaques con un 82%. En el caso de emisiones del MP, el subsector de Cerámicos y vítreos aporta el 28%.

El subsector Textil emite en promedio el 40% de las emisiones tanto del material

particulado menor a 10 micras, 2.5 micras y adicionalmente inferior a 1 micra ( $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$  y  $PM_1$  respectivamente), destacando adicionalmente que son los responsables del 90% de las emisiones de VOC, esto se debe principalmente a las termofijadoras.

Es necesario indicar que para el  $PM_1$  el subsector textil aporta el 39%, mientras que el sector de Bebidas, Alimentos y Tabaco aportan el 27%, adicionalmente aparece como tercer emisor importante el subsector Terciario (TER) con un aporte del 15%. Esto por el uso de equipos que utilizan gas natural.

Para el  $SO_2$ , se observa que entre los subsectores Textil y Químico son responsables del 84% de sus emisiones, siendo el 51% aportado por el Textil.

De igual manera para el caso de los gases de efecto invernadero, el subsector Textil aporta aproximadamente el 39% de las emisiones de los 3 contaminantes descritos anteriormente ( $CO_2$ ,  $CH_4$  y  $N_2O$ ).

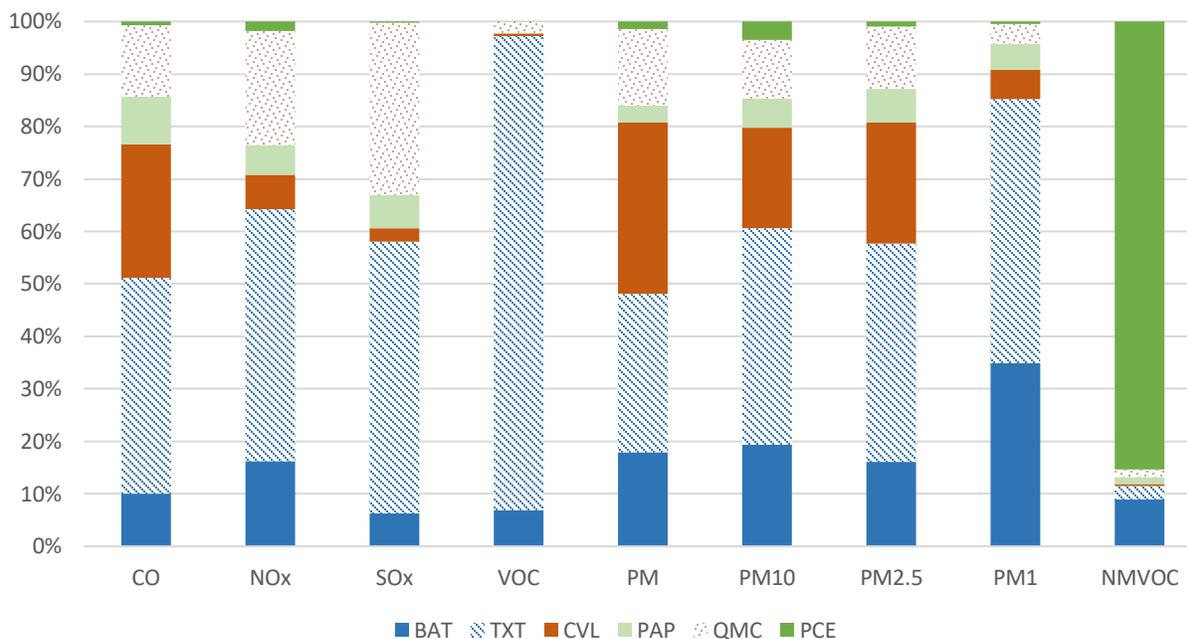
Al realizar el análisis de emisión por municipio como se muestra en la Tabla 17 y la Figura 24, aparecen los municipios de Medellín e Itagüí como los principales emisores de la mayoría de contaminantes evaluados, resaltando el aporte principalmente de Itagüí, que representa el 77% y 53% de la emisión de VOC y NMVOC respectivamente. Así mismo, también es importante en materia de emisión de  $SO_2$ , la responsabilidad de Girardota con el 32% y Bello con el 21% de las emisiones. Adicionalmente el municipio de Girardota aparece como tercer emisor tanto de CO como de  $NO_x$  con un aporte del 11% y 19% respectivamente.

Tabla 16 Emisiones (t/año) de contaminantes atmosféricos por subsector industrial año base 2018

Sector	Año 2018 (Mg/año)											
	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	VOC	PM	PM10	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1</sub>	NMVOG	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
BAT	268.8	340.6	212.3	490.1	195.6	65.0	34.7	18.5	479.6	321,780	9.44	5.76
TXT	1,088.3	1,012.9	1,732.8	6,378.0	361.0	137.6	91.5	26.6	136.2	668,815	20.65	11.30
CVL	679.0	135.6	84.6	37.2	353.5	66.9	51.3	2.9	23.2	68,702	14.08	0.96
PAP	242.7	122.0	211.9	11.3	33.9	18.5	13.8	2.6	71.2	76,486	4.15	1.21
QMC	358.2	453.0	1,099.7	150.5	144.8	52.4	37.7	1.8	75.3	188,744	3.97	2.81
PCE	18.8	36.9	8.2	0.7	15.1	11.4	2.0	0.2	4,599.3	42,238	0.29	0.21
MMC	455.8	20.3	8.6	27.4	50.8	9.5	4.9	5.0	135.1	19,142	2.74	0.34
CUR	2.4	2.6	5.8	0.2	3.3	1.6	1.2	0.0	29.1	1,030	0.09	0.02
ASF	7.6	3.6	0.6	1.7	17.4	3.9	0.4	0.0	1.1	2,459	0.65	0.02
TER	74.5	207.1	11.1	8.0	20.6	4.2	1.1	10.2	4.9	244,440	3.10	3.22
MAD	23.9	1.3	0.1	1.2	39.3	14.0	9.7	0.0	17.7	7,711	0.82	0.51
OTR	8.1	9.7	0.3	2.9	8.0	0.0	0.0	0.7	0.3	11,677	0.22	0.21
Total	3,228	2,346	3,376	7,109	1,243	385	248	69	5,573	1,653,225	60	27

BAT: bebidas, alimentos y tabaco; TXT: textil y confección; CVL: cerámicos y vítreos; PAP: papel, cartón, pulpa e impresión; PCE: plásticos, cauchos y empaques; MMC: metalmecánico; QMC: químico; CUR: cueros; ASF: derivados del petróleo; TER: terciario; MAD: aserríos, depósitos de maderas, e industrias que trabajan la madera; OTR: otras industrias.

Figura 23 Distribución de emisiones de contaminantes atmosféricos por subsector industrial año base 2018



Fuente: elaboración propia

Para el caso de material particulado, las mayores emisiones de PM se presentan en los municipios de Girardota, Itagüí y Medellín, con un aporte del 24%, 22% y 19% respectivamente, para el PM<sub>10</sub> y PM<sub>2.5</sub> las emisiones principalmente se dan en los municipios de Medellín, Itagüí y Sabaneta, siendo Itagüí con el mayor aporte del 25% para ambos contaminantes. Para el PM<sub>1</sub> el 47% es emitido por Medellín, seguido por Itagüí con el 22%.

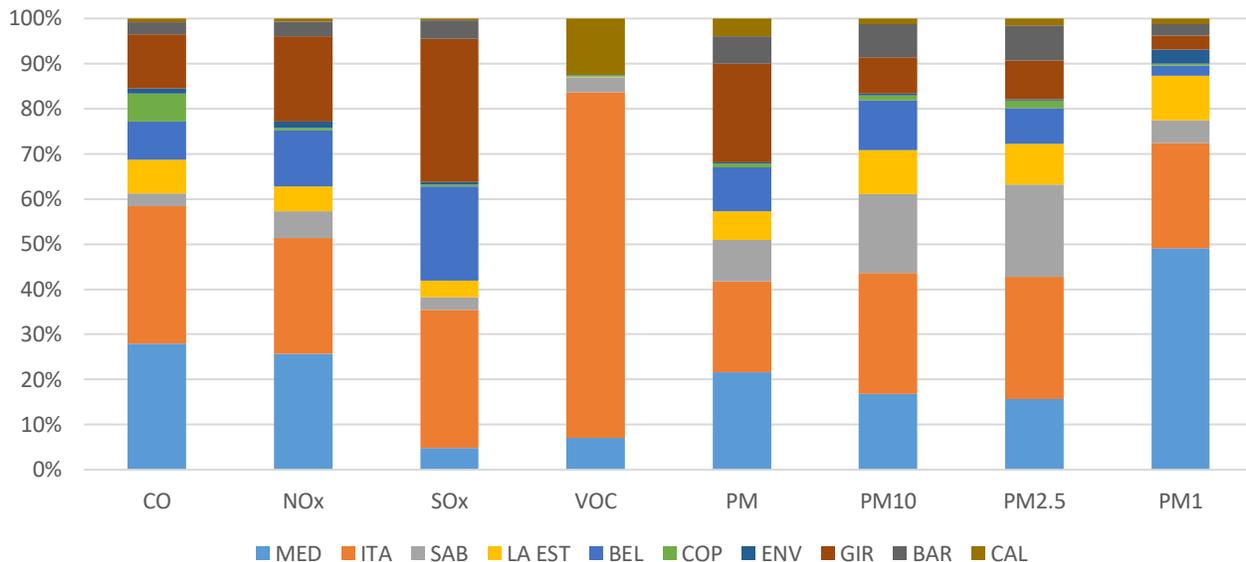
Para los gases de efecto invernadero, Medellín es el principal emisor de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O con un aporte promedio del 38% seguido por Itagüí con un 26%, mostrando adicionalmente una emisión por parte de Girardota del 10%.

Tabla 17 Emisiones (t/año) de contaminantes atmosféricos por municipio año base 2018

Municipio	Año 2018 (Mg/año)											
	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	VOC	PM	PM10	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1</sub>	NMVOC	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Medellín	847.1	600.5	163.9	501.2	233.8	64.7	36.8	32.1	2,246.3	648,815	22.51	9.78
Itagüi	889.2	601.7	1,034.3	5,444.8	278.6	95.7	63.6	15.2	2,944.4	395,132	18.52	6.55
Sabaneta	375.3	139.3	95.2	233.8	109.6	66.8	48.0	6.7	94.8	70,058	1.29	1.15
La Estrella	219.5	131.3	121.4	13.6	70.0	35.1	21.2	6.5	13.1	120,329	5.07	2.15
Bello	233.1	293.1	702.9	5.6	106.1	39.6	18.2	1.4	48.0	124,688	2.70	1.92
Copacabana	182.8	12.4	17.0	29.2	16.0	6.8	5.9	0.3	139.0	7,559	3.45	0.15
Envigado	28.9	34.9	17.8	1.6	2.7	1.6	0.8	2.0	2.0	36,607	0.69	0.64
Girardota	348.4	440.3	1,070.3	7.4	294.5	44.2	31.9	1.8	74.5	183,147	3.89	2.76
Barbosa	80.2	74.0	138.0	2.5	63.1	26.0	18.0	1.6	9.9	50,901	1.60	1.17
Caldas	23.6	18.2	15.2	869.4	69.0	4.7	4.0	0.9	0.9	15,988	0.51	0.30
Total	3,228	2,346	3,376	7,109	1,243	385	248	69	5,573	1,653,225	60	27

BAT: bebidas, alimentos y tabaco; TXT: textil y confección; CVL: cerámicos y vítreos; PAP: papel, cartón, pulpa e impresión; PCE: plásticos, cauchos y empaques; MMC: metalmecánico; QMC: químico; CUR: cueros; ASF: derivados del petróleo; TER: terciario; MAD: aserríos, depósitos de maderas, e industrias que trabajan la madera; OTR: otras industrias.

Figura 24 Distribución de emisiones de contaminantes atmosféricos por municipio año base 2018



Fuente: elaboración propia

### 4.3.3. DEMANDA ENERGÉTICA

Para las empresas asentadas en el Valle de Aburrá, se cuantificó la demanda energética a partir de los datos de consumo de combustible.

En la Tabla 18 se presentan los resultados generales y en la Figura 25 se

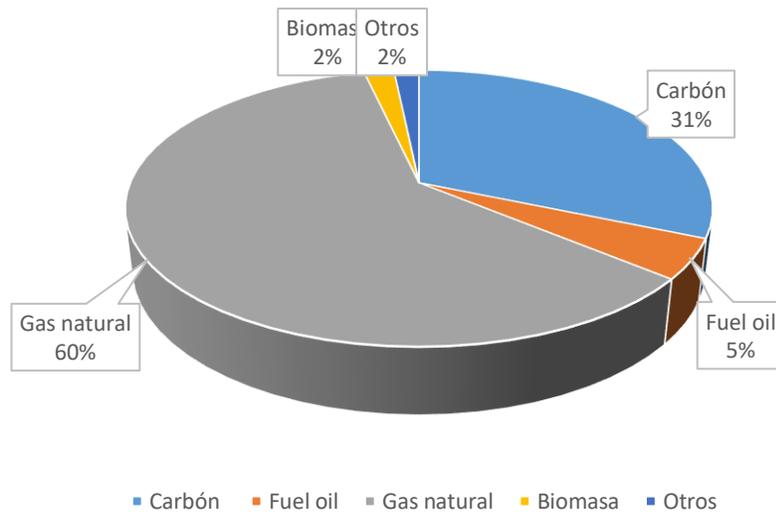
visualiza la proporción del consumo de cada tipo de combustible. Se obtiene que, en el sector industrial, la energía consumida proviene principalmente del uso del gas natural con una representatividad del 60%, seguido por el carbón mineral con un 31%, el fuel oil con un 5% y la biomasa y otros combustibles con un 2%.

Tabla 18 Demanda energética por tipo de combustible año base 2018

Combustible		Consumo	Unidades	PCI*	Unidad	TJ/año
Carbón	Carbón mineral	414,719	Mg/año	22.6	MJ/kg	9,356
	Carbón coque	1,486	Mg/año	28.5	MJ/kg	42
Fuel oil No 2	ACPM	37,479	1000 L/año	37,166.4	MJ/1000 L	1,393
Fuel oil No 6	Fuel oil No 6	0	1000 L/año	42,502.2	MJ/1000 L	0
	Aceite recuperado	13,564	1000 L/año	36,204.3	MJ/1000 L	491
Gas natural		511,374,983	m3/año	35.4	MJ/m <sup>3</sup>	18,103
GLP		61	1000 L/año	25,641.7	MJ/m <sup>3</sup>	1.56
Biomasa	Madera	11,721	Mg/año	19.0	MJ/kg	223
	Cáscara de coco	469	Mg/año	16.7	MJ/kg	8
	Fique	2,216	Mg/año	16.7	MJ/kg	37
	Borra de café	12,754	Mg/año	24.9	MJ/kg	318
Total						29,972

\*Poder Calorífico Inferior

Figura 25 Distribución de la demanda energética por tipo de combustible año base 2018



Fuente: elaboración propia

Con la distribución del consumo de los combustibles, se realiza la cuantificación de las emisiones de contaminantes criterio por subsector productivo, mostrando los resultados en la Tabla 19 y la Figura 26.

Se puede ver como el carbón es el combustible principal que realiza un aporte mayor al 50% de las emisiones de la mayoría de los contaminantes evaluados, con excepción de los VOC y el PM<sub>1</sub>, donde el 98% de estas emisiones se deben al gas natural.

Para el material particulado inhalable (PM<sub>2.5</sub>) que es el contaminante de interés en el Valle de Aburrá, es emitido en un 76% por la combustión del carbón, seguido por los procesos con gas natural que corresponden al 17% asociado a procesos tales como la fundición de metales o preparación de materiales de arcilla, mientras que por la quema de biomasa el aporte es del 6%.

Tabla 19 Emisiones (t/año) de contaminantes atmosféricos por tipo de combustible año base 2018

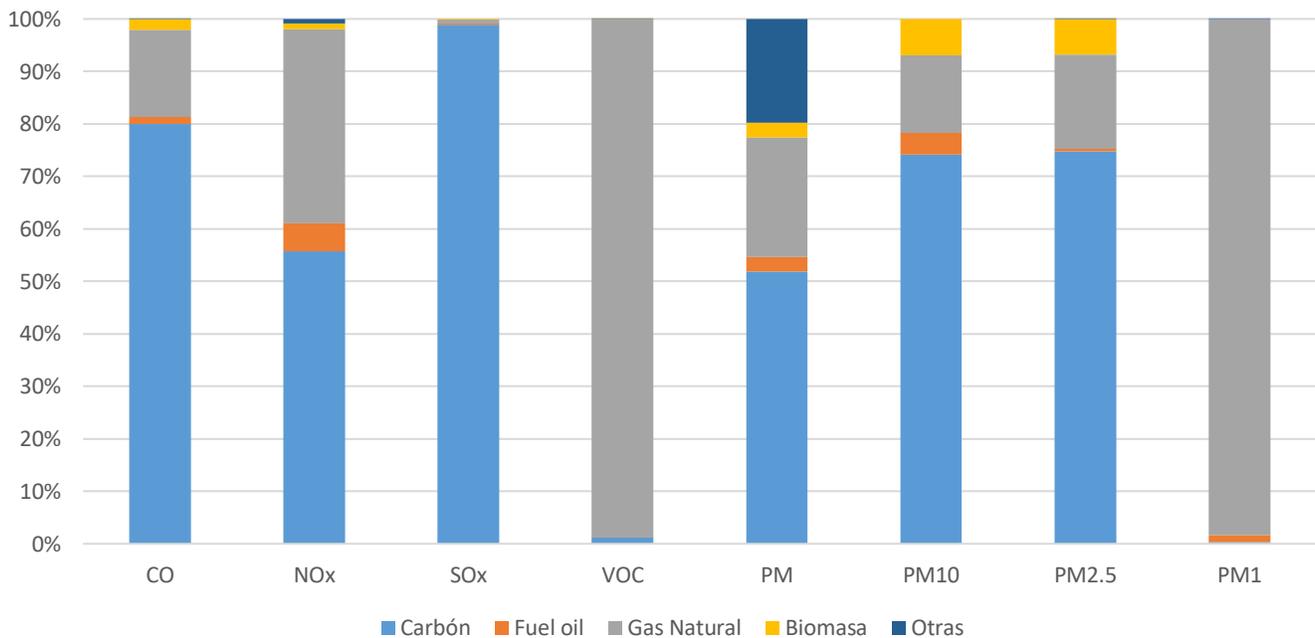
Combustible	Año 2018 (Ton/año)											
	CO	NO <sub>x</sub>	SO <sub>x</sub>	VOC	PM	PM10	PM <sub>2.5</sub>	PM <sub>1</sub>	NMVOC	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O
Carbón	2,335.5	1,321.2	3,339.6	91.4	639.2	284.8	189.7	0.2	258.2	487,247.3	35.5	6.9
Fuel oil	37.8	125.4	7.7	2.8	40.6	16.6	1.1	0.8	983.5	139,802.0	0.9	0.5
Gas Natural	484.3	869.5	24.5	7,009.2	326.2	52.9	41.6	64.0	854.9	1,015,986	21.98	18.52
Biomasa	60.5	28.2	3.7	3.8	27.8	24.7	15.9	0.0	2.5	10,098.4	1.1	0.7
Otras	0.0	0.0	0.0	1.1	174.9	0.0	0.0	0.0	3,471.0	0.0	0.8	0.0
Total	2,918	2,344	3,375	7,108	1,209	379	248	65	5,570	1,653,225	60	27

Fuente: elaboración propia

En la Figura 27 se muestra la distribución de la demanda energética por actividad productiva (subsector) y por tipo de combustible, donde se evidencia que el subsector textil consume el 61% del carbón mineral y el 43% del gas natural de todo el Valle de Aburrá, mostrando el papel del subsector como principal responsable de la emisión de contaminantes criterio, basado en lo expuesto anteriormente.

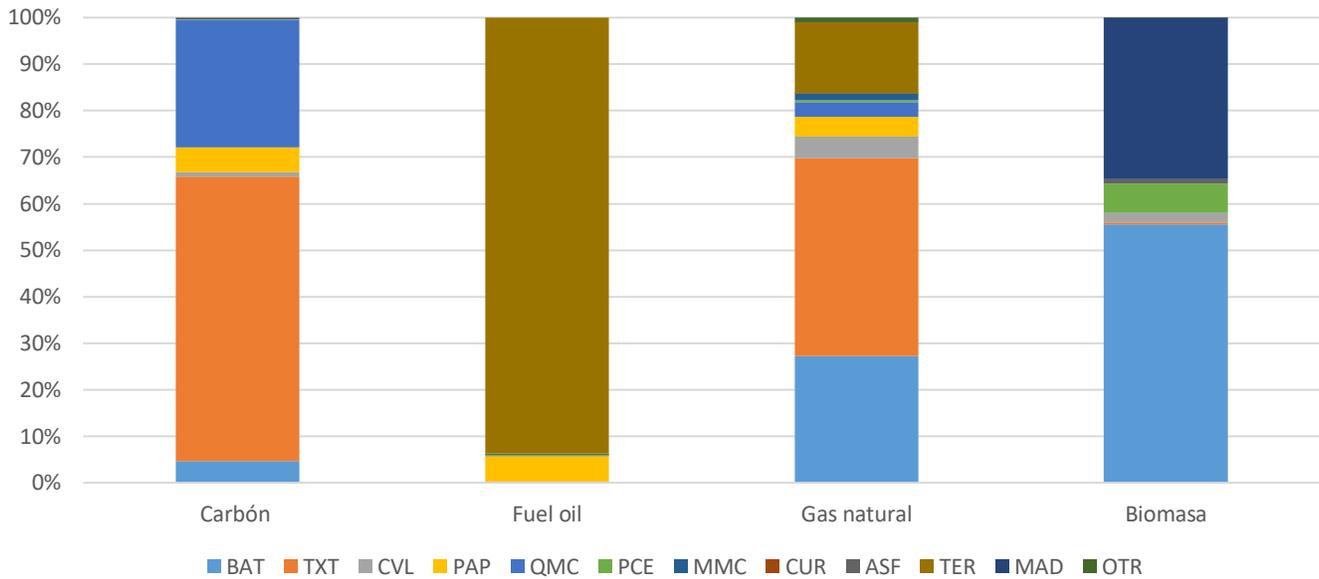
De la información de consumo de combustible, el subsector de Bebidas, Alimentos y Tabaco es el segundo de mayor consumo de gas natural, con una demanda del 27% en el Valle de Aburrá; en conjunto con el subsector textil son los principales emisores del PM<sub>1</sub>, corroborando la relación entre el flujo de PM<sub>1</sub> con las emisiones respectivas de cada subsector, mencionada en el numeral 4.3.2.

**Figura 26 Distribución de emisiones de contaminantes atmosféricos por tipo de combustible año base 2018**



Fuente: elaboración propia

Figura 27 Consumo de combustible por sector económico.



Fuente: elaboración propia

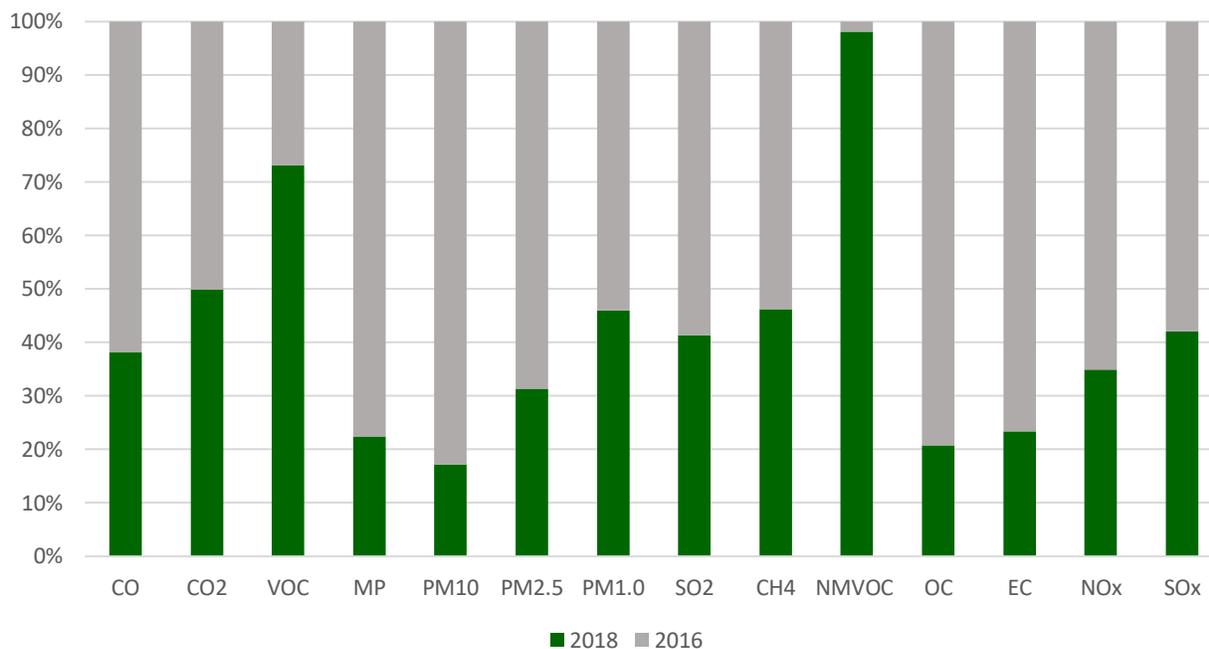
Para realizar una comparación de la presente actualización del inventario con el inventario año base 2016, se procedió a hacer un análisis relativo de la emisión de los contaminantes criterio evaluados en función del número de fuentes correspondientes a cada periodo, lo anterior con el fin de verificar el aumento o disminución respectivo. Dicho análisis se puede visualizar en la Figura 28.

Como se puede ver, la mayoría de los contaminantes evaluados presentaron una disminución en su emisión, con excepción de los VOC y los NMVOC, que presentaron un aumento del 172% y de 5047%. El anterior comportamiento se presenta como resultado de la actualización, tanto por modificaciones

a los factores de emisión (FE) como cambios en los mismos procesos de las empresas.

Dentro de las modificaciones más relevantes a los factores de emisión, se tiene la asignación de FE a aquellos procesos de termofijación y se actualizaron los de procesos de impresión, afectando en mayor medida al aumento de los VOC y NMVOC. Para el caso de cambios en procesos del sector industrial, los más relevantes son aquellos con cambios en sus equipos de control y parámetros operacionales, tanto en consumo como producción, esto principalmente en equipos de combustión externa con carbón como combustible.

Figura 28 Variación relativa de emisiones de contaminantes criterio para el año 2018



Fuente: elaboración propia

#### 4.3.4. EMISIONES DE GASES TÓXICOS

Dentro de las emisiones de las 179 especies contempladas en el inventario de emisiones atmosféricas, se presentan las emisiones de algunos compuestos aromáticos particulares de los VOC, los cuales pueden ser considerados tóxicos, dichas emisiones se muestran en las Tabla 20 y Tabla 21, discriminados tanto por subsector

industrial como por municipio respectivamente.

Se obtiene que las emisiones de gases especiales o tóxicos, no superan la tonelada al año en comparación con las emisiones de los mismos contaminantes correspondientes a las fuentes móviles.

Se adjunta un archivo digital con las emisiones del resto de contaminantes no convencionales estimados dentro del presente inventario (Anexo 4.1).

Tabla 20 Emisiones de gases tóxicos por subsector industrial para el año 2018

Subsector	Año 2018 (Ton/año)			
	Tolueno	Etilbenzeno	o, m, p-Xileno	Benceno
BAT	0,011	0,001	0,000	0,019
TXT	0,034	0,008	0,003	0,126
CVL	0,013	0,001	0,007	0,024
PAP	0,005	0,001	0,000	0,015
QMC	0,015	0,005	0,002	0,075
PCE	0,009	0,000	0,000	0,040

Subsector	Año 2018 (Ton/año)			
	Tolueno	Etilbenzeno	o, m, p-Xileno	Benceno
MMC	0,001	0,000	0,000	0,001
CUR	0,000	0,000	0,000	0,000
ASF	0,152	0,013	0,010	0,025
TER	0,030	0,000	0,000	0,004
MAD	0,036	0,001	0,000	0,163
OTR	0,000	0,000	0,000	0,000
Total	0,306	0,031	0,024	0,492

Fuente: elaboración propia

Tabla 21 Emisiones de gases tóxicos por municipio para el año 2018

Municipio	Año 2018 (Ton/año)			
	Tolueno	Etilbenzeno	o, m, p-Xileno	Benceno
Medellín	0,196	0,014	0,011	0,045
Itagüí	0,036	0,006	0,009	0,116
Sabaneta	0,003	0,000	0,000	0,007
La Estrella	0,005	0,001	0,000	0,014
Bello	0,013	0,004	0,001	0,062
Copacabana	0,002	0,000	0,000	0,011
Envigado	0,002	0,000	0,000	0,008
Girardota	0,014	0,005	0,002	0,073
Barbosa	0,033	0,002	0,000	0,151
Caldas	0,002	0,000	0,000	0,006
Total	0,306	0,031	0,024	0,492

Fuente: elaboración propia

#### 4.3.5. RESOLUCIÓN 912 DE 2017

En materia del cumplimiento de los lineamientos establecidos en la Resolución Metropolitana 912 de 2017, en función de aumentar la eficiencia energética en los sistemas de combustión externa, a continuación, se presentan los principales resultados que reflejan las acciones realizadas por el sector industrial.

De la Figura 25 se observa que el consumo del carbón representa el 31% de la totalidad de la demanda energética del sector industrial, en comparación con la actualización del inventario año base 2016, que fue del 37%. Esta disminución se pudo ver afectada tanto por reducción en la

producción, cambio del carbón a combustible más limpios o adicionalmente por buenas prácticas en los procesos de combustión, este último se puede presentar al implementar aislamiento de tuberías o aprovechamiento de la energía perdida o no utilizada en procesos internos de la empresa.

De forma general, los sectores donde se evidencia una reducción en el consumo de carbón son los subsectores de Bebidas y Alimentos (BAT) del 8%, Metalmecánico (MMC) y Cueros (CUR) con una reducción del 86% para ambos casos.

De igual manera, una de las disposiciones de la Resolución 912/2017 es la automatización en sistemas de combustión

externa. Para la actualización del inventario año base 2016 se tenían 24 procesos o fuentes con alimentación manual del combustible, en el caso de la actualización

año base 2018, se tiene un total de 19 fuentes, lo que representa una modificación del 21% de equipos a tecnologías con procesos más eficientes.

## 5. FUENTES DE ÁREA INDUSTRIALES

Adicional a las emisiones atmosféricas provenientes de fuentes puntuales, en las últimas actualizaciones del inventario del Valle de Aburrá se han considerado las fuentes de área, principalmente en la emisión de los Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC), por lo que a continuación se presenta la actualización del inventario con año base 2018 para las emisiones evaporativas del sector industrial.

### 5.1. METODOLOGÍA

La metodología utilizada para la estimación de las emisiones evaporativas, se detalla en la Tabla 22.

Las emisiones evaporativas para los procesos industriales, se estiman con base en los factores de emisión usados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos

(EPA. AP-42). La ecuación general para la estimación de emisiones es:

$$E = A \times EF \times \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

Dónde:

E es la emisión.

A es el nivel de actividad.

EF es el factor de emisión.

ER es la eficiencia del equipo de control de emisiones, %.

En el caso de las emisiones correspondientes a los tanques de almacenamiento de combustible en centrales mayoristas, se emplea el modelo TANKS<sup>®</sup>.

Si se necesita un mayor detalle de los pasos abordados, remitirse al Informe Final del convenio de asociación CA-583 de 2017 entre AMVA-UPB, en el capítulo de Sistema de Modelización Atmosférica (SMA).

Tabla 22 Resumen descriptivo metodología inventario fuentes de área año base 2018

FUENTES DE ÁREA	
Grupo de Fuente	Fuentes de área sector industrial
Sub Grupo	Estaciones de servicio de combustible, centrales mayoristas, empresas con procesos generadores de emisiones evaporativas
Categorías	Procesos o equipos del sector industrial generadores de emisiones evaporativas. Cadena de la distribución y suministro de combustibles líquidos.
Uso Final	Gasolina, Diésel
Metodología	Modelo IEFI (Inventario de Emisiones de Fuentes Industriales) Software TANKS <sup>®</sup>
Factores de Emisión	FE reportados en el AP-42 Compilation of Air Pollution Emission Factor de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos, para el contaminante VOC.
Fuente de Información	Consumo total de gasolina y diésel para el Valle de Aburra en el 2018 proporcionado por la UPME a nivel industrial (Unidad de Planeación Minero Energética). Parámetros técnicos de almacenamiento de los tanques de combustibles líquidos de centrales mayoristas. Producción y condiciones operacionales de procesos generadores de emisiones evaporativas del sector industrial.

Fuente: elaboración propia

## 5.2. DATOS DE ENTRADA

Las emisiones evaporativas de VOC en el sector industrial contempla el aporte de tres fuentes, las estaciones de servicio de combustible, centrales mayoristas y aquellas empresas con emisiones difusas de sus procesos. Adicionalmente se tienen en cuenta las emisiones de material particulado por parte de la actividad de explotación de material para el sector construcción.

En el caso de las estaciones de servicio de combustible, a través de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) se obtuvo la información concerniente a los consumos de combustible, tanto de gasolina como diésel para los 10 municipios del Valle de Aburra en el año 2018. Para los tanques de almacenamiento de combustible de las centrales mayoristas, se solicitó datos de tipo, condiciones y sustancias almacenadas en dichos tanques. Por otro lado, para las emisiones difusas de procesos industriales, se recolectó la información de producción de

aquellos procesos cuya operación generan emisiones de VOC y no necesariamente son descargadas a través de una fuente fija (ducto o chimenea).

## 5.3. RESULTADOS

### 5.3.1. ESTACIONES DE SERVICIO DE COMBUSTIBLE

En la Tabla 23 y Figura 29, se muestran los datos asociados al consumo de gasolina y diésel por municipio para el año 2018.

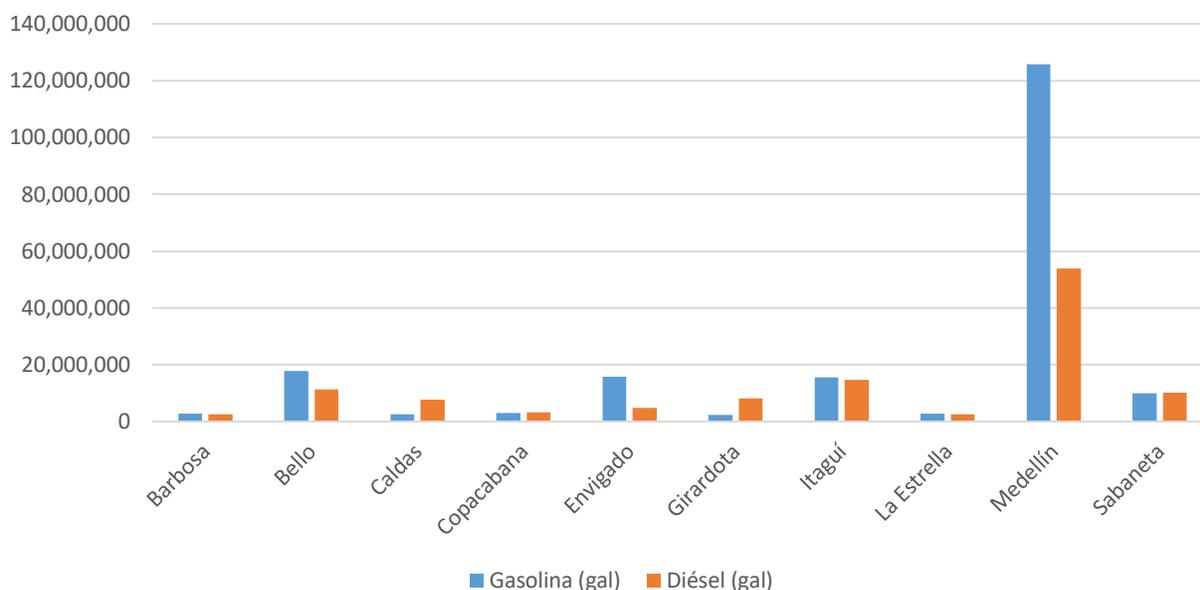
Se puede observar que el municipio con mayor consumo tanto de gasolina como de diésel es Medellín, donde se consume el 63% y 45% respectivamente de estos combustibles. Por otra parte, los municipios de Bello, Envigado e Itagüí presentan un consumo de gasolina del 9.0%, 8.0% y 7.8% respectivamente, mientras que para el caso del diésel son los municipios de Itagüí, Bello y Sabaneta que registran el mayor consumo luego de Medellín con un 12.3%, 9.4% y 8.6%.

Tabla 23 Consumo de Gasolina y Diésel en el Valle de Aburra para el año 2018

Municipio	Gasolina (gal)	Diésel (gal)
Barbosa	2,672,586	2,543,970
Bello	17,805,350	11,234,729
Caldas	2,586,407	7,601,020
Copacabana	2,909,054	3,222,714
Envigado	15,872,312	4,749,259
Girardota	2,310,700	8,198,445
Itagüí	15,516,506	14,653,481
La Estrella	2,877,551	2,654,863
Medellín	125,782,515	53,896,482
Sabaneta	9,948,963	10,231,828
TOTAL	198,281,944	118,986,791

Fuente: elaboración propia

Figura 29 Distribución del consumo de combustible en el Valle de Aburra en el año 2018



Fuente: elaboración propia

Mediante factores de emisión de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), se estimaron las emisiones de los compuestos orgánicos volátiles (VOC) provenientes de las estaciones de servicio, registradas en la Tabla 24.

gasolina, con mayor representatividad en el municipio de Medellín, seguido por Bello, Envigado e Itagüí, de igual manera en el caso del diésel, el mayor aporte se presenta en Medellín, Itagüí y Bello. El anterior resultado se relaciona directamente con el consumo de combustible, consignado en la Tabla 24.

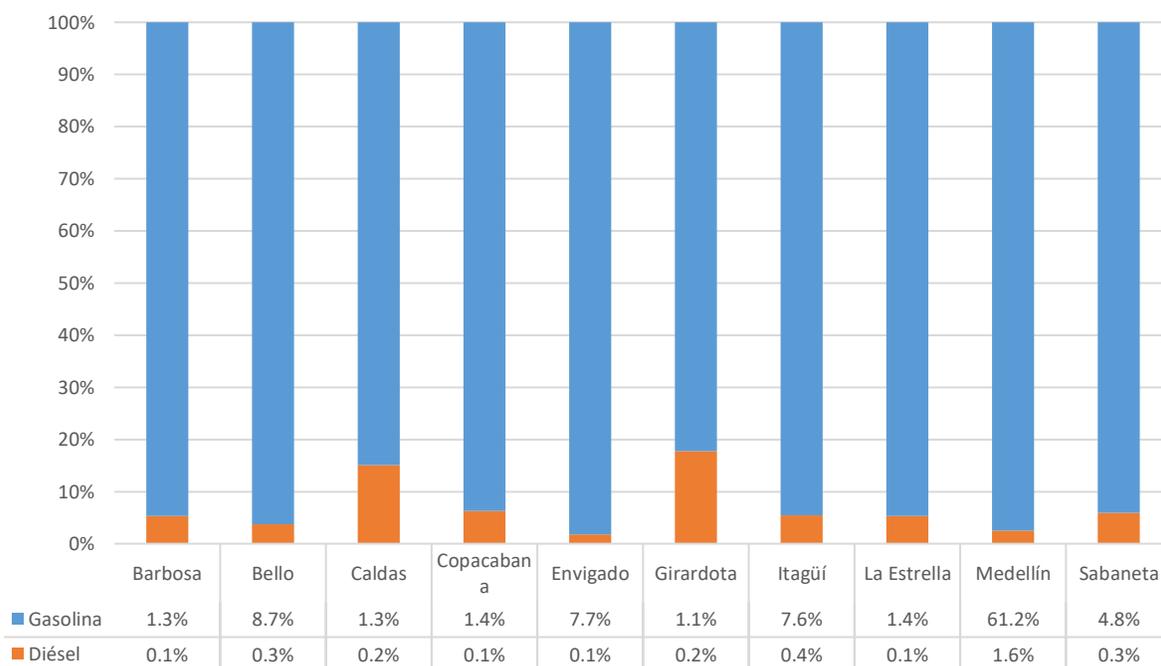
Como se puede observar en la Figura 30, el aporte más importante proviene de la

**Tabla 24 Emisiones estimadas de VOC a partir de las estaciones de servicio de combustible, año 2018**

Municipio	Por Gasolina (ton/año)	Por Diésel (ton/año)
Barbosa	29	2
Bello	195	7
Caldas	28	5
Copacabana	32	2
Envigado	174	3
Girardota	25	5
Itagüí	170	10
La Estrella	32	2
Medellín	1381	36
Sabaneta	109	7
Subtotal	2177	79

Fuente: elaboración propia

**Figura 30 Distribución de emisiones estimadas de VOC provenientes de estaciones de servicio por municipio, año 2018**



Fuente: elaboración propia

### 5.3.2. TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE (CENTRALES MAYORISTAS)

En la Tabla 25 se registran las características y las emisiones de compuestos orgánicos volátiles (VOC) de los tanques de almacenamiento de combustible en las

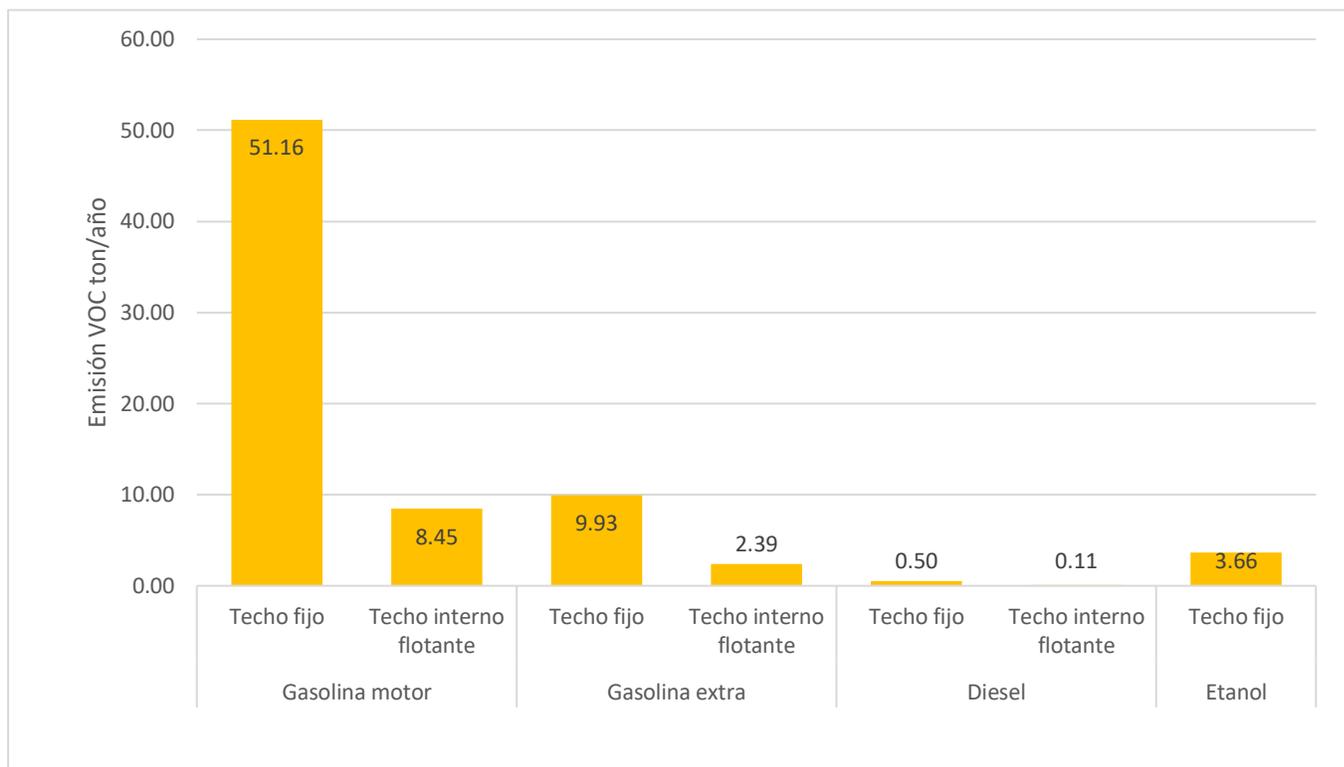
centrales mayoristas, donde se tuvo en cuenta combustibles como la gasolina de motor, gasolina extra, diésel y el etanol, así mismo, en la Figura 31 se observa la emisión de VOC por tipo de tanque y de combustible, donde el 67% de las emisiones se debe a la gasolina a motor en tanques de techo fijo.

**Tabla 25 Emisiones de VOC en tanques de almacenamiento de combustible, año 2018**

Combustible Almacenado	Tipo de tanque	Número de Tanques	Capacidad Acumulada (gal)	VOC (ton/año)
Gasolina motor	Techo fijo	1	350,054	51.16
	Techo interno flotante	6	3,045,153	8.45
Gasolina extra	Techo fijo	1	172,011	9.93
	Techo interno flotante	3	374,114	2.39
Diésel	Techo fijo	4	1,171,480	0.50
	Techo interno flotante	2	1,089,780	0.11
Etanol	Techo fijo	2	266,262	3.66
<b>Total</b>		<b>19</b>	<b>6,468,855</b>	<b>76.20</b>

Fuente: elaboración propia

Figura 31 Distribución de emisiones de VOC (t/año) de tanques de almacenamiento de combustible, año 2018



Fuente: elaboración propia

### 5.3.3. EMISIONES EVAPORATIVAS DE PROCESOS INDUSTRIALES

En la Tabla 26 se consignan los procesos industriales, que en función de sus emisiones evaporativas, fueron seleccionados por su representatividad en el aporte de las emisiones de VOC.

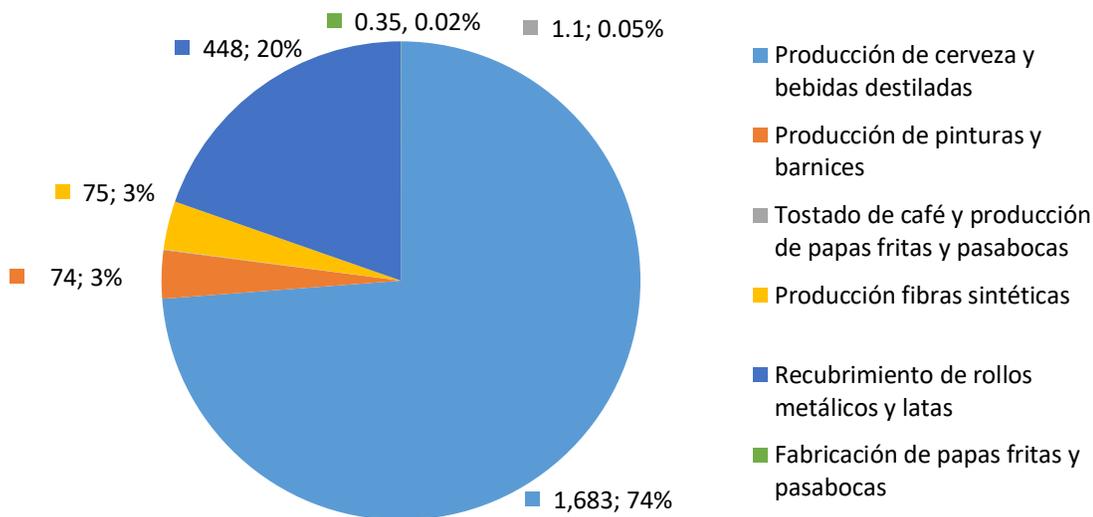
En la Figura 32 se muestra la distribución de las emisiones evaporativas de VOC del sector industrial, en la cual, las empresas seleccionadas emitieron un total de 2,280 toneladas en el 2018, donde se destaca un aporte del 74% asociado a la producción de cerveza y bebidas destiladas seguido del 20% debido al recubrimiento de rollos metálicos y latas.

Tabla 26 Emisiones de VOC evaporativas industriales, año 2018

Proceso	VOC (ton/año)
Producción de cerveza y bebidas destiladas	1,683
Producción de pinturas y barnices	74
Tostado de café y producción de papas fritas y pasabocas	1.1
Producción fibras sintéticas	75
Recubrimiento de rollos metálicos y latas	448
Fabricación de papas fritas y pasabocas	0.35
<b>TOTAL</b>	<b>2,280</b>

Fuente: elaboración propia

Figura 32 Distribución de emisiones de VOC causadas por emisiones evaporativas industriales, año 2018



Fuente: elaboración propia

### 5.3.4. EMISIONES FUGITIVAS SECTOR CONSTRUCCIÓN

En el sector de la construcción se tienen actividades como la explotación minera de material aluvial, gravas y arena. Para dicha explotación de material se tienen dos canteras en el Valle de Aburrá con emisiones de material particulado, ubicadas en los municipios de Bello y Girardota, la explotación minera en estos predios están a cargo de las empresas de Conasfaltos S.A. y Conconcreto S.A. respectivamente.

El AP-42 (Compilation of Air Pollution Emission) de la EPA, cuenta con factores de emisión para la explotación minera y todas las actividades asociadas a ésta. Para la actualización del inventario año base 2018 se realizó la estimación de la emisión de material particulado total y respirable (MP y

PM<sub>10</sub>), generado por la erosión eólica de los predios. Debido a que no se posee la información completa relacionada a la operación de explotación, no se pudo estimar la emisión total asociada. En la Tabla 27 se registran los valores correspondientes a las emisiones de material particulado para las áreas descritas anteriormente.

Tabla 27 Emisiones fugitivas de MP y PM10 sector construcción

Empresa	Emisión (ton/año)	
	MP	PM10
Conconcreto S.A.	2.33	1.16
Conasfaltos S.A.	4.05	2.02
Total	6.37	3.19

### 5.3.5. EMISIONES ATMOSFÉRICAS EN FUENTES DE ÁREA

Finalmente, las emisiones de VOC en conjunto generadas por las fuentes de área

en el Valle de Aburrá, se presentan en la Tabla 28 y su distribución de aporte en la Figura 33.

En el Valle de Aburra las emisiones de VOC provienen en un 49.4% de los procesos industriales, las estaciones de servicio por su parte, son responsables del 48.9% mientras que los tanques de almacenamiento de

combustible contribuyen solo con el 1.7% restante.

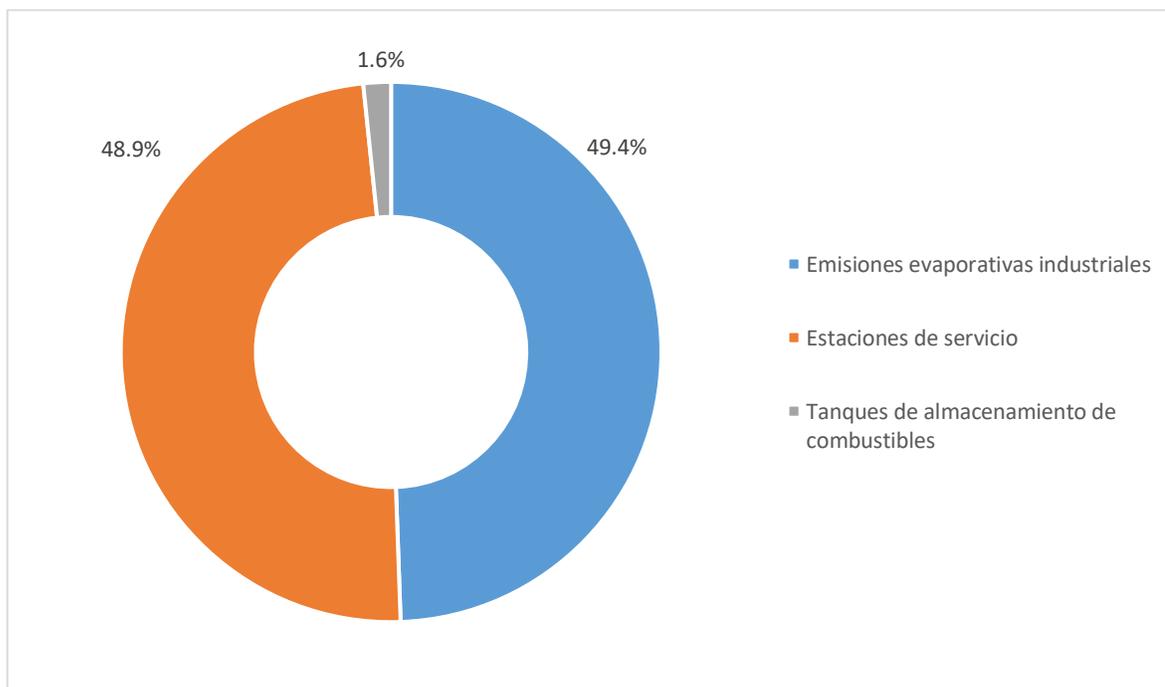
En comparación con la actualización del inventario de fuentes de área año base 2016, las emisiones fueron de 4,404 toneladas, lo que se traduce en un aumento del 4.72%.

**Tabla 28 Emisiones totales de VOC año base 2018**

Fuentes de Área	VOC (ton/año)
Emisiones evaporativas industriales	2,280
Estaciones de servicio	2,256
Tanques de almacenamiento de combustibles	76
<b>Total</b>	<b>4,612</b>

Fuente: elaboración propia

**Figura 33 Distribución de emisiones de VOC en el Valle de Aburrá año base 2018**



Fuente: elaboración propia

## 6. FUENTES DE ÁREA – FRENOS Y DESGASTE DE LLANTAS

Las partículas producidas por el desgaste de frenos y neumáticos tienen una distribución de tamaño y composición muy diferente a las producidas en procesos de combustión. Estas emisiones se consideran de menor importancia comparadas con las del tubo de escape y las evaporativas, pero no deben ser ignoradas ya que pueden contribuir con emisiones de compuestos tóxicos. A continuación, se ofrece información más detallada sobre estos procesos.

Los frenos son usados para desacelerar el vehículo y hay dos configuraciones de uso común: frenos de disco y frenos de tambor, los primeros son de uso común en vehículos livianos y los otros en vehículos pesados. Están conformados por resinas fenol-formaldehído, fibras metálicas, minerales o cerámicas, rellenos de bario y sulfato de antimonio, óxidos de cromo y magnesio, y polvos metálicos. La generación de partículas contaminantes se produce en el momento en que se aplica el freno para desacelerar el vehículo; las fuerzas de cizallamiento por el movimiento relativo de las superficies es el principal mecanismo de la producción de partículas, un mecanismo secundario envuelve la evaporación de material de la superficie a las altas temperaturas que se desarrollan durante el contacto.

En el caso de los neumáticos, éstos llevan la carga del vehículo y los pasajeros, ofrecen tracción, dirección y absorben las

irregularidades de la carretera. Los neumáticos están compuestos de una mezcla compleja de cauchos naturales y sintéticos, metales y aditivos orgánicos que son introducidos para lograr las propiedades deseadas y óxido de zinc que actúa como agente vulcanizador.

El desgaste de los neumáticos es un proceso físico-químico impulsado por la energía de fricción desarrollada entre la banda de rodadura y el pavimento, y depende de numerosos factores como el patrón de manejo, condiciones, antigüedad y posición de los neumáticos, condiciones y antigüedad de la carretera, la tracción, el clima, entre otros.

### 6.1. METODOLÓGÍA DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES POR DESGASTE DE FRENOS Y NEUMÁTICOS

Para el cálculo de las emisiones por el desgaste de frenos y neumáticos, se adiciona el factor de emisión de esta actividad en el factor en caliente y de esta manera se obtiene la tasa de emisión de material particulado menor de 10  $\mu\text{m}$  (único contaminante considerado en el desgaste de frenos y neumáticos).

Los factores de emisión de esta actividad han sido recopilados del informe "Emissions Inventory Guidebook, 2009" desarrollado por la European Environment Agency (EEA), específicamente del capítulo "Road Vehicle, Tyre and Brake Wear" (disponible en <[www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)>). En la Tabla 29 se tabulan estos factores de emisión de acuerdo a la clasificación del vehículo.

Tabla 29 Factores de emisión de PM10 para el desgaste de frenos y neumáticos

Tipo de vehículo	(g/km)		
	Desgaste de frenos	Desgaste de neumáticos	Total
Motocicletas	0,0037	0,0028	0,0065
Carros de pasajeros	0,0073	0,0064	0,0137
Camiones de carga liviana	0,0115	0,0101	0,0216
Camiones de carga pesada	0,0320	0,0270	0,059

Fuente: Road vehicle, tyre and brake wear. EMEP/CORINAIR, 2009

Se escogen estos factores de emisión de desgaste de frenos y neumáticos debido a que esta información es la más actualizada encontrada en la literatura internacional. Para obtener detalles relacionados con la estimación y metodología de esta actividad, se puede remitir al documento "Road Vehicle, Tyre and Brake Wear" de la EEA.

## 6.2. EMISIONES POR EL DESGASTE DE FRENOS Y NEUMÁTICOS EN EL VALLE DE ABURRÁ

Por medio del modelo ETROME y haciendo uso de los factores de emisión tabulados en la Tabla 29, se estimó una emisión de 122 toneladas de PM10 para el año 2018, producidos por el desgaste de frenos y neumáticos usados en motocicletas, vehículos livianos, camiones y buses.

**La metodología para estimar estas emisiones corresponde a la ejecución del modelo de fuentes móviles, usando únicamente los factores de emisión de esta actividad, lo cual permite identificar el aporte anual de los vehículos que circulan en el Valle. En la Tabla 30 puede verse la emisión de PM<sub>10</sub> discriminada de acuerdo a varias categorías y en la**

Figura 34 la participación porcentual de cada categoría.

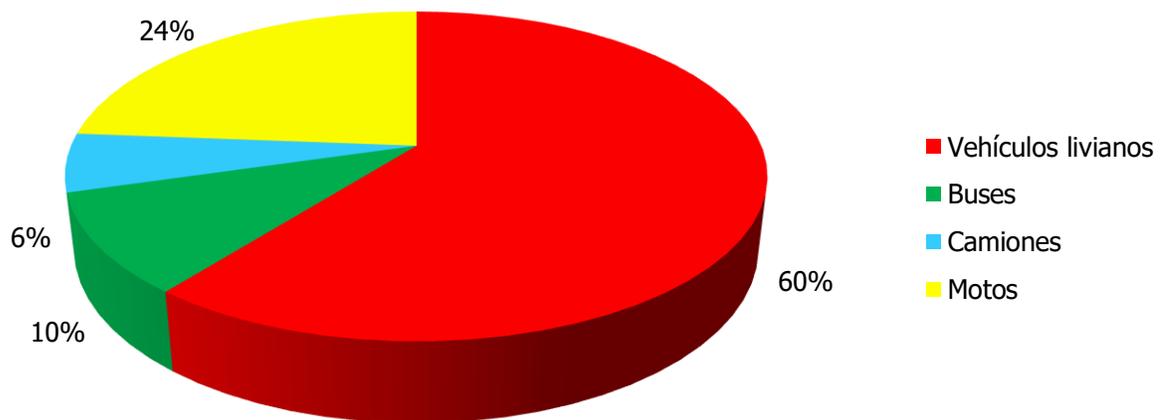
Tabla 30 Emisiones de PM10 por el desgaste de frenos y neumáticos, año 2018

Categoría	PM10 (t/año)
Vehículos livianos	74
Buses	12
Camiones	7
Motos	29
Total	122

Fuente: elaboración propia

Las emisiones por el desgaste de frenos y neumáticos corresponden al 5% del PM<sub>10</sub> emitido por las fuentes móviles. Aunque es una pequeña proporción, es importante conocer este porcentaje, ya que es una fracción que difícilmente puede ser controlada.

Figura 34 Distribución de las emisiones de PM10 por el desgaste de frenos y neumáticos



Fuente: elaboración propia

Los vehículos livianos y las motos aportan el 84% de este tipo de emisiones, lo que se atribuye a que el 94% del parque automotor está conformado por vehículos livianos y motos, es decir, a pesar de que los

buses y los camiones tienen un nivel de actividad y un factor de emisión mayor que los vehículos livianos y las motos, la cantidad de vehículos produce un mayor impacto al momento de determinar estas emisiones.

## 7. FUENTES DE ÁREA BIOGÉNICAS - VEGETACION

La vegetación emite naturalmente compuestos orgánicos volátiles, estas emisiones forman parte de los ciclos propios del planeta, ayudando a regular la temperatura a escala global y propiciando el balance químico de la atmósfera. La caracterización de este tipo de emisiones es compleja por la gran variedad de especies vegetales. En varias investigaciones se ha encontrado que las emisiones de la masa foliar están centradas en compuestos como los hemiterpenos (poseen cinco carbonos en su estructura) y monoterpenos (poseen diez carbonos en su estructura) y sobre árboles dominantes como los pinos y los encinos del bosque templado.

En algunas plantas los VOC son acumulados en órganos especializados en tallos y hojas, que pueden ser desprendidos como mecanismos de defensa contra patógenos y herbívoros o pueden ayudar a la cicatrización después del daño que estos

organismos han producido. Otras posibles funciones de los VOC son la alteración de la floración de las plantas vecinas, la protección de las membranas vegetales contra las altas temperaturas, o pueden estar implicadas en el desarrollo de incendios forestales.

### 7.1. RESULTADO DE EMISIONES EN FUENTES BIOGÉNICAS

Para el cálculo de las emisiones se aplicó el modelo G93 desarrollado por Alex Guenther en el año 1.993, en el cual las emisiones varían con la temperatura y la radiación fotosintéticamente activa (PAR, por su sigla en inglés). De esta manera, las emisiones son estimadas a partir de la biomasa específica, factores de emisión y algoritmos que describen la dependencia de diferentes variables (temperatura, radiación solar, humedad, precipitación, intensidad del viento, entre otros). El modelo muestra las especies químicas agrupadas en cuatro categorías: isopreno, monoterpenos, otros VOC y monóxido de nitrógeno. Los resultados encontrados se muestran en la Tabla 31.

Tabla 31 Emisiones biogénicas en el Valle de Aburrá (t/año)\*

Contaminante	Bosques	Cultivos	Matorrales	Subtotal	Total
Isopreno, C <sub>5</sub> H <sub>8</sub>	643	55	3,407	4,104	8,602 (VOC)
Monoterpenos, C <sub>10</sub> H <sub>x</sub>	644	40	999	1,683	
Otros VOC	422	529	1,864	2,815	
Monóxido de nitrógeno, NO	2	211	106	319	319 (NO <sub>x</sub> )

Fuente: elaboración propia \*Convención: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Las fuentes naturales consideradas emiten 8,602 t/año de compuestos orgánicos volátiles (isopreno, monoterpenos y otros VOC) y 319 t/año de monóxido de nitrógeno.

Los resultados obtenidos para las diferentes especies forestales y agrícolas permiten concluir que los matorrales emiten una mayor cantidad de VOC, una de las

causas es que este tipo de vegetación cubre el 48% de la zona de estudio. Aproximadamente el 70% de las emisiones de NO provienen de los cultivos, mientras los bosques aportan un 20% de las emisiones de VOC (isopreno, monoterpenos y otros VOC)

## 7.2. FUENTES BIOGÉNICAS EN EL VALLE DE ABURRÁ

La información sobre uso del suelo se obtuvo de mapas locales para un dominio de 40 x 40 km<sup>2</sup> con resolución de 1 km<sup>2</sup>; en cada celda se identificó el uso del suelo determinando el porcentaje ocupado por

bosques (coníferas y eucaliptos), cultivos (maíz, frijol, café, caña, papa y frutales) y matorrales. El porcentaje y área ocupada por cada tipo de vegetación se muestra en la Tabla 32, donde puede verse que un gran porcentaje está cubierto por matorrales o bosques altos.

Tabla 32 Área vegetativa del Valle de Aburrá

Tipo de uso del suelo	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje (%)
Bosques	105	6.6
Cultivos	423	26.4
Matorrales	770	48.0
Otros	302	19.0

Fuente: elaboración propia

Con esta información se procedió a realizar la malla de distribución de usos del suelo para calcular la emisión de cada uno de los tipos de vegetación.

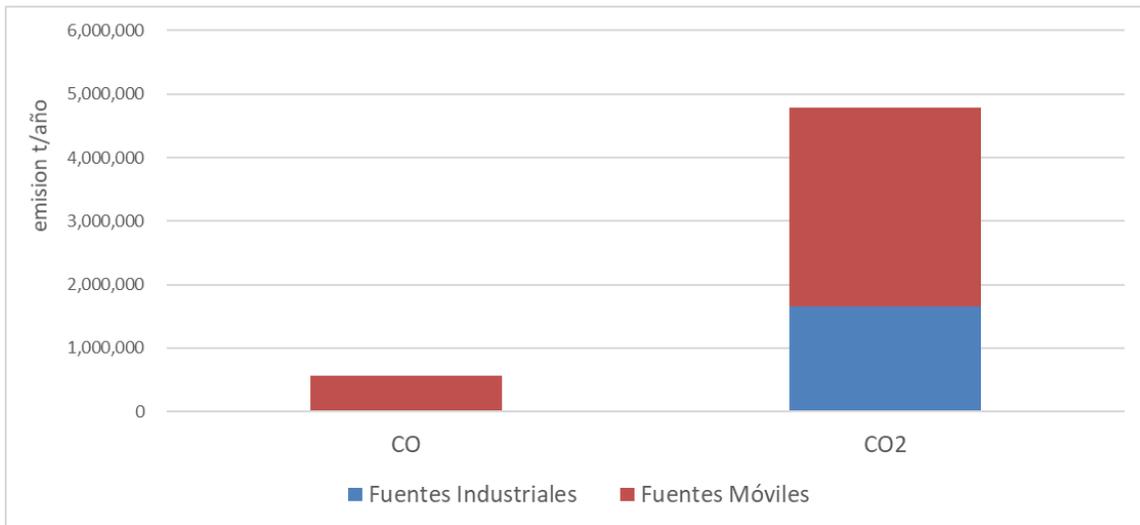
## **8. EMISIONES TOTALES DEL AREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ**

El Inventario de Emisiones Atmosféricas para el área Metropolitana del Valle de Aburrá puede ser consultado en la herramienta MODEAM en la página web del AMVA para visualizar los resultados totales y que se muestran en la siguiente ilustración en la que se observan las diferentes fuentes estimadas y su aporte para cada contaminante estimado.

Las gráficas siguientes muestran que la mayor cantidad de emisiones son liberadas

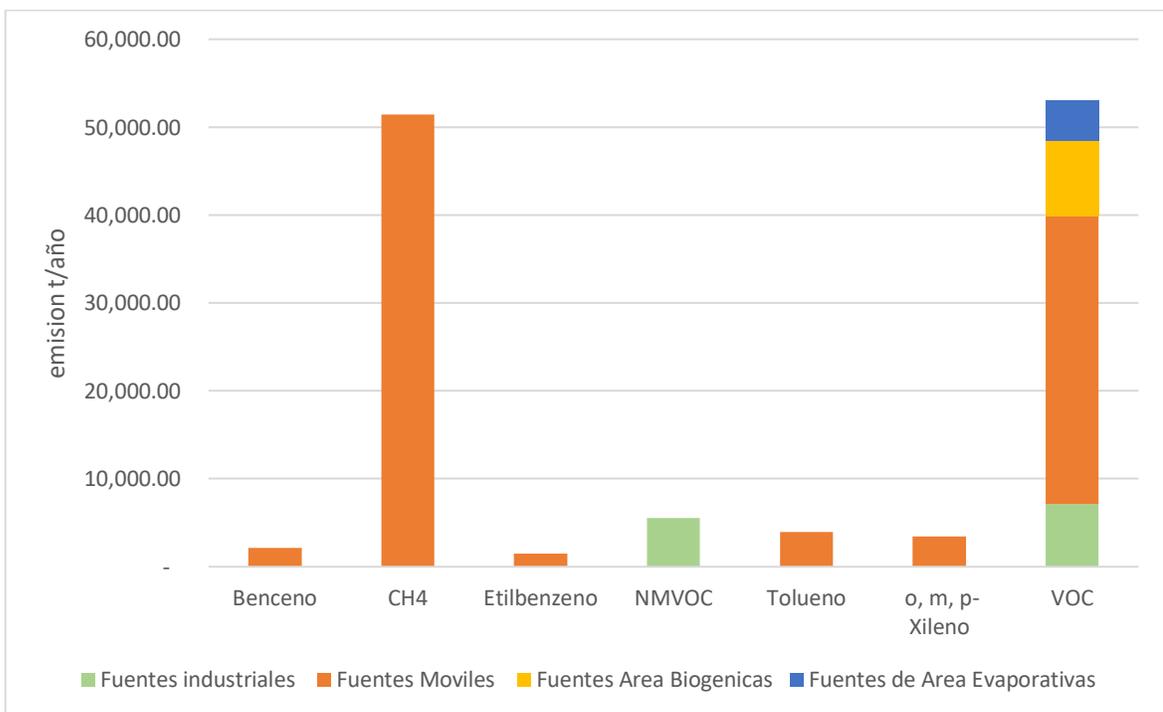
por las fuentes fijas puntuales industriales y las fuentes móviles. Si bien el material particulado tiene un total de 2873 toneladas, es necesario tener en cuenta las emisiones de los óxidos de nitrógeno y los compuestos orgánicos (19,000 y 53,000 respectivamente) los cuales producen otros contaminantes que son tóxicos a partir de las reacciones que se llevan a cabo en la atmosfera, esto se puede revisar en el componente de simulación SMA. Para los gases de efecto invernadero como CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O se identifica como CO<sub>2</sub> equivalente con un total de 6,119,640.0 toneladas. (ver anexo 8.1)

**Figura 35 Aportes de emisiones de CO y CO<sub>2</sub> de fuentes industriales y fuentes móviles**



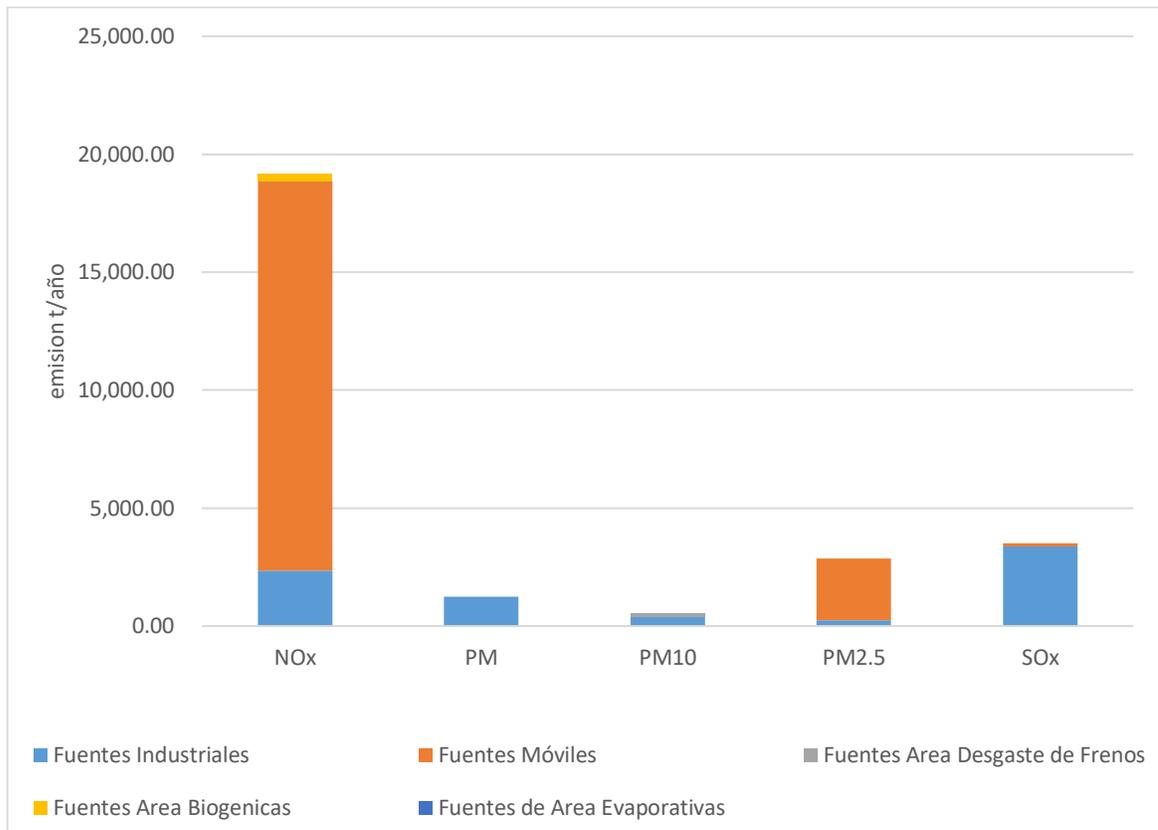
Fuente: elaboración propia

**Figura 36 Aportes de emisiones de otros contaminantes por las diferentes fuentes inventariadas.**



Fuente: elaboración propia

Figura 37 Aportes de emisiones de contaminantes criterio por las diferentes fuentes inventariadas.



Fuente: elaboración propia

Tabla 33 Emisiones totales por cada tipo de fuente

Contaminantes	Fuentes Industriales	Fuentes Móviles	Fuentes Área Desgaste de Frenos	Fuentes Área Biogénicas	Fuentes de Área Evaporativas	Total por componente
Benceno	0,492	2,124				2,124
CH <sub>4</sub>	60	51,376				51,436
CO	3,228	562,557				565,785
CO <sub>2</sub>	1,653,225	3,138,795				4,792,020
Etilbenzeno	0,031	1,472				1,472
NMVOOC	5,573					5,573
N <sub>2</sub> O	27	113				140
NO <sub>x</sub>	2,346	16,522		319		19,187
PM	1,243					1,243
PM1	69					69
PM10	385		122			507
PM <sub>2,5</sub>	248	2,625				2,873
SO <sub>x</sub>	3,376	144				3,520
Tolueno	0,306	3,953				3,953
o, m, p-Xileno	0,024	3,454				3,454
VOC	7,109	32,736		8,602	4,612	53,059

Fuente: elaboración propia \*Convención: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

## 9. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRES Y VALIDACIÓN DEL INVENTARIO

En este capítulo se detalla los alcances, limitaciones y las validaciones que se realizan al inventario de emisiones atmosféricas año base 2018 de la región metropolitana del valle de Aburrá. El análisis que a continuación se presenta, se especifica por cada una de las fuentes estimadas y al final se realiza la validación aplicando el modelo de dispersión de contaminantes SMA.

### 9.1. FUENTES MÓVILES EN RUTA

Para la estimación de las emisiones de las fuentes móviles, tal como se dijo anteriormente, se aplica el modelo LEAP por lo tanto el análisis de certeza se incluye en la discusión.

#### 9.1.1. INCERTIDUMBRE DEL MODELO LEAP

Una de las razones para usar modelos de estimación se sustenta en el hecho del elevado costo y poca practicidad que implicaría realizar mediciones a la totalidad del parque automotor o a una muestra estadísticamente representativa del mismo.

Por ejemplo, para el Valle de Aburrá se tienen cerca de 70 subcategorías vehiculares; que, si se realizan 30 mediciones a cada una de ellas para que sea estadísticamente significativo, para cada contaminante (al menos 6), se requeriría un tiempo mayor a 5 años, sin mencionar los costos asociados.

Por otro lado, a nivel internacional se encuentra que el principal instrumento para el desarrollo de un plan de descontaminación y de atención de episodios de

contaminación, es el modelo de inventario de emisiones para lo cual usan el modelo MOBILE6 en Estados Unidos o el Modelo COPERTT para el caso de la Unión Europea. Esto señala que la utilización de modelos es usada regularmente para soportar la toma de decisiones de las autoridades ambientales.

El modelo LEAP cuenta con un amplio número de aplicaciones que se pueden verificar en publicaciones y trabajos de investigación que evidencian la versatilidad y las diversas aplicaciones de LEAP. Este modelo ha tenido un impacto significativo en políticas energéticas y ambientales a nivel mundial, por ejemplo, en California fue usado para pronosticar la demanda de energía e identificar combustibles alternativos; en México se usó para determinar la factibilidad de escenarios futuros teniendo en cuenta el uso moderado y alto de biocombustibles en los sectores del transporte y generación de electricidad; en el Líbano se evaluaron opciones de mitigación con el fin de reducir emisiones en el sector de generación de electricidad con énfasis en el uso de recursos renovables; en Irán se analizó el consumo de energía y varios tipos de emisiones; en lo relacionado con el transporte urbano, en el Valle de Katmandú y en la ciudad de Delhi, se analizaron las emisiones de contaminantes atmosféricos y el uso de energía [2].

Los resultados del modelo LEAP, así como los datos que se utilizan para alimentarlo han servido para:

- La construcción del inventario de gases de efecto invernadero para el Valle de Aburrá con metodología IPCC, año base 2011. El cual contó con la asesora de inventarios GEI del IPCC, doctora Laura Dawidowski.

- Elaboración del inventario de gases de efecto invernadero con metodología GPC (a escala comunitaria), año 2015.

- Proyección de tasas retributivas por emisiones atmosféricas, realizado por Econometría y el Banco Mundial.

- Estimación de gases de efecto invernadero aplicando la metodología del WRI. Clean Air Institute y World Resources Institute.

- Plan integral de la Gestión para la calidad del aire PIGECA Clean Air Institute

- Diferentes apoyos técnicos para el AMVA

Este modelo presenta grandes ventajas para la estimación de las emisiones, ya que permite calcular de manera ágil y confiable la cantidad de contaminantes emitidos por el parque automotor, sin embargo, para obtener alta confiabilidad de los resultados es necesario garantizar que los datos de entrada del modelo representen de manera fiel las condiciones de la región, por lo tanto, a continuación se verifican y analizan las incertidumbres asociadas a los datos para el modelo LEAP.

### **9.1.1.1. Vehículos Registrados**

El modelo LEAP requiere los datos del parque automotor discriminados por tipo de vehículo (auto, buses, motos, etc.), tamaño (centímetros cúbicos del motor), modelo y tipo de combustible.

El modelo depende de la disponibilidad de esta información, la cual ha mejorado año tras año, siendo cada vez más accesible debido a la estandarización y sistematización de los datos.

Para tener esta información desde el 2011 se viene solicitando las bases de datos

discriminadas por número de placa, clase (automóviles, motos de 2 y 4 tiempos, taxis, buses, camiones, tractocamiones y volquetas), tipo de servicio (público, privado o especial), modelo, cilindraje y si el vehículo se encuentra activo o no en las Secretarías de Transporte y Tránsito de los municipios que conforman el valle de Aburrá y se tomaron en cuenta únicamente los vehículos activos. Desde este año se descartó la información del RUNT debido algunos datos eran generados a través de proyecciones y a que no se especificaba el estado del vehículo (inservible, destruido, trasladado, entre otros).

Por otro lado, desde el 2016 se solicitan las bases de datos del transporte público individual (TPI), transporte público colectivo (TPC), Metroplús y vehículos chatarrizados.

Es importante destacar que estas bases de datos tan detalladas aportadas por las secretarías permiten que la desagregación del parque automotor cada vez sea más específica. Es el caso de la división de las categorías de taxis y autos de servicio especial y las categorías de buses y buses de servicio especial, ya que con las placas se pueden extraer de la base de datos general de las secretarías y poder dividir los buses de servicio público y los autos de servicio público.

Hasta el momento con la información disponible no es posible determinar para ninguna categoría qué vehículos registrados y activos circulan por fuera del área metropolitana y qué vehículos registrados en otros municipios por fuera del valle de Aburrá están transitando en la región.

Esta información de las secretarías, la cual es considerada la fuente más confiable y con la cual se carga la información en el

RUNT (información suministrada por el RUNT, Anexo 9.1), se validó con la información del Contrato CI 0762 de 2017 “Estudio de Transporte de Carga en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá”, suscrito entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín, en donde se solicitaron las bases de datos de los vehículos registrados al RUNT y con información de una ensambladora de motos de la región que también solicitó la información al RUNT. Aparte, los datos se validaron con la ANDI para realizar las proyecciones de ventas de autos y motos en el cálculo de la estimación

de las emisiones a 2030 para la actualización del PIGECA.

Para el análisis de incertidumbres se aplica el método de error relativo absoluto por cada variable, en este caso en la Tabla 34 se realiza un análisis entre los datos aportados por las secretarías de tránsito y transporte y los datos del RUNT aportados por el estudio de transporte de carga anteriormente citado, y se observa un porcentaje promedio de error relativo del 2.97%.

**Tabla 34 Análisis del porcentaje de error entre los datos de las STT y el RUNT\***

Datos STT 2018		Datos RUNT 2018		% Error
Categoría vehicular	Total (XSTT)	Categoría vehicular	Total (XRUNT)	
Autos	593,465	automóvil		
Taxis	30,429	Camioneta		
Autos servicio especial	18,349	Campero		
Subtotal Autos	642,243		657,136	2.27
Buses	5,292	Bus		
Buses servicio especial	14,449	Buseta		
Metroplús	448	Campero		
Subtotal Buses	20,189		21,247	4.98
Camiones	30,571	Camiones	30,737	0.54
Motocicletas 2T	19,765			
Motocicletas 4T	826,714	Motos	884,608	6.54
Tractocamiones	6,528	Tractocamiones	6,645	1.76
Volquetas	4,963	Volquetas	5,050	1.72
Error Relativo promedio				2.97

Fuente: elaboración propia \*Convención: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

### 9.1.1.2. Kilómetros recorridos

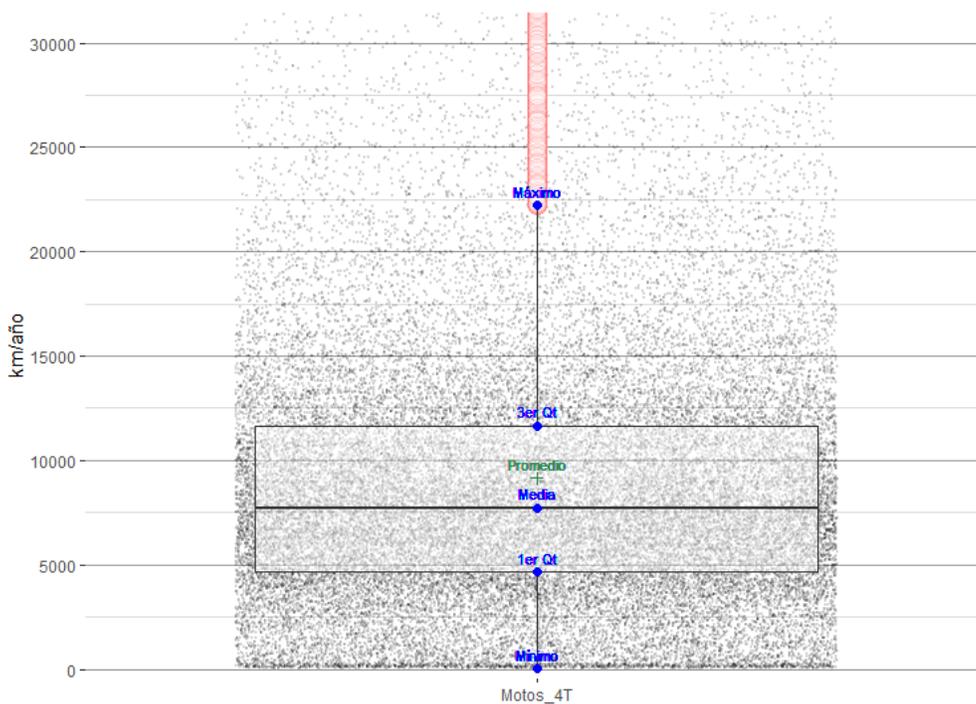
Como se relacionó en el numeral 2.2.4 de kilómetros recorridos, estos se calcularon teniendo en cuenta diferentes fuentes de información. En algunos casos se disponía de información medida como es el caso de metroplús; pero en el caso de motocicletas y autos la estimación de la distancia que

recorren anualmente se extrajo de los odómetros registro que se encuentran en los CDA. Con estos valores se ejecutó el modelo estadístico usando las gráficas de caja y bigotes, como se muestra en la Figura 38 y Figura 39 para la categoría de motos 4T y automóviles a gasolina, GNV y diésel.

Es importante anotar que solo se requiere una estimación inicial del kilometraje (VKTO), pues esta variable se ajusta junto con el rendimiento del combustible hasta cerrar el balance energético, es decir, hasta que la demanda total de energía estimada en el modelo LEAP sea igual a la demanda de energía calculada a partir de los consumos de gasolina, diésel y gas natural vehicular en el Valle de Aburrá. Así, al ajustar el balance energético se estimaron las distancias anuales promedio recorridas en el primer año de vida.

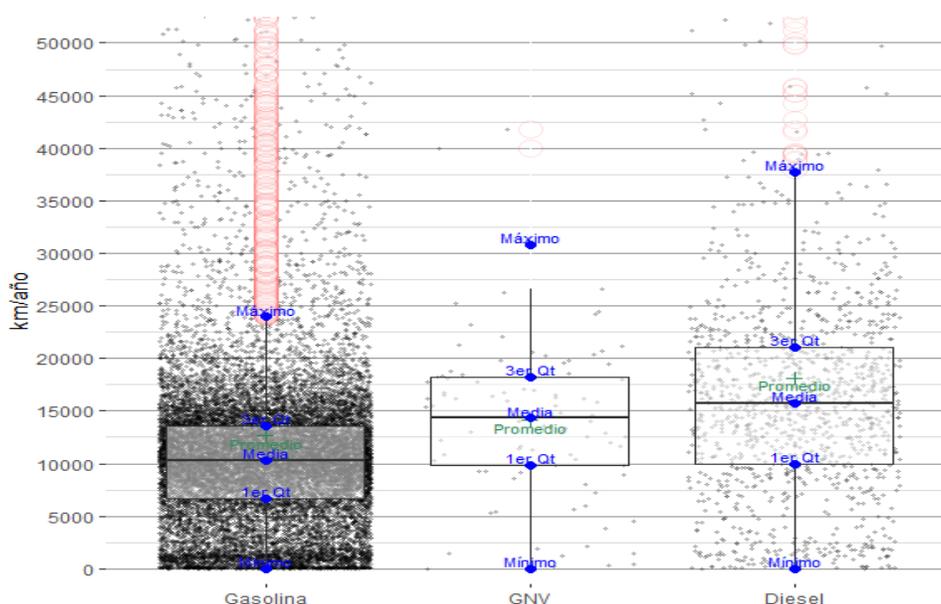
El error relativo absoluto se calcula a partir de los valores estimados por el modelo LEAP con los datos encontrados en las bases de datos para las categorías conocidas y los valores cuartil 95 para los autos y las motos. Los resultados se muestran en la Tabla 35 que indica una diferencia del 3.40%, en promedio y que además muestra que las categorías buses, motos y autos son las de mayor incertidumbre.

**Figura 38 Grafica de caja y bigotes kilómetros recorridos al año categoría motos 4T**



Fuente: elaboración propia \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Figura 39 Grafica de cajas y bigotes kilómetros recorridos al año categoría autos



Fuente: elaboración propia \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Tabla 35 Análisis del porcentaje de error entre kilómetros recorridos del modelo LEAP y las bases de datos aportadas\*

Datos VKT0 inventario		Datos kilómetros recorridos al año		Variación relativa
Categoría vehicular	VKT0 (estimado)	VKT0 BD y R	Fuente	
Autos	16,667	17,182	CDAs	2.99
Taxis	54,333	54,066	CDAs	0.49
Buses	41,222	45,000	Movilidad AMVA	8.39
Metroplús	53,667	53,761	STT Medellín	0.17
Camiones	43,222	42,000	BD Emp Trans	2.91
Motos 4T	11,500	12,242	CDAs	6.06
Volquetas	50,000	51,416	AMVA-UNAL	2.75
Variación Relativa promedio				3.40

Fuente: elaboración propia \*Convención: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

### 9.1.1.3. Factores de emisión

Una limitación en la estimación de emisiones vehiculares es el uso de factores de emisión internacionales, pero como se dijo anteriormente es una aproximación a la realidad puesto que es muy costoso y llevaría mucho tiempo tener datos locales. Sin embargo, el AMVA ha llevado a cabo

mediciones que permiten tener datos del parque automotor local a través de los proyectos FEVA I y FEVA II realizados con Universidad de Antioquia. En este midieron emisiones con dos métodos permitiendo obtener factores de emisión para motos 4T, autos a gasolina, buses y camiones diésel solo para 3 contaminantes (PM<sub>2.5</sub> NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>); los cuales fueron incluidos en el cálculo de las

emisiones (la metodología para ingresar estos factores de emisión medidos se explica en el capítulo de factores de emisión para fuentes móviles en carretera).

En el presente informe se optó por los factores de emisión del modelo IVE (Vehicle Emissions), corregidos a las condiciones locales para las variables temperatura, humedad y altura y para la calidad del combustible (azufre en la gasolina, benceno en la gasolina, mezcla gasolina-alcohol y azufre en el diésel), pues cuenta con gran diversidad de vehículos, modelos, tecnologías, y de esta manera se reduce la incertidumbre por la selección de las categorías vehiculares y los factores de emisión asociados.

Los factores de emisión del IVE permite realizar una configuración detallada del parque automotor pues posee factores de emisión para aproximadamente 450 tecnologías vehiculares clasificadas de acuerdo al tipo de vehículo (p. ej. auto, bus/camión, motores pequeños), tipo de combustible (p. ej. gasolina, diésel, gas natural), peso (liviano, mediano, pesado), tipo de dispositivo para la mezcla aire/combustible (p. ej. carburador, inyección directa, inyección de combustible multipunto), control de emisiones por el tubo de escape (p. ej. catalizador, 3-vías/EGR–exhaust gas recirculation).

Se quiso realizar una comparación entre los valores del IVE con los de FEVA I y II pero la comparación, no es posible. Esta

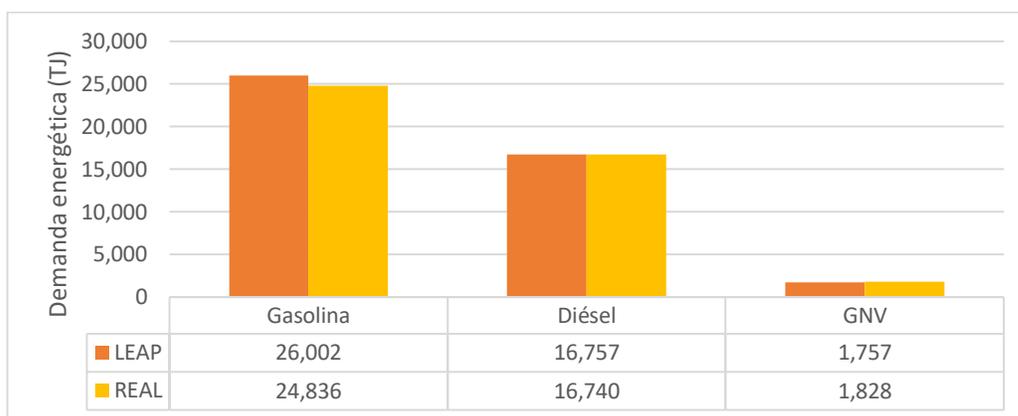
incertidumbre no es factible calcularla pues se atribuye a que en los proyectos FEVA se realizó solo la medición de un vehículo por categorías globales (autos, motos, camiones y taxi) y en el IVE se consignan promedios de más de 10 mediciones en cada categoría con inclusión de rangos de modelo, siendo necesario en el futuro realizar más experimentos por categoría vehicular. Por lo tanto, este valor no se incluye en la evaluación final del inventario.

### **9.1.2. VALIDACIÓN DE MODELO LEAP**

La validación de los resultados se realiza una vez se ingresaron las variables de entrada al modelo LEAP, se calibra el balance energético con una diferencia inferior a  $\pm 5\%$  en comparación con el valor de la demanda energética real obtenida para gasolina y diésel registrada en las bases de datos de la Unidad de Planeación Minero-Energética y en Empresas Públicas de Medellín para el año 2018 en el caso de Gas Natural Vehicular (GNV).

Ajustar el balance energético estimado al real disminuye la incertidumbre de los resultados, pues se está asegurando que el kilometraje y la eficiencia de uso de combustible se acerquen en mayor medida a los valores reales del parque automotor del Valle de Aburrá; lo que a su vez permite que las emisiones (calculadas en base al kilometraje recorrido y al consumo de combustible) se ajusten a los valores reales.

Figura 40 Balance energético real y estimado, año 2018\*



Fuente: elaboración propia \*Convención tabla: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

La diferencia entre los valores obtenidos con el modelo LEAP y las bases de datos aplicando el método de error relativo

denota en la Tabla 36 un valor de 2.8%, con una mayor certidumbre para el consumo de Diésel.

Tabla 36 Análisis del porcentaje de error entre el balance energético real y el estimado (TJ)\*

Demanda energética Modelo LEAP		Demanda energética UPME-EPM		Variación Relativa
Combustible	X estimada	X BD	Fuente	
Gasolina	26,002	24,836	UPME	4.69
Diésel	16,757	16,740	UPME	0.04
GNV	1,757	1,828	EPM	3.88
		Variación promedia	relativa	2.88

Fuente: elaboración propia \*Convención: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

### 9.1.3. COMPARACIÓN CON OTROS INVENTARIOS INTERNACIONALES

A continuación, se presentan la comparación de resultados del inventario de fuentes móviles (transporte rodado) del Valle de Aburrá con inventarios de regiones similares.

Los inventarios recopilados son los de Bogotá (Documento Técnico de Soporte, Modificación del Decreto 98 de 2011, Subdirección de Calidad del Aire, Auditiva y Visual –SCAAV, Versión 3.0 del 17.02.2017, Secretaria de Ambiente), Santiago de Chile

(Actualización del Inventario de Emisiones de Contaminantes Atmosféricos en la Región Metropolitana. DICTUC S.A., 2012), Ciudad Lima-Callao (Resultados del Inventario, Cuenca Atmosférica de la Ciudad Lima-Callao. DIGESA, 2000), Distrito Metropolitano de Quito (Inventario de Emisiones del Distrito Metropolitano de Quito, Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2003), La Paz (Inventario de Emisiones del Municipio de la Paz. Gobierno Municipal de la Paz, 2007) y el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático INECC, Elaboración del Inventario Nacional de Fuentes Móviles para México y proyección 20130 mediante el uso del

modelo Motor Vehicle Emission Simulator (MOVES), 2014)

En la Tabla 37 pueden verse los resultados de emisión de contaminantes per

cápita, en varios centros urbanos de Latinoamérica, entre los que se destacan Santiago de Chile y México por sus graves problemas de contaminación del aire en las dos últimas décadas.

**Tabla 37 Emisiones atmosféricas per cápita por fuentes móviles en varios centros urbanos de Latinoamérica (kg/año/habitante) \***

País	Centro urbano	NOx	SOx	VOC	PM <sub>2.5</sub>
Colombia	Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2018)	4,23	0.04	8.37	0.67
Chile	Santiago de Chile (2015)	3.41	0.012	---	0.152
Colombia	Bogotá (2014)	11.56	1.51	12.24	0.14
México	México (2016)	4.4	0.07	17.50	0.58
Perú	Ciudad Lima-Callao (2000)	11.80	-	-	
Ecuador	Distrito Metropolitano de Quito (2003)	8.91	1.73	6.58	0.56
Bolivia	Municipio de La Paz (2007)	12.24	0.01	14.29	-

Fuente: elaboración propia. \*Convención: Separación de miles con coma (,) y de decimal con punto (.)

Las variaciones en emisión de contaminantes por fuentes móviles están asociadas al tamaño del parque automotor, su distribución, el nivel de actividad, de las categorías incluidas en él; los patrones de conducción, la calidad de los combustibles y las tecnologías vehiculares, y por supuesto a la metodología de estimación de emisiones. Sin embargo, se nota que los valores están dentro de un mismo rango especialmente para el contaminante PM<sub>2.5</sub>.

## 9.2. FUENTES FIJAS INDUSTRIALES

El análisis de la veracidad del inventario para las fuentes fijas se ejecuta mediante la comparación de las variables asociadas como son los factores de Emisión, la cantidad de procesos y la comparación con las mediciones.

Es necesario destacar que, al igual que en las fuentes móviles, una limitación en la estimación de las emisiones atmosféricas es el uso de factores de emisión internacionales puesto que, si bien se tiene el registro de una buena cantidad de ductos, no se tiene la medición de todos los contaminantes

especialmente el PM<sub>2.5</sub>, por lo tanto, es necesario el uso de valores medidos en otros países. Cabe decir que la mayoría de los inventarios en otras ciudades aplican la misma metodología.

En los siguientes apartados se realiza el análisis de las incertidumbres en este tipo de fuente por cada variable incluida en la estimación de la emisión.

### 9.2.1. INCERTIDUMBRES DE CALCULO DE EMISIONES DATOS DE REGISTRO DE EMISIONES

La recolección de información para el modelo IEFI (Modelo de Inventario de emisiones de Fuentes Industriales), se realiza mediante la consulta de expedientes metropolitanos, que son los archivos correspondientes a las empresas del sector manufacturero con obligaciones ambientales ante el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA).

En dichos expedientes reposa la información completa de la empresa tanto

legal como aquella relacionada con sus procesos productivos, adicionalmente se encuentran informes de monitoreos isocinéticos con la información en cuanto a la emisión de contaminantes criterio según la Resolución 909 de 2008. Adicionalmente se tiene la plataforma web del sistema de información metropolitano (SIM), donde se puede visualizar informes técnicos realizados por personal del grupo de Control y Vigilancia, en los cuales se consignan todas las obligaciones ambientales que posee el usuario (empresa).

La información recolectada es alimentada a la base de datos actualizada del aplicativo de fuentes fijas industriales, con el fin de realizar consultas y gestión de la información por parte de los grupos técnicos del AMVA y UPB.

Desde el aplicativo se ingresa la información del sector productivo o actividad industrial de la empresa según el código CIIU. Esta información es ingresada de manera manual y comparada con la base de datos contemplada por el grupo de control y

vigilancia, lo que es una desventaja ya que requiere una cantidad de tiempo mayor. Dado que esta información se encuentra en el portal de la Entidad, en futuros inventarios se desea generar un enlace con el aplicativo web SIGAIRE IEFI creado por UPB en convenio con AMVA, con el objetivo de minimizar tiempo o reproceso en la lectura de expedientes metropolitanos.

Para determinar la incertidumbre asociada al número de empresas registradas en el Valle de Aburrá, se comparan las empresas con emisiones atmosféricas arrojadas por el inventario, en la base de datos de empresas registradas ante el DANE. Según este, se tiene un registro de 1,451 empresas para los diferentes subsectores industriales, de los cuales se filtraron a un valor de 662 con potencial de tener emisiones atmosféricas.

En la Tabla 38 se presenta la comparación entre el número de empresas en ambas bases de datos, en el caso de las sectorizadas con el código CIIU se trató de identificar cuales tendrían emisiones.

**Tabla 38 Comparación número de empresas registradas**

Sector	Empresas en AMVA	Empresas seleccionadas DANE	Diferencia porcentual AMVA, DANE
BAT	164	180	10%
TXT	110	97	12%
CVL	17	12	29%
PAP	12	21	75%
QMC	60	78	30%
PCE	34	27	21%
MMC	114	220	93%
CUR	7	10	43%
ASF	8		
TER	52		
MAD	28	17	39%
OTR	92		
Variación relativa promedia	698	662	5%

Fuente: elaboración propia.

El cálculo de la incertidumbre se realiza con el total de las industrias en cuestión y por lo tanto se tiene una certeza promedio del 93% de tener la totalidad de los registros en el AMVA; sin embargo, hay sectores en los cuales no se conoce si la empresa registrada con un CIU específico tiene o no emisiones atmosféricas, por lo tanto la incertidumbre se analiza con los totales de empresas reportando un 5%, es necesario realizar un censo en la región metropolitana de tal manera que se esclarezca la totalidad de las fuentes o ductos y reducir la incertidumbre de cada sector, especialmente en el metalmecánico y papelerero. También es necesario anotar que no fue posible identificar los sectores terciario, asfaltos y otros dentro del código CIU.

### **9.2.2. INCERTIDUMBRES DE CALCULO DE EMISIONES FACTOR DE EMISIÓN**

Tal como se comentó antes, en la estimación de las emisiones se usan los factores de emisión del USEPA AP-42 que tiene consignado en sus documentos los valores para cada equipo y cada proceso, y adicionalmente la información sobre la calidad de los datos mediante la codificación "RATING", o clasificación desde un nivel A (Excelente) hasta E (Pobre). El rating denota el grado de confiabilidad de los resultados, basado en el número de pruebas llevadas a cabo y las características representativas de los datos para determinar el factor asociado. A continuación, se describen las diferentes categorías.

A – Excelente. Para esta calificación se tomaron un gran número de industrias al azar del mismo tipo de proceso, lo que minimiza la variabilidad dentro de este tipo de fuentes.

B – Sobre el promedio. Desarrollado a partir de los datos de un número razonable de instalaciones recolectados del rating A, por lo que no se especifica si los datos seleccionados representan una muestra aleatoria de las industrias, sin embargo, los datos son suficientes para reducir la variabilidad de las fuentes asignadas a esta categoría.

C – Promedio. Se obtiene a partir de los datos recolectados del rating A y B, de igual manera no se especifica si los datos seleccionados representan una muestra aleatoria de las industrias, sin embargo, son suficientes para reducir la variabilidad de las fuentes asignadas a esta categoría.

D – Bajo el promedio. Desarrollado a partir de los datos recolectados de un número pequeño de industrias del rating A y B, por lo que posiblemente no representa una muestra aleatoria del tipo de proceso seleccionado, lo que evidencia una pequeña variabilidad de las fuentes de esta categoría.

E – Pobre. Para esta clasificación se parte de los datos del rating C y D, donde se sospecha que las industrias no representan una muestra aleatoria del proceso industrial específico y evidencia variabilidad dentro de las fuentes de dicha categoría.

De los factores de emisión usados para la estimación de contaminantes atmosféricos, basados en el material particulado total (MP), se seleccionaron los procesos asociados a la combustión en calderas discriminado por subsectores industriales, debido a que este proceso de forma individual es el responsable del 67% de las emisiones de material particulado.

Tabla 39 Evaluación rating en calderas sector industrial

Sector	Rating (%)					Incertidumbre (%)
	A	B	C	D	E	
BAT	0.8	4.1	9.8	0	0.8	7.0
TXT	4.1	1.6	22.0	1.6	8.1	21.1
CVL	0.8	0	0.8	0	0.8	1.3
PAP	0	1.6	2.4	0	0.8	2.5
QMC	0	3.3	8.1	0	0	5.0
PCE	0	0.8	4.1	0	0	2.3
MMC	0	0	2.4	0	3.3	4.5
CUR	0	0	0.8	0.8	0	1.0
ASF	0	1.6	2.4	0	0	1.7
TER	0	1.6	0	0	0	0.5
MAD	0	0	8.9	0	0	4.5
OTR	0	0	1.6	0	0	0.8
Total	5.7%	14.6%	63.4%	2.4%	13.8%	

Fuente: elaboración propia.

De la Tabla 39, se observa que el 84% de las calderas, principal proceso con emisiones de material particulado, poseen una clasificación de rating A, B o C, por lo que las emisiones estimadas poseen una variabilidad mínima y confiabilidad alta de este tipo de procesos.

Para el análisis de incertidumbre asociado al factor de emisión, se asignó un valor de incertidumbre o error a los diferentes niveles A, B, C, D y E, de 10%, 30%, 50%, 70% y 100% respectivamente. Del factor de peso asignado, se obtiene que para el sector TXT se obtiene una incertidumbre del 21%, lo anterior asociado a la cantidad de equipos con rating D y E, equivalen a un 9.7%, mientras que para los demás sectores se tiene en promedio una incertidumbre del 3%, mostrando un desempeño o calidad adecuada de los factores de emisión seleccionados.

### 9.3. VALIDACIÓN CON EL SISTEMA DE MODELIZACIÓN ATMOSFÉRICA

El Sistema de Modelización atmosférica (SMA) constituido por los modelos de emisiones, modelo meteorológico, modelo de calidad del aire y las herramientas de apoyo han sido parte de las herramientas con que cuenta la entidad para soportar las decisiones e implementar de acciones para gestionar la calidad del aire de la región y proteger la salud de la población.

Una manera de validar los resultados de los inventarios de emisiones son los modelos de calidad del aire, donde uno de los insumos principales son las emisiones, que, junto con los parámetros meteorológicos, la topografía y los procesos atmosféricos simulan la dispersión de los compuestos y su transformación química, es decir, estiman las concentraciones de los principales contaminantes atmosféricos.

En nuestro caso, utilizamos el modelo de dispersión fotoquímico euleriano CAMx configurado para el Valle de Aburrá en una malla de 60 km X 60 km con una resolución de 1 km. Los resultados para las

concentraciones de  $PM_{2.5}$  de las simulaciones muestran que en las zonas donde se tiene una adecuada distribución del flujo vehicular, el modelo es capaz de estimar las concentraciones con una certeza del 60% o mayor dependiendo del día de ejecución del modelo que podría llegar a un desempeño superior al 80%. Esto sugiere que los datos de entrada del modelo están ajustados, aunque es posible que exista una subestimación de las emisiones, es algo que por lo general ocurre en todos los inventarios de emisiones.

Otra forma de validación del inventario a través del modelo de calidad del aire fue la comparación de los resultados con las campañas de caracterización realizadas por el Politécnico Jaime Isaza Cadavid, donde para dos puntos de la ciudad se midió material particulado  $PM_{2.5}$  en sus fracciones: carbono elemental (EC) y carbono orgánico (OC). Los resultados se analizaron como la relación OC/EC y presentaron una aproximación superior al 88%, esto nuevamente sugiere un buen ajuste de las emisiones y desempeño del modelo en las zonas estudiadas y además, las relaciones OC/EC indican que el carbono elemental es mayor que el orgánico y reafirma la influencia de las emisiones del transporte en dichas zonas.

La evaluación del modelo CAMx se realizó de forma cualitativa y cuantitativa comparando los resultados de las concentraciones promedio diarias pronosticadas para  $PM_{2.5}$  con las reportadas por la red de monitoreo del valle de Aburrá para el periodo entre el 1 de enero de 2019 y el 31 de marzo de 2020.

A continuación, se presenta los resultados de la evaluación para 2 estaciones de representatividad poblacional, la estación

Casa de Justicia de Itagüí y la estación ubicada en el corregimiento de Altavista en la I.E. Pedro Octavio Amado.

La primera, es la estación de referencia para realizar el seguimiento del PIGECA puesto que es la que reporta la concentración más alta de acuerdo al informe de calidad del aire de 2018, año base para la evaluación de las proyecciones de crecimiento de emisiones y evaluación de medidas de reducción.

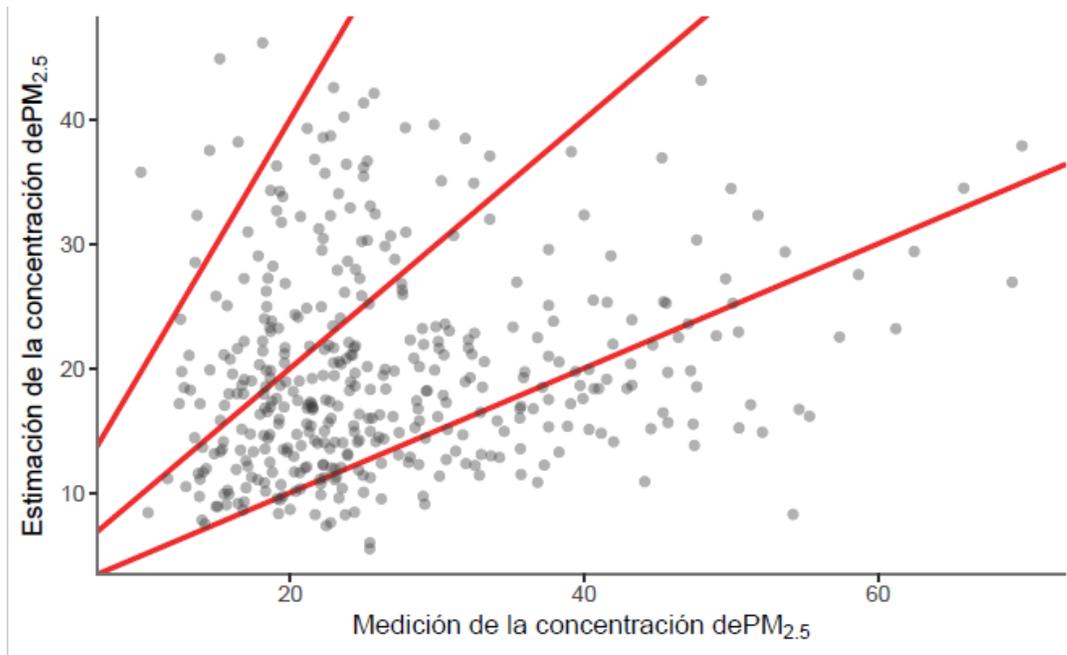
La estación localizada en Altavista, se seleccionó para esta evaluación, ya que al estar ubicada en los límites entre lo rural y urbano presenta una subestimación en las concentraciones que se observará en el análisis posterior y que puede estar asociada a las emisiones de las fuentes fijas que no hacen parte de la jurisdicción del Área Metropolitana, pero que afectan directamente la zona.

- Análisis cualitativo

Este tipo de análisis permite observar la precisión de un modelo de acuerdo a la agrupación de los datos en una gráfica, de forma que si éstos se encuentran cercanos a la línea central con pendiente 1, los valores simulados y reales tienen una relación de 1:1, es decir son iguales o muy similares entre sí; si los puntos están por debajo de la línea inferior correspondiente a la relación 1:2 quiere decir que los valores simulados están subestimados y si están por encima de la banda con relación 2:1, se considera que los valores simulados están sobreestimados.

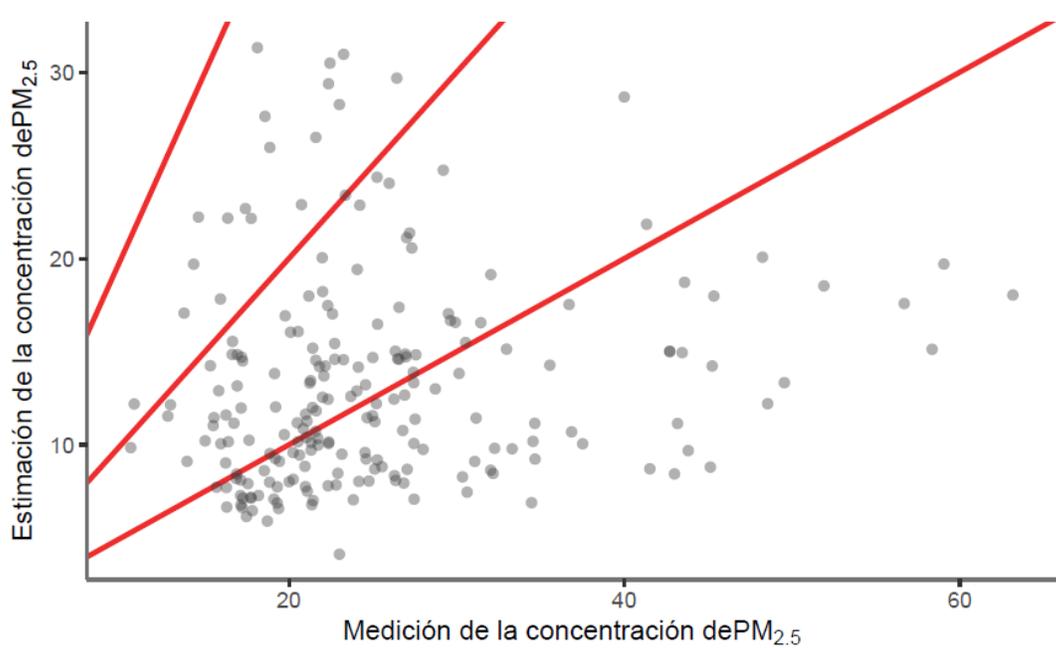
Las siguientes figuras (Figura 41 y Figura 42) muestran la comparación entre las concentraciones simuladas y las medidas para las dos estaciones mencionadas anteriormente.

Figura 41 Comparación de la concentración simulada vs medida de  $PM_{2.5}$  en la estación Itagüí - Casa de Justicia



Fuente: elaboración propia.

Figura 42 Comparación de la concentración simulada vs real de  $PM_{2.5}$  en la estación Medellín-Altavista – I.E. Pedro Octavio Amado



Fuente: elaboración propia.

De la Figura 41 se observa que el desempeño del modelo es muy bueno en esa

estación puesto que la mayoría de los puntos se encuentran ubicados alrededor de la línea

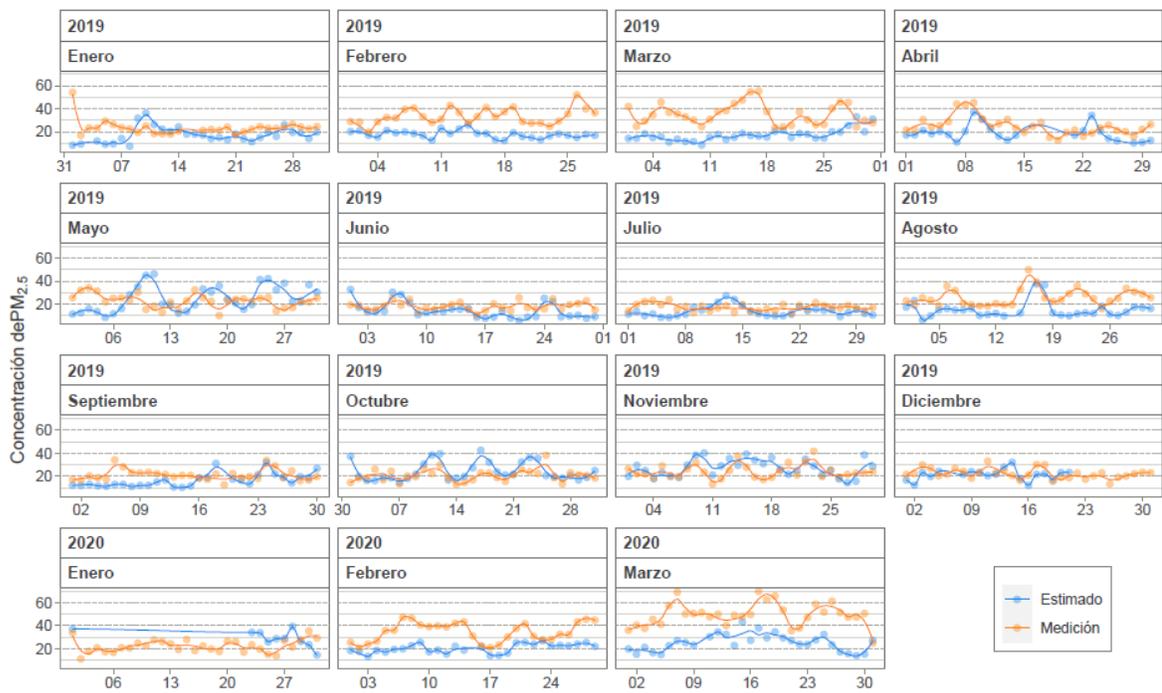
central con relación 1:1 y entre las bandas 2:1 y 1:2. Predomina la agrupación hacia la línea de abajo indicando que los valores simulados son menores a los medidos, en una relación menor de 2.

La Figura 42 muestra una mayor dispersión de los puntos y una notable subestimación de las concentraciones en la estación de Altavista. Como la mayoría de los

puntos están alrededor de la línea con relación 1:2, las concentraciones pronosticadas respecto a las medidas son la mitad o menos.

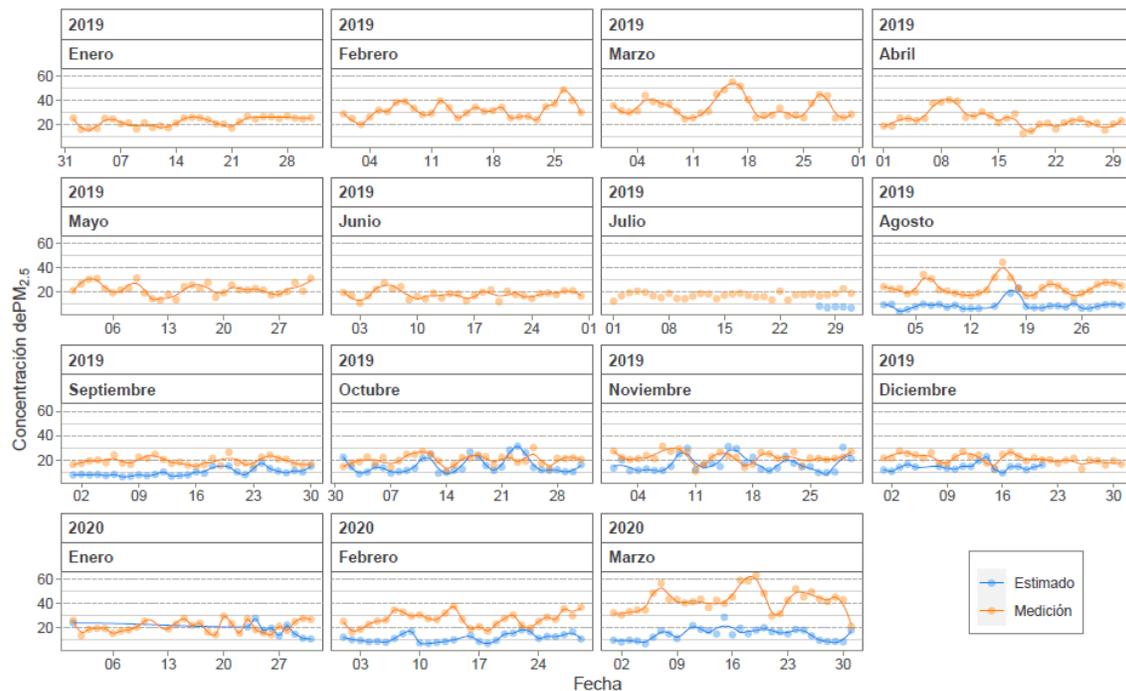
Las siguientes dos figuras ( Figura 43 y Figura 45) muestran los perfiles temporales de la concentración por mes.

**Figura 43 Comparación de los perfiles de concentración de PM<sub>2.5</sub> (estimado vs medido) en la estación Itagüí - Casa de Justicia**



Fuente: elaboración propia.

**Figura 44 Comparación de los perfiles de concentración de PM<sub>2.5</sub> (estimado vs medido) en la estación Medellín-Altavista – I.E. Pedro Octavio Amado**



Fuente: elaboración propia. El modelo no generó datos para los meses de enero a junio de 2019.

En ambos casos se encontró una coincidencia entre el comportamiento temporal de las concentraciones estimadas y las reales, es decir, el modelo fue capaz de seguir la tendencia de las concentraciones. Esto es importante ya que valida los perfiles horarios de emisiones de los inventarios.

Como se ha venido señalando, en la estación Casa de Justicia se obtuvieron resultados satisfactorios, sin embargo, durante el mes de marzo de 2020 a pesar de coincidir en el perfil horario de las concentraciones, las magnitudes estimadas estuvieron por debajo de las medidas. Esta situación puede deberse a la influencia de los incendios forestales que se presentaron en dicha época y que ocasionaron un incremento en la concentración de material particulado medido en la región. El modelo

no tuvo en cuenta estos eventos y por tanto durante ese período hay mayor diferencia con las predicciones.

La estación de Altavista también muestra una buena tendencia de las concentraciones, aunque como se había anotado anteriormente existe una subestimación. A pesar de esto, los meses de octubre y noviembre tienden a mostrar un buen comportamiento.

- Análisis cuantitativo

El desempeño del modelo se evaluó con el método de interferencia difusa usado para obtener un único indicador de confiabilidad o correlación para los datos, basándose en múltiples mediciones estadísticas indicadoras de confiabilidad/correlación. La inferencia difusa consiste en el proceso de formular la

correlación de una entrada dada (que puede ser multivariable) a una salida única, usando lógica difusa (Fuzzy Logic).

Este método consta de las siguientes etapas: i. cálculo de las variables estadísticas, ii. Definición de las funciones de afiliación, iii. Evaluación de las reglas de confiabilidad (operador difuso), iv. Operación de implicación, v. método de agregación y vi. defuzzyficación.

Una explicación más detallada del modelo de interferencia difusa se puede consultar en el capítulo “Pronóstico diario de calidad del aire - Evaluación del modelo CAMx”

La aplicación de este modelo da como resultado un porcentaje de desempeño por estación. Los resultados para las dos estaciones se presentan en la siguiente tabla (Tabla 40).

**Tabla 40 Desempeño del modelo con la metodología de interferencia difusa**

Estación	Porcentaje de desempeño (%)
Casa de Justicia – Itagüí	81.9
I.E. Pedro Octavio Amado - Medellín, Altavista	52.1

Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de desempeño para la estación Casa de Justicia es alto, de 81.9%; los pronósticos para esta estación son satisfactorios e indican que los datos de entrada del modelo, inventario de emisiones principalmente, reflejan la realidad. En cuanto a la estación de Altavista, se estimó un desempeño aceptable de 52.1%.

El desempeño del modelo varía de acuerdo a la localización de los receptores; las zonas donde hay una buena identificación de fuentes tanto fijas como móviles tendrán mejores resultados que aquellas donde no se han detallado totalmente. Con cada actualización del inventario se disminuyen los errores a través de la mejora la desagregación espaciotemporal de las emisiones de fuentes móviles o la inclusión de nuevas fuentes industriales.

#### **9.4. INCERTIDUMBRE TOTAL DEL INVENTARIO**

En términos generales, el inventario de emisiones atmosféricas preparado para el Valle de Aburrá contó con cuidadosos

sistemas de recolección de la información, revisiones minuciosas con el fin de detectar cualquier error, y comparación (siempre que fuera posible) entre diversas fuentes de información para cotejar que los datos reportados fueran similares. Sin embargo, la metodología utilizada para el cálculo de todas las categorías de fuentes se basó en factores de emisión internacionales que pudieron no reflejar de la mejor manera las situaciones locales.

Como metodología general se consideran inicialmente los aspectos definidos en el Manual de Control y Aseguramiento de la Calidad, del Programa de Mejoramiento de los Inventarios de Emisiones de la United States Environmental

Protection Agency (US EPA), así como en las Directrices y Orientación del Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC) (US-EPA, 2016; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2001; Watson, Cooper, & Huntzicker, 1984; Herrera, Rojas, Rodríguez, Rojas & Rodríguez, 2011; Instituto

Nacional de Ecología y Cambio Climático, 2013).

Para la evaluación de incertidumbres acumuladas se consideró la regla de los cuadrados, o regla B, donde la incertidumbre total es la raíz de la suma de los cuadrados de las incertidumbres de cada fuente, según:

$$U_T = \pm \sqrt{(U_E^2 + U_A^2)}$$

Dónde:

UT = incertidumbre porcentual en la suma de las cantidades (la mitad del intervalo de confianza del 95 % dividido por el total – o sea, la media– y expresada como porcentaje)

Ui2= Incertidumbres porcentuales asociadas a cada categoría o fuente

La elección de las categorías principales de fuentes se basa en una evaluación del inventario elaborado y tiene el objeto de establecer un nivel general en que el 90 % de contribución esté cubierto por categorías principales de fuentes.

En la Tabla 41 se presenta el aporte porcentual a la incertidumbre total del inventario año base 2018, discriminado por fuentes de emisión para el contaminante de interés PM<sub>2.5</sub>, en donde se puede observar una incertidumbre total del 7.4%. La incertidumbre acumulada muestra que el 90 por ciento de las incertidumbres están asociadas a las emisiones de PM<sub>2.5</sub>, por lo tanto, esta es la fuente con mayor importancia en el inventario; sin embargo, no hay que descuidar a las fuentes industriales que, si bien su aporte a la incertidumbre total no es muy alto, si es representativa dentro de su aporte individual. Si evaluamos la totalidad de las emisiones con la incertidumbre de las fuentes industriales

diríamos que las emisiones serían 248 ± 98 toneladas. En el caso de las fuentes móviles sería 2618 ± 75 toneladas. Para la globalidad del inventario se tendría entonces, de acuerdo a la aplicación de la metodología IPCC una incertidumbre total del 2866 ± 210 toneladas. (ver anexo 9.4)

Tabla 41 Aporte total de incertidumbre inventario año base 2018 para material particulado fino PM2.5

Fuente Global	Fuente específica	Emisión 2018	Emisión	Emisión	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre	Aporte de la Fuente
		(t)	(%)	Acumulada (%)	de actividad (Km)	de Cantidad (%)	combinada (%)	a la incertidumbre total (%)
Fuentes Móviles	Buses servicio especial	633	22%	22%	8%	5%	0.10	2.16%
	Camiones	978	34%	56%	3%	1%	0.03	1.01%
	Volquetas	780	27%	83%	3%	2%	0.03	0.88%
	Motos 4T	118	4%	88%	6%	7%	0.09	0.37%
	Buses	33	1%	89%	8%	5%	0.10	0.11%
	Autos	31	1%	90%	14%	2%	0.14	0.16%
	Tractocamiones	23	1%	91%	3%	2%	0.03	0.03%
	Autos servicio especial	15	1%	91%	14%	2%	0.14	0.08%
	Taxis	7	0.24%	91%	14%	2%	0.14	0.04%
	SUBTOTAL FUENTES MÓVILES							
Fuente Global	Fuente específica	Emisión 2018	Emisión	Emisión	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre	Incertidumbre
		(t)	(%)	Acumulada (%)	de FE (RATING) (%)	de Cantidad (%)	combinada (%)	Global (%)
Fuentes industriales	TXT	91.5	3%	94.53%	21%	12%	24%	0.77%
	CVL	51.3	2%	96.32%	1%	29%	29%	0.53%
	QMC	37.7	1%	97.63%	5%	30%	30%	0.40%
	PAP	13.8	0%	98.12%	3%	75%	75%	0.36%
	MMC	4.9	0.17%	98.29%	4%	93%	93%	0.16%
	BAT	34.7	1%	99.50%	7%	10%	12%	0.15%
	MAD	9.7	0.34%	99.84%	4%	39%	40%	0.13%
	CUR	1.2	0.04%	99.88%	1%	43%	43%	0.02%
	PCE	2	0.07%	99.95%	2%	21%	21%	0.01%
	ASF	0.4	0.01%	99.96%	2%		2%	0.00%
	TER	1.1	0.04%	100.00%	0%		0%	0.00%
SUBTOTAL FUENTES INDUSTRIALES								2.5
TOTAL		2866.3	100	96.32%		INCERTIDUMBRE		<b>7.4%</b>

Fuente: elaboración propia

## 10. CONCLUSIONES

### FUENTES MÓVILES

De acuerdo con los datos proporcionados por las Secretarías de Tránsito y Transporte del Valle de Aburrá, en el año 2018 el parque automotor estaba conformado por 1,550,973 vehículos, de los cuales el 54.58% son motocicletas y el 38.26% automóviles. El 7.16% restante está dividido en las demás categorías.

La demanda energética y las emisiones de contaminantes criterio, así como de gases de efecto invernadero generadas por el parque automotor del Valle de Aburrá año base 2018, se realizó mediante el empleo del modelo LEAP. A éste se ingresó la información detallada de la composición del parque automotor, la cual se obtuvo de las Secretarías de Tránsito y Transporte, además se contó con bases de datos de empresas transportadoras y con información de los Centros de Diagnóstico Automotor de la región (CDAs).

Los factores de emisión utilizados en la presente actualización son tomados modelo IVE (International Vehicle Emissions), para los contaminantes VOC, CO, NO<sub>x</sub>, PM<sub>2.5</sub>, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>, ajustados con los resultados de los factores de emisión medidos en la región en el proyecto FEVA I y FEVA II y los factores de emisión para el CO<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub> se calculan por balance de masa.

La Unidad de Planeación Minero-Energética y Empresas Públicas de Medellín proporcionaron los datos relacionados con el consumo de los combustibles diésel, gasolina y gas natural vehicular en los municipios del Valle de Aburrá, a partir de los cuales se calculó la demanda energética del parque automotor de la región. Adicionalmente, el

modelo LEAP entregó los resultados de dicha demanda con una diferencia inferior al 5% respecto de la demanda calculada con los datos entregados por dichas entidades.

Los automóviles y los camiones son las categorías que lideran la demanda energética de la región, consumieron respectivamente el 33.3% y el 21% del total de energía; después de éstas categorías se ubican las motos 4T y los buses de servicio especial demandando respectivamente el 13.2% y 11.6%, y por último se ubican los taxis que consumen tan solo el 6%.

En cuanto a las emisiones de contaminantes criterio se obtuvo un total de 562,557 t/año de CO, 16,522 t/año de NO<sub>x</sub>, 144 t/año de SO<sub>x</sub>, 32,736 t/año de VOC y 2,625 t/año de PM<sub>2.5</sub>. De estos, es la categoría camiones la responsable por la mayoría de las emisiones de PM<sub>2.5</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y VOC. La categoría que más aporta a los SO<sub>x</sub> son los autos con un 48.8% seguido de las motos 4T y los camiones con un 20.9% y un 10.4% respectivamente.

Finalmente se encontró un aporte total del sector transporte de 3,110,975 t/año de CO<sub>2</sub>, 51,374 t/año de CH<sub>4</sub> y 113 t/año de N<sub>2</sub>O. La mayor parte de estos gases de efecto invernadero es producida por los camiones y los autos.

Cada actualización del inventario conlleva mejoras, por ejemplo, cada vez es más específica la desagregación del parque automotor, también las sugerencias realizadas por parte de expertos internacionales y la autoridad ambiental, así como la validación y ajuste relacionados con la cantidad de vehículos, kilómetros recorridos y factores de emisión por parte de los gremios en las distintas socializaciones que se realizan del mismo. Esto hace que el

inventario mejore con cada actualización, pues se realiza con información validada y mayor experiencia en la ejecución del modelo; que permite obtener una mayor precisión, corroborada con los modelos de calidad del aire. Por lo que no es posible hacer comparaciones entre cada una de las actualizaciones realizadas del inventario.

## FUENTES FIJAS

Mediante estimación con factores de emisión y datos obtenidos de los monitoreos isocinéticos, se cuantificaron las emisiones de contaminantes atmosféricos del sector industrial asentado en el Valle de Aburrá, que cuentan con expediente metropolitano, identificando que para la actualización del inventario de fuentes fijas para el año base 2018 se tuvo un total de 2138 fuentes asociadas a 698 empresas.

Entre los municipios de Medellín e Itagüí se encuentran asentadas el 73% de las empresas correspondientes al 65% de las fuentes totales de todo el Valle de Aburrá. Adicionalmente, el subsector textil (TXT), el de bebidas, alimentos y tabaco (BAT) y el metalmecánico (MMC) poseen el 55% y 54% de las empresas y fuentes totales asentadas.

En comparación con el inventario año base 2016, en la presente actualización se obtuvo un aumento tanto de las empresas como de sus fuentes del 62% y 48% respectivamente, donde los sectores con mayor crecimiento fueron los de bebidas, alimentos y tabaco (BAT), terciario (TER) y otros (OTR).

Para el inventario año base 2018, la emisión de contaminantes criterio por parte de las empresas del Valle de Aburrá fueron de 3,228 t de CO, 2,346 t de NO<sub>x</sub>, 3,376 t de SO<sub>x</sub>, 7,109 t de VOC, 1,243 t de PM, 385 t de

PM10, 248 t de PM<sub>2.5</sub>, 69 t de PM1, 5,573 t de NMVOC. En materia de gases de efecto invernadero, se emitieron 1,653,225 t de CO<sub>2</sub>, 60 t de CH<sub>4</sub> y 27 t de N<sub>2</sub>O.

El subsector Textil aparece como el subsector productivo responsable de la emisión de la mayoría de los contaminantes criterio evaluados, siendo el responsable de aproximadamente el 40% de las emisiones totales, donde su mayor incidencia es el 89.7% en las emisiones de VOC, por lo que es el sector que debe tener mayor control y vigilancia de sus procesos por parte de la autoridad ambiental, así mismo, se deberá prestar especial atención a los municipios de Medellín e Itagüí, en donde se emiten aproximadamente el 59% de las emisiones totales, tanto de contaminantes criterio como gases de efecto invernadero.

El gas natural es el combustible de mayor aporte al material particulado PM1, donde el subsector textil aporta el 39%, mientras que el sector de Bebidas, alimentos y tabaco el 27%.

El sector de plásticos, cauchos y empaques es el responsable del 82.5% de las emisiones de NMVOC.

En función de la emisión de material particulado (PM, PM10, PM<sub>2.5</sub> y PM1), los subsectores con mayor representatividad son el textil, (TXT), el de bebidas, alimentos y tabaco (BAT) y el cerámico y vítreos (CVL) con el 73% de contribución.

Se presentó una disminución relativa (en función del número de fuentes) en la emisión de los contaminantes criterio, con respecto al inventario año base 2016, con excepción de los VOC y NMVOC, que presentaron un aumento del 173% y 5050% respectivamente.

## **FUENTES DE ÁREA**

En el Valle de Aburra las emisiones de VOC provienen en un 49.4% de los procesos industriales, las estaciones de servicio por su parte, son responsables del 48.9% mientras que los tanques de almacenamiento de combustible contribuyen solo con el 1.7% restante.

Las emisiones de VOC totales para el año 2018 fueron de 4,612 t/año, asociado a un aumento del 4.72% en comparación con el año 2016

## **INCERTIDUMBRES TOTALES**

La incertidumbre global para PM<sub>2.5</sub> del inventario aplicando la metodología IPCC reporta un total de 2866 ± 211 toneladas.

Las mayores incertidumbres se encuentran en la cantidad de empresas que si bien están la mayoría identificadas dentro de la base de datos del AMVA, se puede presentar el caso de aquellas que no se han registrado sus emisiones.

En cuanto a los factores de emisión es necesario levantar datos locales para algunos procesos que no se tienen datos.

En el caso de las fuentes móviles, si bien se tienen datos locales para los valores de las emisiones, es necesario conocer más a fondo y en campo cual es la realidad de la tecnología en especial de los vehículos de carga "camioncitos" que son a gasolina.

## **ANEXOS**

Anexo 2.1 Perfil de antigüedad por categoría vehicular STT2018

Anexo 2.2 Emisiones por categoría vehicular

Anexo 4.1 IEFI 2018

Anexo 6.1 Emisiones fuentes de área año base 2018

Anexo 8.1 Emisiones totales

Anexo 9.1 Correo RUNT

Anexo 9.4 Incertidumbres Totales

## BIBLIOGRAFÍA

Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana. (2012). Inventario de Emisiones Atmosféricas del Valle de Aburrá, año base 2011. Convenio 243. Retrieved from <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/Inventario-de-emisiones/2011-Inventario-de-emisiones-atmosfericas.pdf>

Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana. (2013). Actualización del inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá. Convenio 256 de 2013. In Convenio 256. Medellín, Colombia.

Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N., & Barth, M. (2005). Development and Application of an International Vehicle Emissions Model. *Transportation Research Record*, 1939(1), 156–165. <https://doi.org/10.1177/0361198105193900118>

Heaps, C. (2016). Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system. [Software version: 2018.1.25]. Somerville, MA, USA.

United States Environmental Protection Agency. (2019). Emissions Inventory. Retrieved from <https://www.epa.gov/air-quality-management-process/managing-air-quality-emissions-inventories>