

**Estimación del inventario de emisiones atmosféricas a partir de fuentes móviles en el
municipio de Caldas, Antioquia.**

Erika Alejandra Arroyave Arredondo

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente Ingeniería Ambiental

Medellín Antioquia

2022

**Estimación del inventario de emisiones atmosféricas a partir de fuentes móviles en el
municipio de Caldas, Antioquia.**

Erika Alejandra Arroyave Arredondo

Trabajo para optar al título de Ingeniería Ambiental

Director:

Kevin Alberto Berthi Mantilla

Ing. Sanitario, Msc Ing. Ambiental

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente Ingeniería Ambiental

Medellín Antioquia

2022

Dedicatoria

Primeramente, dedico este trabajo a Dios, quien permite alcanzar este logro de superación personal y profesional para mi vida. Posteriormente agradezco a mis padres quienes me han motivado a alcanzar propósitos de superar los límites al creer en mi potencial. A Diana mi hermana por su paciencia y aporte económico quien me brindo calidad de vida durante la carrera.

Agradecimientos

Primeramente, a Dios, por su eterna compañía y bendiciones en cada día. A mis padres, los cuales han sido mi motor importante en mi formación personal y académica. A Luis, siempre con la palabra de apoyo y un respaldo infinito. Finalmente, agradezco a la universidad por el logro adquirido y al Ingeniero Sanitario Kevin Alberto Berti Mantilla por su paciencia y dedicación con los alumnos.

Resumen

Este trabajo se realizó con la finalidad de estimar un inventario de emisiones del parque automotor del municipio de Caldas - Antioquia, para así poder establecer el grado de afectación que las fuentes móviles están ejerciendo y evaluar la calidad del aire de la zona estudiada. Este municipio se encuentra ubicado al sur del Área Metropolitana del Valle de Aburra, cuenta con 66.073 habitantes, y cada vez se evidencia un crecimiento poblacional anual aproximadamente del 60%. Inicialmente se realiza una identificación del parque automotor, luego se determinan las emisiones mediante una metodología aplicada, en el cual se realiza una recolección de datos, que son necesarios para la calcular los factores de emisión por medio de modelo COPERT (Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares), donde también se tienen en cuenta otras características como la composición dinámica de la flota vehicular, distribución tecnológica, temperatura, porcentaje de humedad, entre otras; permitiendo estimar la cantidad de contaminante emitido anualmente y la tasa de emisión por distancia recorrida por cada categoría vehicular teniendo en cuenta el tipo de combustible como lo son el diésel, gasolina, entre otros.

Palabras claves: Contaminación atmosférica, Fuentes móviles, Inventario de emisiones, Modelo COPERT, Factores de emisión.

Abstract

This work was carried out with the purpose of estimating an inventory of emissions from the automotive fleet of the municipality of Caldas - Antioquia, in order to establish the degree of affectation that mobile sources are exerting and evaluate the air quality of the studied area. This municipality is located to the south of the Valle de Aburrá Metropolitan Area, it has 66,073 inhabitants, and an annual population growth of approximately 60% is increasingly evident. Initially, an identification of the vehicle fleet is carried out, then the emissions are determined through an applied methodology, in which a collection of data is carried out, which are necessary to calculate the emission factors through the COPERT model (International Vehicle Emissions Model).), where other characteristics are also taken into account, such as the dynamic composition of the vehicle fleet, technological distribution, temperature, percentage of humidity, among others; allowing estimation of the amount of pollutant emitted annually and the emission rate per distance traveled by each vehicle category, taking into account the type of fuel such as diesel, gasoline, among others.

Keywords: Atmospheric pollution, Mobile sources, Emissions inventory, COPERT Model, Emission factors..

Tabla de contenido

Lista de tablas.....	9
Lista de figuras.....	10
Lista de anexos.....	11
Introducción.....	12
Problema.....	14
Justificación.....	17
Objetivos.....	19
Marco teórico.....	20
Contaminación atmosférica.....	20
Gestión de la calidad del aire.....	21
Inventario de emisiones.....	22
Modelo de Emisiones Europeo (COPERT).....	24
Modelo Mobile.....	24
Modelo Moves.....	25
Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE).....	25
Normatividad asociada a la calidad del aire.....	25
Metodología.....	28
Zona de estudio parque automotor.....	28
Identificación de los tipos de fuentes móviles y de emisión.....	29
Emisiones totales de contaminantes modelo Internacional Europeo de Emisiones Vehiculares COPERT.....	34
Estimación de factor de emisión totales por contaminante y categoría vehicular.....	37
Resultados.....	38

Identificación de los tipos de fuentes móviles y de emisión	38
Emisiones totales de contaminantes modelo Internacional Europeo de Emisiones	
Vehiculares COPERT	43
Contaminante CO (Monóxido de Carbono).....	43
Contaminante Dióxido de nitrógeno <i>NO2</i>	47
Material participado <i>PM2.5</i>	52
Identificación factor de emisión totales	57
Contaminante CO (Monóxido de Carbono).....	57
Contaminante Dióxido de nitrógeno <i>NO2</i>	59
Material participado <i>PM2.5</i>	61
Conclusiones	64
Recomendaciones.....	65
Referencias bibliográficas	66
Anexos.....	72

Lista de tablas

Tabla 1.....	26
Tabla 2.....	30
Tabla 3.....	30
Tabla 4.....	31
Tabla 5.....	32
Tabla 6.....	32
Tabla 7.....	33

Lista de ilustraciones

Ilustración 1.....	29
Ilustración 2.....	36
Ilustración 3.....	43
Ilustración 4.....	44
Ilustración 5.....	45
Ilustración 6.....	46
Ilustración 7.....	47
Ilustración 8.....	48
Ilustración 9.....	49
Ilustración 10.....	50
Ilustración 11.....	51
Ilustración 12.....	52
Ilustración 13.....	53
Ilustración 14.....	54
Ilustración 15.....	55
Ilustración 16.....	56
Ilustración 17.....	57
Ilustración 18.....	59
Ilustración 19.....	61
Ilustración 20.....	63

Lista de anexos

Anexo A. Contaminante CO (Monóxido de Carbono).	72
Anexo B. Contaminante NO ₂ (Dióxido de nitrógeno).....	76
Anexo C. Contaminante <i>PM</i> _{2.5} (Partículas menores 2.5).....	82

Introducción

La calidad del aire se ha convertido en un tema fundamental para la población en general, debido a la incidencia que tiene en la salud humana, ya que la contaminación atmosférica causa aproximadamente el 5% de los cánceres de tráquea, bronquios y pulmones, el 2% de la mortalidad cardiorrespiratoria y aproximadamente el 1% de la mortalidad por infecciones respiratorias en todo el mundo, lo que equivale a 0.8 millones de muertes (1.4%) a nivel global (OMS, 2002).

En Colombia específicamente en Bogotá la calidad del aire es una tarea de alta relevancia para las autoridades ambientales, debido a los efectos negativos de la contaminación atmosférica en la calidad de vida de las personas, teniendo en cuenta la necesidad de avanzar en el desarrollo de herramientas alternativas para el adecuado manejo del recurso atmosférico (Tique & Pinzón, 2019). En el departamento de Antioquia, en el municipio de Medellín junto con otros nueve municipios aledaños conforman un área o zona altamente poblada llamada “Área Metropolitana del Valle de Aburra”, la cual cuenta con características especiales como lo es ser un hábitat geográficamente angosto y poco ventilado, donde las actividades de transporte terrestre que se realizan en la ciudad arrojan a la atmósfera cantidades de contaminantes que podrían estar afectando desfavorablemente la calidad del aire que respiran sus habitantes. Los límites de exposición preocupan a la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la tendencia es al empeoramiento a medida que crece la densidad vehicular (Bedoya, 2008).

El municipio de Caldas es uno de los municipios que conforman el área metropolitana y se identifica debido a que se presenta una temporada larga y cómoda de invierno de marzo a diciembre y la temporada de verano es corta y cómoda de enero a febrero, con años nublados (Weatherspark, 2021). La meteorología por nubes de baja temperatura provoca la retención de los contaminantes emitidos por fuentes móviles (Futuro, 2019).

Caldas, cuenta con un alto nivel comercial aumentando así el tránsito continuo de los vehículos terrestres, adicional su ubicación es encañonada y rodeada de montañas provocando la retención de contaminantes al no permitir una mejor circulación de aire y su nivel meteorológico por altas lluvias (Aburrá, 2017).

Este trabajo presenta la estimación de fuentes móviles del municipio de Caldas Antioquia, bajo el modelo europeo COPERT 2.5 siendo un software para el cálculo de contaminantes atmosféricos derivados por las emisiones del transporte terrestre (Emisia, 2020). Bajo el método intermedio TIER 2, el método cuenta con datos concretos del mismo sobre las condiciones de los procesos, la calidad de los combustibles, tecnologías de control, etc (Gaitán & Cárdenas, 2017). El inventario de emisiones será la principal medida para la evaluación de los contaminantes $PM_{2.5}$, CO, y NO_2 para precisar la calidad del aire del municipio.

Problema

Descripción del Problema

Las fuentes móviles son un factor de contaminación que afecta la calidad del aire y la salud de las personas a nivel global. Análisis realizados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) en Colombia, aseguran que la contaminación atmosférica por fuentes móviles es un problema ambiental que genera impactos negativos en la salud de las personas a corto y largo plazo, además es un costo de inversión continua en la sociedad, debido a la implantación de planes de descontaminación y puestos de monitoreo (Minambiente, Contaminación Atmosférica, 2021).

Planteamiento del Problema

Se identifica relación entre la calidad del aire y su enlace con la salud pública basado en la inadecuada planeación de la estructuración de las ciudades en Colombia. Un modelo de esta preocupante posición se identifica en el Área Metropolitana del Valle de Aburra (AMVA), cuya ciudad central es Medellín, capital del departamento de Antioquia. Investigadores encontraron que el 9,2% de muertes en el Valle de Aburra son producidas por la contaminación del aire (Rojas, Salazar, Montoya, & Muñoz, 2020).

Las emisiones atmosféricas emitidas por fuentes móviles son generadas de manera antrópica, es decir, por las actividades que desarrollan los seres humanos en entornos económicos, sociales y tecnológicos al utilizar un medio de transporte que emiten contaminantes como material particulado, óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, óxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles, entre otros, provocando que la radiación infrarroja se detenga en la atmosfera, al desviar la dispersión de la energía aumentando así, el calentamiento de la tierra y la contaminación (Londoño, Correa, & Palacio, 2011). La contaminación en la atmosfera contribuye a la inestabilidad climática evidenciándose en el creciente aumento del cambio climático y comprometiendo la calidad de vida de las futuras generaciones, las cuales poseen un

reto existencial debido a las crecientes tasas de consumo de combustible siendo uno de los problemas públicos del siglo XXI (Merlinsky, 2017). Uno de los casos de interés en el tema de contaminación atmosférica, es que las fuentes móviles aportan al menos el 80% de la contaminación del aire. Si todo sigue igual, se calcula que para el año 2030 el número de estas fuentes aumentará en gran medida y serán responsables del 90% de todo el material particulado generado $PM_{2.5}$, y que es respirado por la población (Hernández & Baloco, 2019). Para el seguimiento, monitoreo y control de las emisiones atmosféricas, los inventarios de emisiones son herramientas necesarias para la preparación de programas como medida de prevención a los niveles de contaminación por gases contaminantes como: CO y NO_2 , los cuales son generados por fuentes móviles excediendo los niveles que sobrepasan los límites permitidos en la normatividad ambiental vigente (Londoño, Correa, & Palacio, 2011).

Sistematización del Problema

Tal es el caso del municipio de Caldas, el cual hace parte del Área Metropolitana del Valle de Aburra, y que es considerado como uno de los lugares con mayor presencia de flujo vehicular de todo el valle. Este ha tenido una creciente expansión urbana, lo que conlleva a que muchas personas tengan que movilizarse para salir o ingresar a este municipio aumentando las emisiones de fuentes móviles. Estudios referentes al crecimiento poblacional mencionan que el crecimiento porcentual del municipio Caldas Antioquia es de 5,6% del año 2017, respecto a la población estimada para el año 2019 los indicadores de aumento en la población seguirán creciendo (Durán, 2019).

Además, se ha incrementado el parque automotor, y a su vez, los niveles de contaminación del aire aumentando el riesgo de desarrollo de enfermedades respiratorias, cardíacas, en los niños e incluso neurológicas por exposición a los contaminantes provenientes de

fuentes móviles como $PM_{2.5}$, CO, NO_2 y SO_2 , (Maher, 2016; Daniel, y otros, 2007; Shaughnessy, venigalla, & Trump, 2015; Kim, 2016).

Cuando las personas respiran en sus pulmones obtienen sustancias inhaladas por la contaminación de fuentes móviles. Las vías respiratorias se han convertido en una fuente importante de aglomerados por hollín, desgaste de llantas, frenos y otros procesos involucrados por los transportes terrestres encontrándose que los vehículos automotores son los principales emisores de estos contaminantes (Pineda, Muñoz, & Gil, 2018). Así mismo, la contaminación atmosférica también es generada por fuentes móviles que causan efectos sobre los ecosistemas como lo es la precipitación en forma de lluvia, niebla o nieve que tiene un porcentaje de ácidos, causando la disminución de especies acuáticas en ríos y lagos, cambios de composición al suelo debido al aumento de acides y pérdida de los bosques. La contaminación del aire se convierte en un problema económico y social para el municipio de Caldas Antioquia (García, 2018).

El problema se acrecienta ya que no existe un reporte que estime cuales contaminantes y en que concentraciones se están emitiendo en términos de tránsito del parque automotor del municipio, siendo necesario el conocimiento de estos reportes para poder tener herramientas que ayuden en la generación de programas de prevención, control y monitoreo de las emisiones atmosféricas generadas en la zona.

Justificación

Tener un ambiente equilibrado, sano, y adecuada calidad del aire, beneficia la calidad de vida de una población. Esto se puede lograr si existen personas u organizaciones estatales que se comprometan a establecer, o bien sea que ya estén establecidas, las medidas necesarias para garantizar el cumplimiento de los estándares de calidad ambiental (ECA) y límites máximos permisibles (LPM) de acuerdo con la normatividad vigente (Bustamante, 2018).

El conocimiento de las concentraciones de los contaminantes es fundamental para esclarecer los niveles de consecuencia provenientes de fuentes móviles para la salud de las personas y medio ambiente, así mismo para establecer los niveles máximos permisibles a reglamentar en normas ambientales de calidad del aire con el propósito de proteger la salud y el bienestar tanto de los seres humanos como del ecosistema (Rodríguez, 2012).

Los sectores urbanos cuentan con alta presencia en exposición por contaminación atmosférica, y las estaciones de monitoreo no son suficientes para realizar una medición. La relación entre crecimiento poblacional y automóviles implica que se emitan altas dosis de ozono, dióxido de nitrógeno, material particulado, monóxido y dióxido de carbono a nivel global, evidenciándose la necesidad de conocer la calidad del aire mediante instrumentos de medición espacial y temporal como inventario de emisiones para fuentes móviles (Rojas G. J., 2017). El punto de inicio para la modelación espacial de vehículos son los inventarios de emisiones anuales permitiendo estimar emisiones de vehículos automotores según su actividad vehicular y factor de emisión durante el periodo analizado (Calla & Luján, 2017).

Los inventarios de emisiones atmosféricas son instrumentos metodológicos de datos característicos que se consolidan mediante una sumatoria. Son utilizados para adelantar procesos en la mejora de la calidad del aire, como instrumento de partida para la implementación, evaluación y ajuste en la creación de programas tendientes a mejorar la calidad del aire. Existen

tres componentes de inventario de emisiones de fuentes móviles: Actividad vehicular por los kilómetros recorridos de cada vehículo, distribución de flota vehicular y factores de emisión (Gaitán & Cárdenas, 2017). El modelo de emisiones Europeo COPERT ha sido utilizado por países desarrollados para la medición de fuentes móviles utilizando datos como combustible local, tipos de vehículos, estándares de emisión, programas de inspección y mantenimiento, y comportamiento de conducción (Mohammed, 2012). El Modelo de Emisiones Europeo (COPERT) estima emisiones de fuentes móviles en base a la velocidad media para posteriormente hallar los factores de emisión de vehículos, recolecta la información la cual ha construido una extensa base de datos que le han hecho ampliamente aceptado y usado en los países miembros de la Unión Europea (Rojas & Jaime, 2019).

Se identificaron estudios de calidad del aire en municipios del Area Metropolitana del Valle de Aburrá como Envigado, Itagüí y Sabaneta, en los cuales se realizan inventarios de emisiones como herramienta de gestión ambiental que identifica las principales fuentes de emisión y cuantificación de estas proporcionando un estudio de la calidad del aire de la zona (Orrego & Molina, 2015). Sin embargo, el municipio de Caldas no cuenta con una estimación de fuentes móviles y sus características de concentración siendo el municipio de conexión de entrada y salida para los 23 municipios del suroeste de Antioquia, el incremento constante de unidades móviles del parque automotor está degradando la calidad del aire y afectando la salud de los habitantes (Metropolitana, 2017).

Por esta razón el presente proyecto se centra en realizar un inventario de emisiones de fuentes móviles, generadas por vehículos automotores del municipio de Caldas brindando información real como instrumento de gestión ambiental aportando datos reales de la contaminación en el aire, impulsado por el aumento de la flota vehicular y por la quema de combustibles fósiles generados.

Objetivos

Objetivo general

Elaborar un inventario de emisiones generadas por fuentes móviles con el propósito de estimar los niveles de contaminación presentes en el municipio de Caldas Antioquia.

Objetivos específicos

Identificar los tipos de fuentes móviles y de emisión del municipio a través de herramientas de recolección de información primaria e informe del parque automotor.

Estimar las emisiones totales de los contaminantes generados por las fuentes móviles caracterizadas mediante la metodología del Modelo Internacional Europeo de Emisiones Vehiculares COPERT y su variabilidad resolución temporal.

Estimar los factores de emisión total de los contaminantes generados por las fuentes móviles caracterizadas mediante la metodología del Modelo Internacional

Marco teórico

Contaminación atmosférica

La contaminación ambiental es una problemática continua del mundo moderno que ha tenido aumento en las altas tasas de mortalidad y morbilidad sobre los seres humanos por la contaminación y destrucción del medio ambiente. Esta problemática ha obligado a la OMS y otros entes gubernamentales a combatir la problemática (Medina, 2019). Según la resolución 601 de 2006 establecida por el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia, establece que la contaminación atmosférica es la presencia de sustancias en la atmósfera en altas concentraciones en un tiempo determinado como resultado de actividades humanas o procesos naturales, que pueden ocasionar daños a la salud de las personas o al ambiente (Muñoz, Paz, & Quiroz, 2007). En Colombia; la calidad del aire y las emisiones, atmosféricas se gestiona en función de la calidad y protección de la salud de las personas mediante programas y políticas de reducción para la minimización de impactos de la sociedad, logrando así, un pensamiento hacia una salud ambiental (Rojas, y otros, 2016).

Actualmente la contaminación del aire es uno de los principales problemas a nivel global, se encuentra en todas las sociedades sin excluir el nivel de desarrollo socioeconómico a través de la introducción de sustancias nocivas como $PM_{2.5}$, CO y NO_2 provenientes de fuentes móviles específicamente los que utilizan combustibles fósiles que pone en riesgo la salud de las personas, ecosistemas y recursos biológicos por la acción directa e indirecta del ser humano; representando más del 80% de contaminación en la atmósfera provocando así la destrucción de la capa de ozono (Pachés, 2020). Los biocombustibles utilizados en Colombia para las actividades de movilidad terrestre cuentan con exenciones tributarias grabadas en su tiempo como un incentivo a la

producción de biocombustibles, proporcionando un amparo de ley mediante principios constitucionales ya que en la actualidad la producción del biocombustible se considera una actividad consolidada para satisfacer las necesidades industriales y desarrollo económico del país, sin embargo se evidencia destrucción de la capa de ozono por los altos niveles de contaminación en la atmosfera (Segura, 2019). Se evidencia una economía nacional dependiente del petróleo fósil generalmente biocombustibles como el biodiesel por la necesidad de abastecer y dar sustentabilidad al suministro energético, responder compromisos internacionales con el fin de disminuir el calentamiento global y crear una economía menos dependiente (García & Calderón, 2012).

Gestión de la calidad del aire

En Colombia, la calidad del aire es variable, porque depende de la ciudad de estudio, las ciudades que son capital del departamento aportan una mayor concentración de contaminantes, por factores como: la densidad población, el aumento del parque automotor, la dimensión de la zona industrial, el ordenamiento vial, entre otras. Adicionalmente, las condiciones geográficas y climatológicas de cada ciudad influyen en la dispersión de los contaminantes (Zambrano, 2019).

Existen estrategias para la gestión de la calidad del aire como el arbolado urbano y zonas verdes en la zona rural de municipios y ciudades, los cuales aportan a la disminución del material particulado y elementos contaminantes reduciendo así los niveles de concentración del contaminante (Cardona, 2019).

Otra forma de evaluar la calidad del aire es mediante la ciencia de datos, se identifica falta de mediciones sistemáticas que aporte gran cantidad de información de datos masivos para la construcción de metodologías más eficientes mediante la teledetección (Represa, 2020).

Sin embargo, se carece de estrategias para el control en la calidad del aire. Los inventarios de emisiones son herramientas de gestión que mitiga el impacto ambiental del aire; los modelos computacionales MOVES, IVE y COPERT facilitan niveles ponderados de emisión de contaminantes mediante la desagregación del año y la flota vehicular, calculando así el número de unidades y su actividad vehicular, obteniendo el valor total del inventario (Valdez, 2013).

Inventario de emisiones

Las emisiones contaminantes están reguladas por la legislación europea desde los años 70, siendo más estrictas cada vez, por lo que los fabricantes de vehículos se han visto obligados a mejorar la tecnología de los motores e introducir sistemas de control de emisiones para poder cumplir estas normas y así poder vender sus vehículos en el mercado europeo. En COPERT están integradas las correlaciones y los factores de emisión de cada contaminante en función de distintos parámetros como pueden ser el tipo de vehículo, el carburante, las pautas de conducción, el kilometraje anual promedio, la velocidad típica, el diseño del motor o factores externos como la temperatura ambiente (Trejos, 2017).

La gestión en la calidad del aire está enlazada con los inventarios de emisiones. Estos son utilizados para actividades científicas como instrumento de gestión ambiental, los cuales estiman la cantidad de contaminantes emitidos al aire en un tiempo determinado desde una o varias fuentes, determinando así, como por ejemplo la reducción de emisiones a la atmosfera. Además, es importante realizar la actualización de los inventarios de emisiones, en algunos casos, debido al aumento del tráfico vehicular (Vega, Ocaña, & Parra, 2012). Las emisiones de fuentes móviles comprenden las siguientes categorías:

- ***Emisiones del tubo escape:*** Se comprende como las emisiones en frío y caliente. Las emisiones en frío se presentan antes de que el líquido de refrigeración alcance los 70°C, y las emisiones en caliente suceden cuando el líquido refrigerante alcanza los 70°C de temperatura (Cames & Helmers, 2013).
- ***Emisiones en evaporación:*** Se emite desde dispositivos como el tanque de gasolina y el carburador, son compuestos orgánicos volátiles (Cames & Helmers, 2013).
- ***Emisiones por abrasión:*** Material articulado que se generan a causa del desgaste de neumáticos, frenos y superficie del pavimento (Cames & Helmers, 2013).

Existen diferentes metodologías para estimación de emisiones de contaminantes a la atmosfera provenientes de fuentes móviles, y se clasifican en metodología de estimación directa e indirecta, Las directas son aquellas mediciones realizadas directamente en la fuente, y las indirectas permite estimar las emisiones contaminantes proveniente de una fuente a partir de otras variables (Giraldo, 2005).

En el mundo los modelos de estimación de emisiones vehiculares más utilizados son el MOBILE, IVE y el COPERT, los cuales fueron desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA) y por la Agencia Ambiental Europea (EEA), respectivamente (Giraldo, 2005).

Modelo de Emisiones Europeo (COPERT)

La gran mayoría de modelos estima emisiones de fuentes móviles en base a la velocidad media para posteriormente hallar los factores de emisión de vehículos, dejando de lado otros datos importantes. Utilizando una metodología Bottom – Up, COPERT recolecta la información descrita en el principio con la cual ha construido una extensa base de datos que le han hecho ampliamente aceptado y usado en los países miembros de la Unión Europea (Carmona, y otros, 2016).

COPERT es un programa de software destinado al cálculo de contaminantes atmosféricos producidos por las emisiones del transporte por carretera. Las emisiones calculadas incluyen contaminantes regulares (CO, NOX, VOC, PM) e irregulares (N₂O, NH₃, SO₂) y el consumo de combustible también es calculado. El desarrollo técnico de COPERT es financiado por la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), en el marco de las actividades del Centro Temático Europeo sobre Aire y Cambio Climático. Desde el año 2007, la Comisión Europea ha estado coordinando el desarrollo científico del modelo (Copert, 2020).

Modelo Mobile

El modelo MOBILE fue desarrollado por la EPA (Agencia de protección ambiental de los Estados Unidos) para estimar la contaminación de los vehículos en carretera, este modelo permite calcular emisiones de hidrocarburos: Óxidos de nitrógeno (NO_x) y monóxido de carbono (CO) en vehículos livianos, motocicletas, camiones ligeros y pesados. Sin embargo, con el tiempo fue reemplazado por el modelo MOVES (Agencia, 2016).

Modelo Moves

Es el actual modelo de emisiones de motor utilizado en la EPA, calcula factores y/o inventario de emisiones. Este proporciona estimaciones precisas de emisiones en automóviles, camiones y motocicletas, además incluye una base datos relevantes de emisiones para los Estados Unidos. Este modelo no es de fácil acceso para los países de Latinoamérica (Agencia, 2016).

Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares (IVE)

El modelo IVE está diseñado para utilizar la información existente y datos locales fácilmente coleccionables. Una vez recogida esta información, los inventarios de fuentes móviles se pueden desarrollar fácilmente, comienza con una recolección de datos experimentales (Metodología Bottom – Up) para posteriormente hallar una tasa base de emisiones calculada con la Potencia Específica Vehicular (VSP por sus siglas en inglés) y una serie de factores de corrección que son aplicados para estimar la cantidad de contaminación de una gran variedad de tipos de vehículo (Metabiblioteca, 2013).

Normatividad asociada a la calidad del aire

La constitución política de Colombia en 1991 le otorgó relevancia constitucional a la preservación del medio ambiente. El artículo 79 nos habla de la calidad del recto colectivo, en el artículo 80 categorización de principios de desarrollo económico y en el artículo 49 consideración de los ecosistemas como soporte de la vida y de los derechos fundamentales de los nacionales colombianos. Hace varios años el Estado Colombiano ha dado control y regulación a los recursos naturales y fuentes contaminantes (Suárez, 2008). La siguiente normatividad (Tabla 4) para la calidad del aire se rige en Colombia bajo leyes y resoluciones.

Tabla 1*Normatividad para la calidad del aire en Colombia.*

Año	Tipo de resolución	Entidad	Resumen
1993	Ley 99 Sistema Nacional del Ambiente	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Se crea el MADS, el cual reordena el sector público encargado del medio ambiente y se organiza el SINA.
1995	Decreto 948	MADS	Se crea las normas y principios generales para la protección y control atmosférico. Mecanismos para la prevención en episodios en la contaminación del aire.
1995	Decreto 2107	MADS	Se modifica parcialmente el decreto 948 que contienen los principios generales para la protección del aire.
1996	Resolución 005	MADS	Por el cual se reglamenta los niveles permisibles de nivel de contaminantes producidos producidos fuentes móviles terrestres.
2003	Resolución 1208	MAVDT	Se determinan los niveles máximos permisibles para los contaminantes criterio a nivel nacional

Año	Tipo de resolución	Entidad	Resumen
2006	Resolución 601	MAVDT	Se establece la norma de calidad del aire a nivel de inmisión.
2010	Resolución 610	MAVDT	Se modifica la resolución 601 sobre los niveles máximos permisibles para contaminantes a nivel nacional.
2010	Resolución 2154	MAVDT	Ajusta el protocolo para el seguimiento y monitoreo
2010	Resolución 651	MAVDT	Se crea el subsistema de información SISAIRE.
2017	Resolución 2254	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible	Por el cual se adopta la norma de calidad del aire ambiente y se dictan otras disposiciones.

Nota. Fuente: Elaboración propia

Metodología

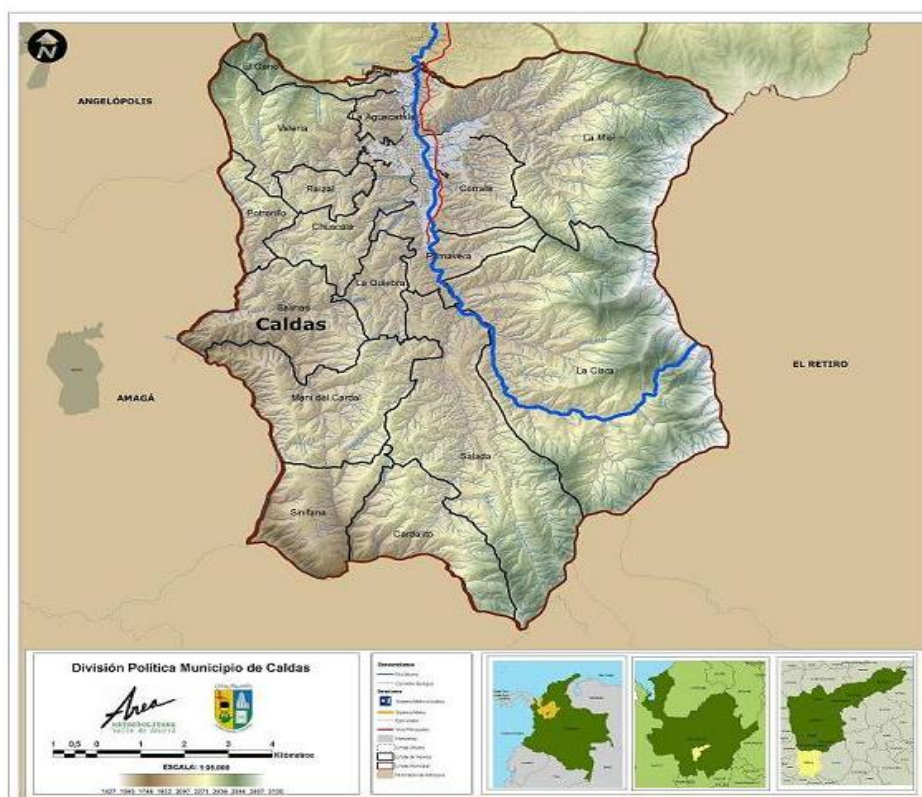
La metodología implementada en la ejecución de este proyecto, estuvo compuesta por tres fases. En la fase uno se realizó solicitudes al parque automotor del municipio, investigando el consolidado de los vehículos del parque automotor, con el fin de recolectar información necesaria para ingresar al Software. En la segunda fase se llevó acabo la estimación del inventario de emisiones utilizando el modelo COPERT como herramienta de cálculo. Finalmente, en la tercera fase, se identificaron los factores de emisión vehiculares de los contaminantes $PM_{2.5}$, CO, y NO_2 en las diferentes categorías por kilómetro recorrido.

Zona de estudio parque automotor

El municipio de Caldas se encuentra ubicado en el departamento de Antioquia, cuenta con una población densamente poblada con 82.234 habitantes, su economía es el comercio, ganadería, agricultura e industria la locería (Cuna de cerámica en Colombia), el municipio es puerta de acceso natural de Medellín hacia los municipios que conforman el suroeste antioqueño; adicional su temperatura es de 19°C con una elevación de 1.750 m y cuenta con zona montañosa que dificulta la dispersión de los contaminantes emitidos por fuentes móviles (Duque, Giraldo, & Sampedro, 2017).

Ilustración 1.

Municipio de Caldas.



Fuente: Tomado de (Caldas, 2022).

Identificación de los tipos de fuentes móviles y de emisión

Para realizar la clasificación de vehículos según la tecnología utilizada en ellos, se plantea como hipótesis que todo vehículo vendido en cada año dispone del último nivel de tecnología en materia de control de emisiones. A continuación, se muestra cómo se elaboraron las categorías de los vehículos según el modelo COPERT:

➤ ***Categoría Passenger Cars (Carros livianos)***

Los vehículos de pasajeros se dividen según el combustible que utilizan: Gasolina, Diésel, GLP e híbridos.

Tabla 2.

Categoría según cilindrada Passenger Cars

Categoría	Cilindraje
Mini	<0,81
Small	0,8-1,41
Medium	1,14-2,01
Large suv executive	>2,01

Nota. Fuente: Elaboración propia

➤ ***Categoría Light Commercial Vehicles (Vehículos livianos)***

Los vehículos comerciales ligeros se clasifican por MMA (Masa máxima autorizada) y por combustible autorizado.

Tabla 3.

Categoría Light Commercial Vehicles

Combustible Autorizado	MMA
Gasolina N1 - I	$MMA \leq 1305 \text{ kg}$
Gasolina N1 - II	$1305 \text{ kg} < MMA \leq 1760 \text{ kg}$

Combustible Autorizado	MMA
Gasolina N1 - III	$1760 \geq \text{MMA}$
Diésel N1 - I	$\text{MMA} \leq 1305 \text{ kg}$
Diésel N1 - II	$1305 \text{ kg} < \text{MMA} \leq 1760 \text{ kg}$
Diésel N1 - III	$1760 \geq \text{MMA} > 3500 \text{ kg}$

Nota. Fuente: Elaboración propia

➤ *Categoría Heavy Duty Trucks (Vehículos pesados)*

Los vehículos pesados se clasifican por MMA (Masa máxima autorizada) y por combustible autorizado teniendo en cuenta que son muy pocos los vehículos de gasolina de este tipo.

Tabla 4.

Categoría según MMA Heavy Duty

Combustible Autorizado	MMA
Gasolina	>3.5 t
Diésel	$\leq 7.5 \text{ t}$
	7.5 – 12 t
	12-14 t
	14 – 20 t
	20-28 t
	28 – 34 t
	28 – 34 t

Nota. Fuente: Elaboración propia

➤ **Categoría L-Category (Motocicletas)**

Las Motocicletas se clasifican según el tipo de motor y cilindrada.

Tabla 5.

Tipo de motor y cilindrada Motorcycles

Cilindraje
2 – Stroke > 50 cm ³
4 – Stroke < 250 cm ³
4 – Stroke 250 - 750 cm ³
4 – Stroke > 750 cm ³

Nota. Fuente: Elaboración propia

➤ **Categoría Buses**

Los autobuses se clasifican según el combustible usado

Tabla 6.

Uso de combustible diésel Buses

Categoría	Combustible
Urban buses midi <=15 t	Diésel
Urban buses standard 15-18 t	Diésel
Cohaches standard >18 t	Diésel

Nota. Fuente: Elaboración propia

Luego de haber clasificado la flota vehicular por categoría a continuación se describe la tecnología vehicular, es importante para determinar los años de antigüedad de los vehículos ya que las nuevas tecnologías son más sostenibles con el medio ambiente en relación con el consumo de combustible.

Tecnología vehicular

Para obtener la tecnología vehicular se clasificaron los vehículos según la tecnología utilizada, la premisa parte de que todos los vehículos vendidos disponen del último nivel de tecnología en materia de control de emisiones. Ver tabla 7.

Tabla 7.

Categoría de las tecnologías disponible en COPERT

Normativa de emisiones	Fecha vigor de la normativa reducción de emisiones
Convencional	Hasta 1991
Euro I	1992-1995
Euro II	1996-1999
Euro III	2000-2004
Euro IV	2005-2008
Euro V	2009-2013
Euro VI	> 2014

Nota. Fuente: Elaboración propia

Luego se integra el paso a paso anterior de la tabla 2 a la 7, a todos los vehículos del parque automotor del municipio obteniendo así, las categorías y tecnología vehicular ver resultados en la tabla 11.

Emisiones totales de contaminantes modelo Internacional Europeo de Emisiones Vehiculares COPERT.

Para la elaboración del inventario de emisiones totales se utilizó la base del parque automotor del año 2020, para los contaminantes $PM_{2,5}$, CO, y NO_2 teniendo encuesta 4 categoría vehiculares (Vehículos livianos, vehículos pesados, buses y Motocicletas) y se tomó como referencia la flota vehicular del municipio ver tabla 8.

Para llevar a cabo la estimación de emisiones en el modelo COPERT se incorporó información de entrada al software de cada mes el año 2020: Localidad, temperatura mínima y máxima, % de humedad relativa, combustible y kilometraje total.

Se realizaron visitas al Centro Diagnostico Automotor (CDA) Los Búcaros, ubicado en el municipio de caldas, para obtener información del kilometraje anual vehicular del año 2020 del parque automotor del municipio según las categorías, ver tabla 8.

Tabla 8.

Kilometraje anual 2020 por categoría

Categoría	Kilometraje
Gasolina	10000
Diésel	15000
Vehículos livianos: Automóvil, camioneta, chivas y campero	14971,8

Normativa	Año	Media años	Años antigüedad	Vehículos livianos	Vehículos pesados	Motos	Buses
Euro II	1996-	2010	22	329379,6	624478,8	6733,8	33000
	1999						0
Euro III	2000-	2012	17	254520,6	482551,8	52494,	25500
	2004						3
Euro IV	2005-	2014	13	194633,4	369010,2	40142,	19500
	2008						7
Euro V	2009-	2017	8	119774,4	227083,2	24703,	12000
	2013						2
Euro VI	> 2014	2017	7	104802,6	198697,8	21615,	10500
							3

Nota. Fuente: Elaboración Propia

Al suministrar la información requerida por el software del modelo, se obtiene un archivo con las emisiones de cada contaminante en las diferentes categorías del parque automotor. Las unidades de medida que arroja el modelo en el cálculo de las emisiones están dadas en Toneladas/año como se puede visualizar en la ilustración 2.

Ilustración 2.

Toneladas año por contaminante

The screenshot shows the COPERT software interface with the 'Emissions For All Years' window open. The window displays a table of emissions data for the year 2020. The table is organized into sections for Passenger Cars and Light Commercial Vehicles. The columns include Year, Emission, and various driving conditions (Urban Off Peak, Urban Peak, Rural, Highway, Total, Cold). The data is presented in a detailed table format.

Category	Fuel	Segment	2020						
			Urban Off Peak	Urban Peak	Rural	Highway	Total		
Passenger Cars	Petrol	Small	3.9738	4.1735	5.2405	2.7038	16.0916	1.194	0.7
		Medium	4.3305	4.1584	5.8186	2.8993	17.2068	1.2753	0.7
	Petrol Total	8.3043	8.3318	11.059	5.6032	33.2984	2.4694	1.4	
	Petrol Hybrid	0.7907	0.5041	1.2541	0.72	3.2689	0.3947	0.2	
Passenger Cars Total	Diesel	Medium	0.0582	0.0576	0.0113	0.0556	0.0227	0.0014	0.0
	Petrol Total	9.1022	8.8435	12.3244	6.3288	36.5999	2.8555	1.7	
Light Commercial Vehicles	Petrol	N1-I	0.5755	0.5902	0.7649	0.3964	2.3269	0.1792	0.1
		N1-II	1.1323	1.0396	1.2089	0.6119	4.0826	0.3415	0.2
		N1-III	1.0831	1.0285	1.2702	0.6207	3.9945	0.3554	0.2
	Petrol Total	2.8009	2.6582	3.334	1.6109	10.4041	0.8761	0.5	

Fuente: Elaboración propia.

Estimación de factor de emisión totales por contaminante y categoría vehicular.

Para la estimación de los factores de emisiones totales por contaminante y categoría vehicular, se ingresan los mismos valores de entrada al modelo COPERT que se utilizaron para la modelación de las emisiones totales, obteniendo como resultado los valores en masa (g) de contaminante emitido por distancia recorrida (km) de cada categoría vehicular, como se describe a continuación:

- Passenger Cars (Vehículos livianos): Automóvil y Motocicleta.
- Light Commercial Vehicles (Vehículos livianos): Campero y chivas.
- Heavy Duty Trucks (Vehículos pesados): Camión, tractomula, tracto-camión, maquina industrial y volqueta.
- Buses (Bus): Buseta, microbús y Buseton.

- L-Category (Motocicletas): Motocicleta, motocarro y cuatrimotor.

Luego, después de definir las categorías vehiculares se procede a identificar y clasificar los factores de emisión por contaminante y categoría vehicular. A partir de esta información se generan tablas y gráficos, luego se analizan para determinar cuál es la categoría vehicular que fue la que mayor influencia tiene sobre cada contaminante estudiado.

Resultados

Identificación de los tipos de fuentes móviles y de emisión

El parque automotor del municipio de Caldas cuenta con 6042 vehículos, de acuerdo a los resultados obtenidos por la secretaria de tránsito del municipio de los cuales el combustible más utilizado es la gasolina en la categoría vehicular L-Category (Motocicleta) superando el número de vehículos de las demás categorías ver Tabla 10.

Tabla 10.

Categoría parque automotor

Categoría	Clasificación COPERT	Número de Vehículos
Vehículos livianos: Automóvil camioneta chivas y campero.	Passenger Cars y Light Comme	1418
Vehículos pesados: Camión tractomula tracto-camión maquina industrial y volqueta.	Heavy Duty	636
Buses: Autobús, buseta, buseton, y microbús.	Urban buses standard, urban buses Medí y coaches standard	634
Motos: Motocicletas, ciclomotores, motocarro y cuatrimotor.	L-Category y Quad y ATV	3354
Total		6042

Nota. Fuente: Elaboración propia

Otro resultado que se obtuvo es el mostrado en la tabla 11, en la cual podemos observar que el parque automotor del municipio está constituido por 6042 vehículos, adicional identificamos que la categoría con mayor porcentaje de vehículos son las motocicletas con un 56%, seguido de los vehículos livianos como automóviles y camionetas con un 23%, luego los buses con 11% y finalmente los vehículos pesados como volquetas y tracto-mulas con un 10%.

Tabla 11.*Categoría parque automotor*

		Vehículos								
		Vehículos pesados			Buses			Motos	Motos	Motos
Normativa Europea	Año	Vehículos livianos (Automóvil y camioneta)	Vehículos livianos (Camper o y chivas)	Vehículo (camión, Tractomul a, tracto-camión, Maquina industrial y volqueta)	(Bus y Buseton)	Buses (Buseta)	Buses (Microbús)	Motos (Motocicleta)	Motos (Motocarro)	Motos (Cuatrimotor)
Convencion al	Hasta 1991	0	0	144	0	0	0	37	0	0
Euro I	1992-1995	168	12	44	16	16	132	234	0	0
Euro II	1996-1999	99	18	37	33	13	17	227	0	0

Normativa Europea	Año	Vehículos								
		Vehículos livianos (Automóvil y camioneta)	Vehículos livianos (Camper o y chivas)	Vehículo pesado (camión, Tractomul a, tractor-camión, Maquina industrial y volqueta)	Buses (Bus y Buseton)	Buses (Buseta)	Buses (Microbús)	Motos (Motocicleta)	Motos (Motocarro)	Motos (Cuatrimotor)
Euro III	2000-2004	236	35	25	19	20	51	482	0	26
Euro IV	2005-2008	193	75	143	67	33	123	1325	0	38
Euro V	2009-2013	248	114	151	31	4	59	852	46	13
Euro VI	> 2014	107	113	92	0	0	0	0	74	0
Total por categoría			1418	636		634			3354	

		Vehículos								
		Vehículos pesados			Vehículos livianos			Motos		
Normativa Europea	Año	Vehículo livianos (Automóvil y camioneta)	Vehículo livianos (Camper o chivas)	Vehículo pesados (camión, Tractomul a, tractor-camión, Maquina industrial y volqueta)	Buses (Bus y Buseton)	Buses (Buseta)	Buses (Microbús)	Motos (Motocicleta)	Motos (Motocarro)	Motos (Cuatrimotor)
		Total vehículos parque automotor					6042			
% por categoría		23%	11%		10%			56%		

Nota. Fuente: Elaboración propia

Emisiones totales de contaminantes modelo Internacional Europeo de Emisiones Vehiculares COPERT

Las siguientes figuras grafican los resultados de emisiones por contaminante según la categoría vehicular.

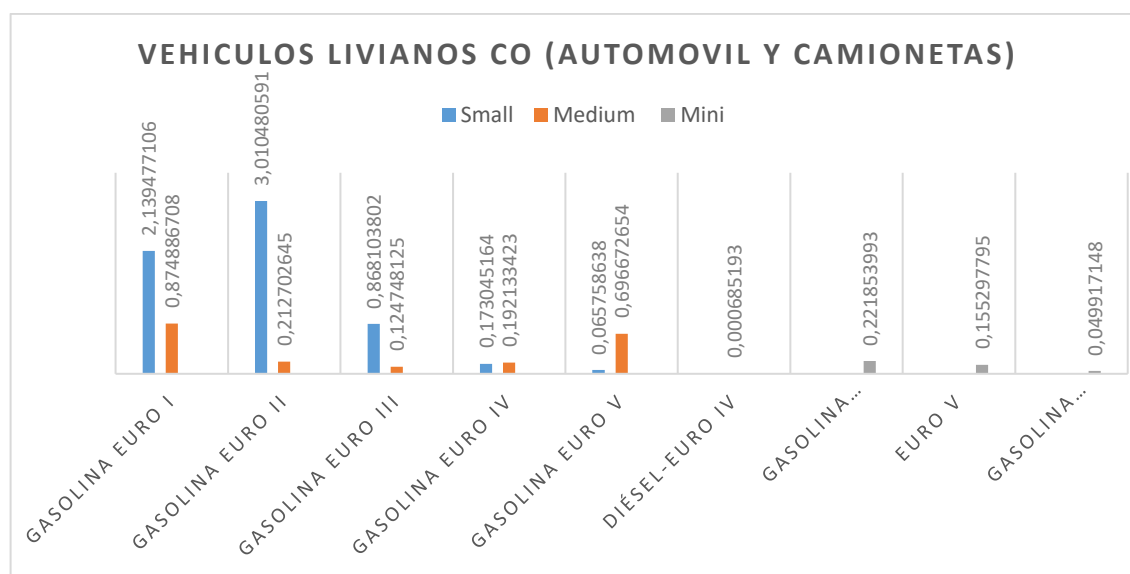
Contaminante CO (Monóxido de Carbono).

➤ Categoría Passenger Cars (Carros livianos)

En la ilustración 3, identificamos la emisión del contaminante CO en zona rural del municipio categoría vehicular categoría vehículos livianos Passenger Cars; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría Small con tecnología Euro 1 y Euro II con combustible gasolina.

Ilustración 3.

Emisión CO por normativa Euros_Passenger Cars (vehículos Livianos)



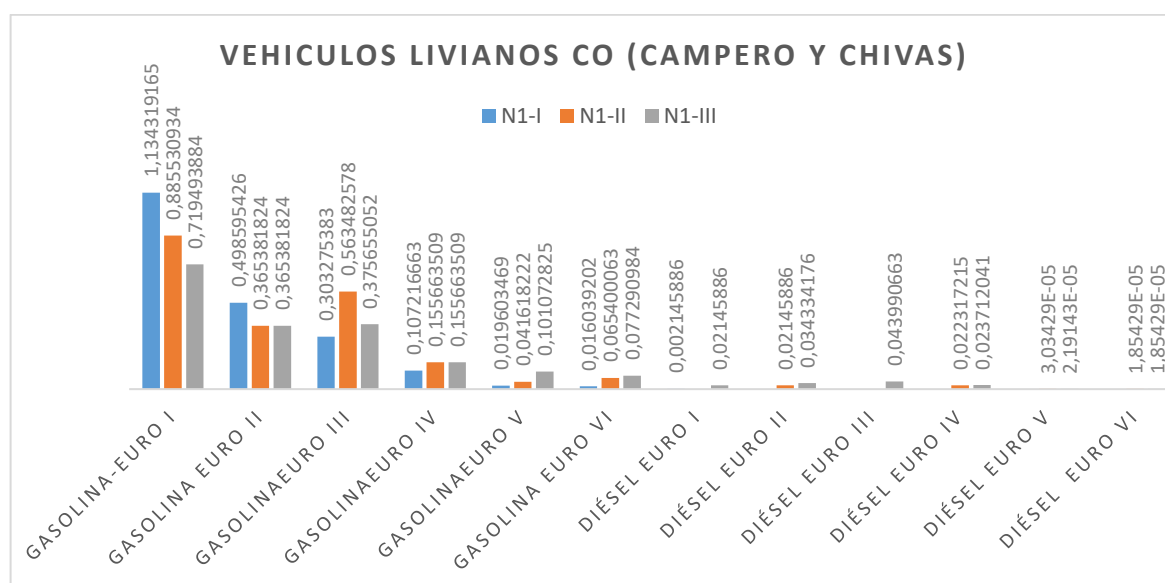
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Categoría Light Commercial Vehicles (Vehículos livianos)**

En la ilustración 4, identificamos la emisión del contaminante CO en zona rural del municipio categoría vehículos livianos Light Commercial; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría N1—II de tecnología Euro 1 y Euro III con combustible de gasolina.

Ilustración 4.

Emisión CO por normativa Euros_ Ligt Commercial (Vehículos livianos)



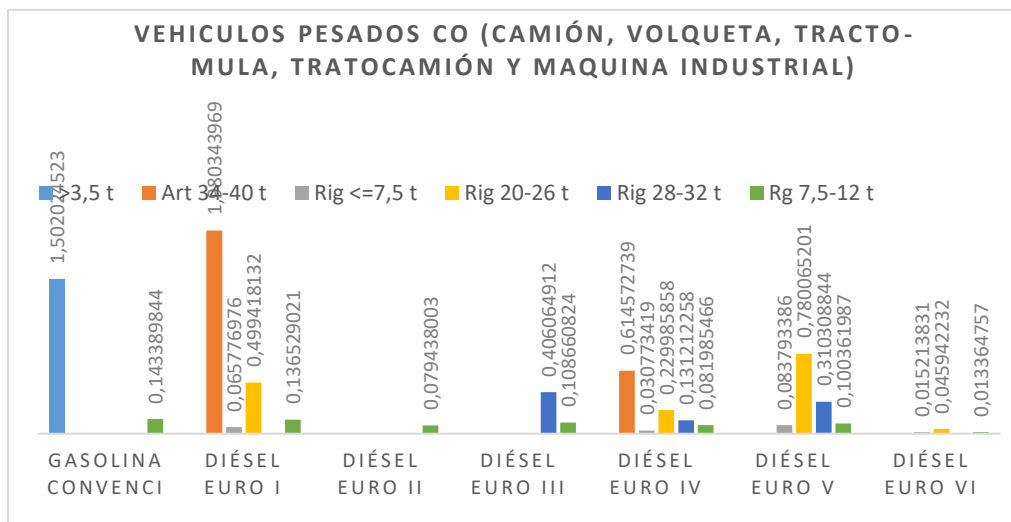
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Categoría Heavy Duty Trucks (Vehículos pesados)**

En la ilustración 5, identificamos la emisión del contaminante CO en zona rural del municipio categoría vehículos pesados Heavy Duty; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría Articulado 34-40 t de tecnología Euro 1 y Euro IV con combustible de Diésel.

Ilustración 5.

Emisión CO por normativa Euros Heavy Duty Trucks



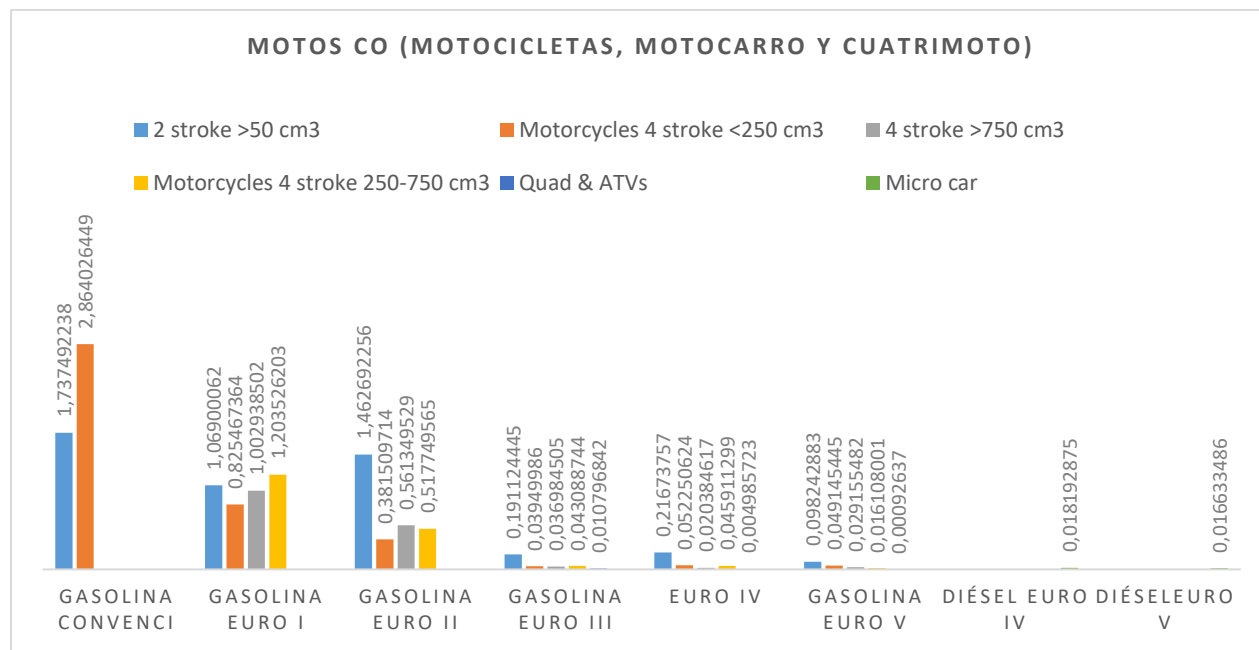
Fuente: Elaboración propia.

➤ *Categoría L-Category (Motocicletas)*

En la ilustración 6, identificamos la emisión del contaminante CO en zona rural del municipio categoría Motocicletas L-Categoría; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría 2 Stroke >50 cm³ de tecnología convencional, Euro I y Euro IV con combustible gasolina.

Ilustración 6.

Emisión CO por normativa tecnología Category (Motocicletas)



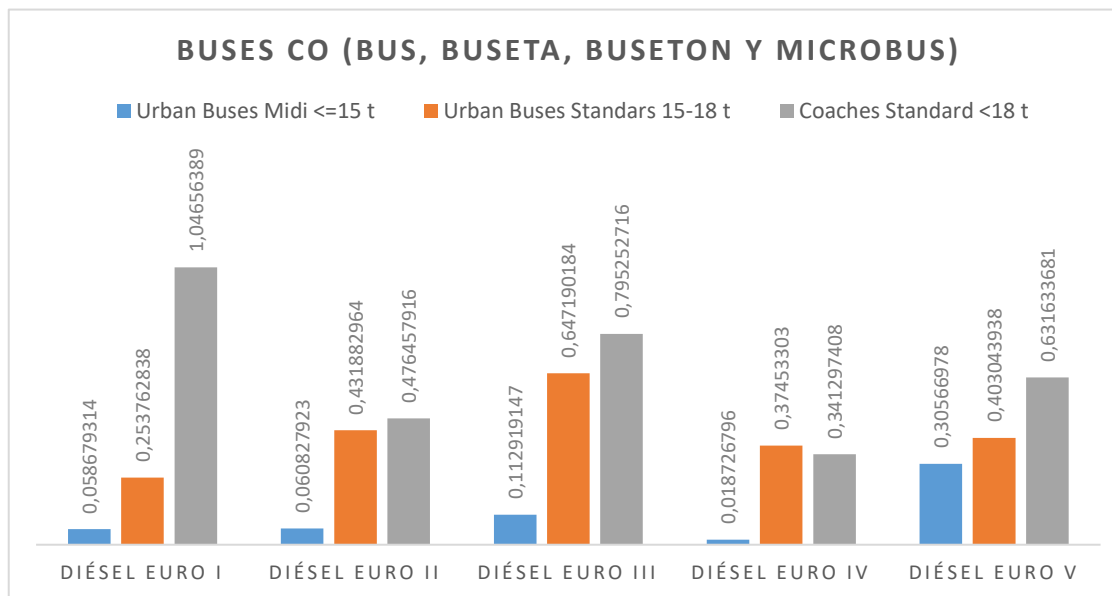
Fuente: Elaboración propia.

➤ *Categoría Buses*

En la ilustración 7, identificamos la emisión del contaminante CO en zona rural del municipio categoría Buses; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría Coaches Standard ≤ 18 t de tecnología Euro I, Euro III y Euro IV con combustible Diésel.

Ilustración 7.

Emisión CO por normativa Euros_ Buses



Fuente: Elaboración propia

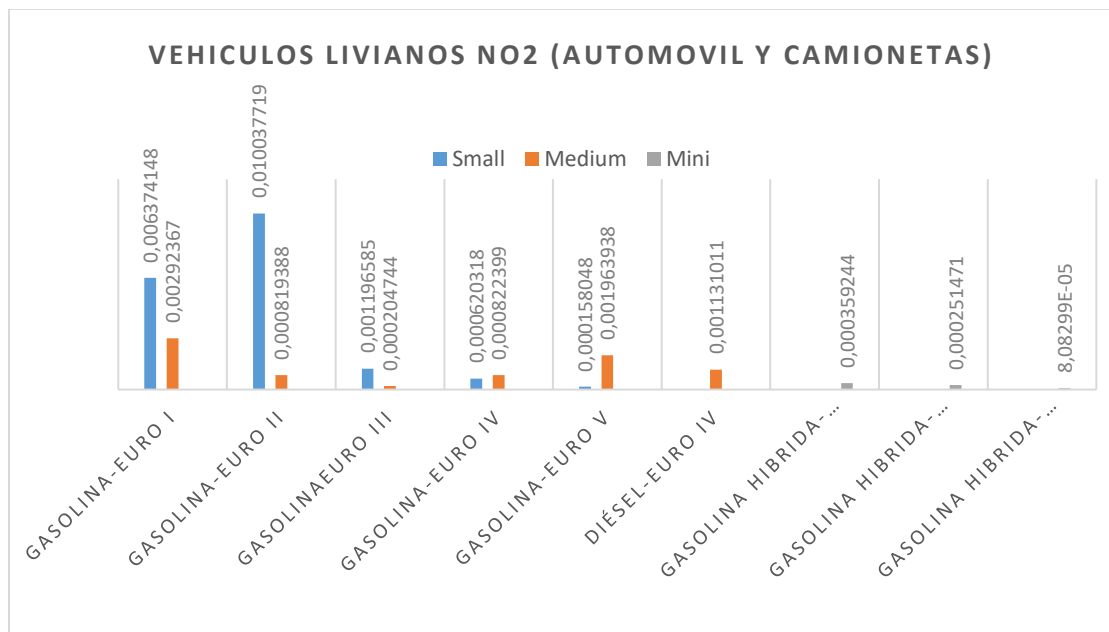
Contaminante Dióxido de nitrógeno NO_2

➤ Categoría Passenger Cars (Carros livianos)

En la ilustración 8, identificamos la emisión del contaminante NO_2 en zona rural del municipio categoría Passenger Cars; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría Medium (Medianos) de tecnología Euro I, Euro II, Euro IV, Euro V y Euro VI con combustible gasolina.

Ilustración 8.

Emisión NO₂ por normativa Euros_Passenger Cars



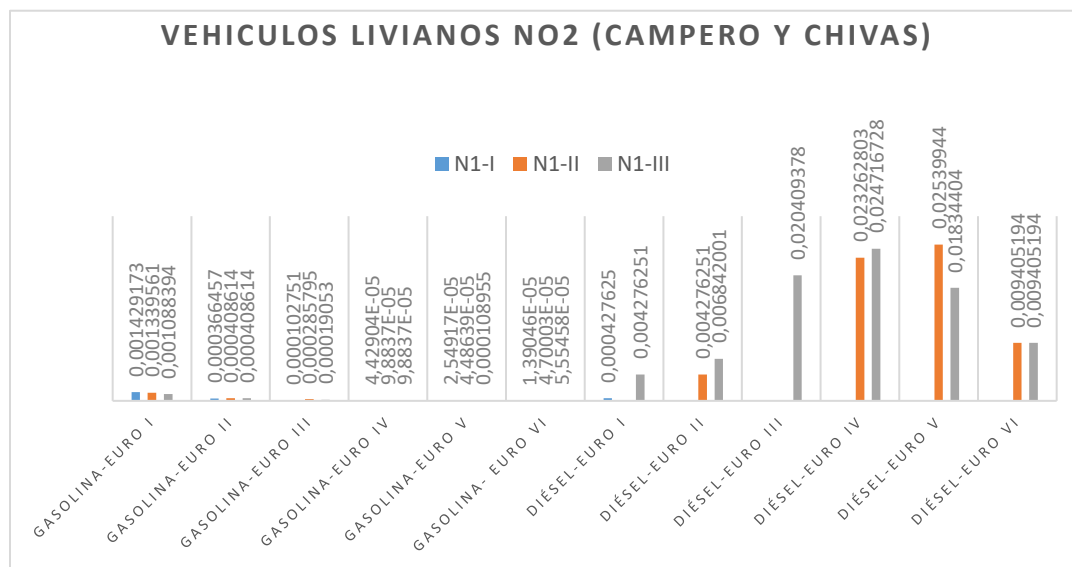
Fuente: Elaboración propia.

➤ *Categoría Light Commercial Vehicles (Vehículos livianos)*

En la ilustración 9, identificamos la emisión del contaminante NO₂ en zona rural del municipio categoría Light Commercial; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría N1-III de tecnología Euro I, Euro II, Euro IV, Euro V y Euro VI con combustible diésel.

Ilustración 9.

Emisión NO₂ por normativa Euros_ Light Commercial (Vehículos Livianos)



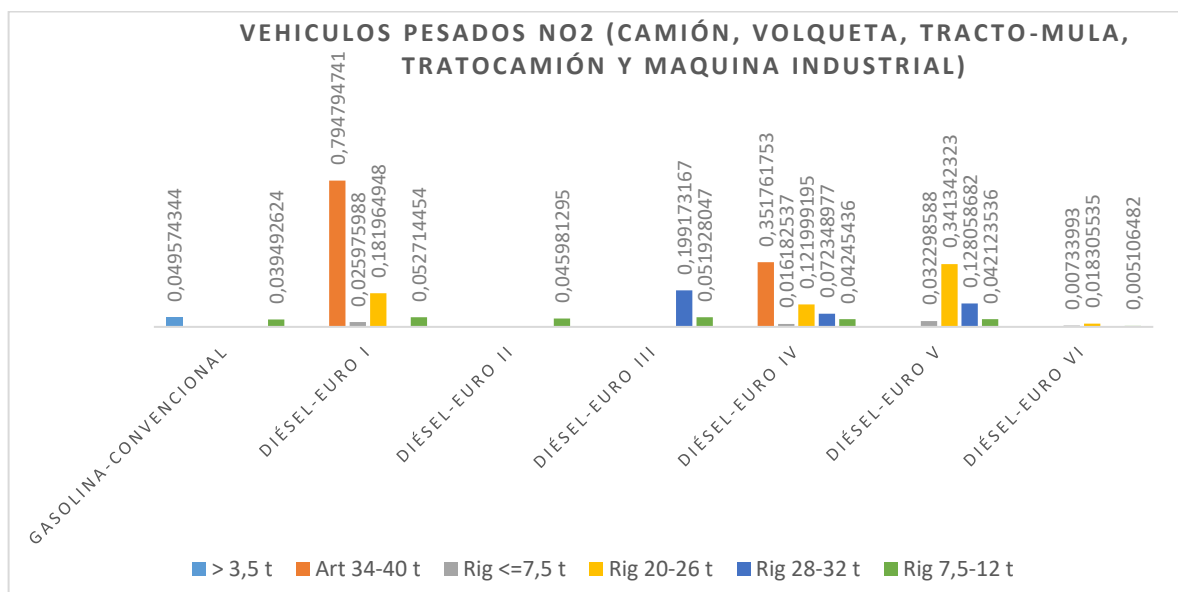
Fuente: Elaboración propia.

➤ *Categoría Heavy Duty Trucks(Vehículos pesados)*

En la ilustración 10, identificamos la emisión del contaminante NO_2 en zona rural del municipio categoría Heavy Duty; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría Rig 20-26 t de tecnología Euro II, Euro IV y Euro V con combustible diésel.

Ilustración 10.

Emisión NO₂ por normativa Euros Heavy Duty



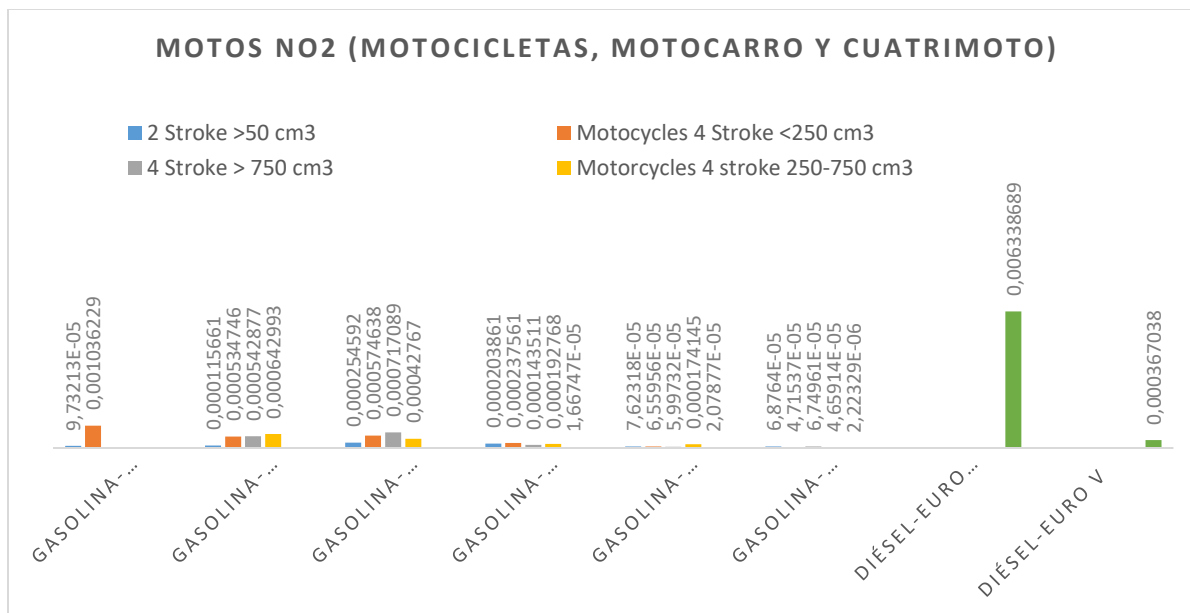
Fuente: Elaboración propia.

➤ *Categoría L-Category (Motocicletas)*

En la ilustración 11, identificamos la emisión del contaminante NO₂ en zona rural del municipio categoría L-Category; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría 4 Stroke <250 cm³ de tecnología Convencional, Euro 1, Euro II y Euro III con combustible gasolina.

Ilustración 11.

Emisión NO₂ por normativa Euros L Category



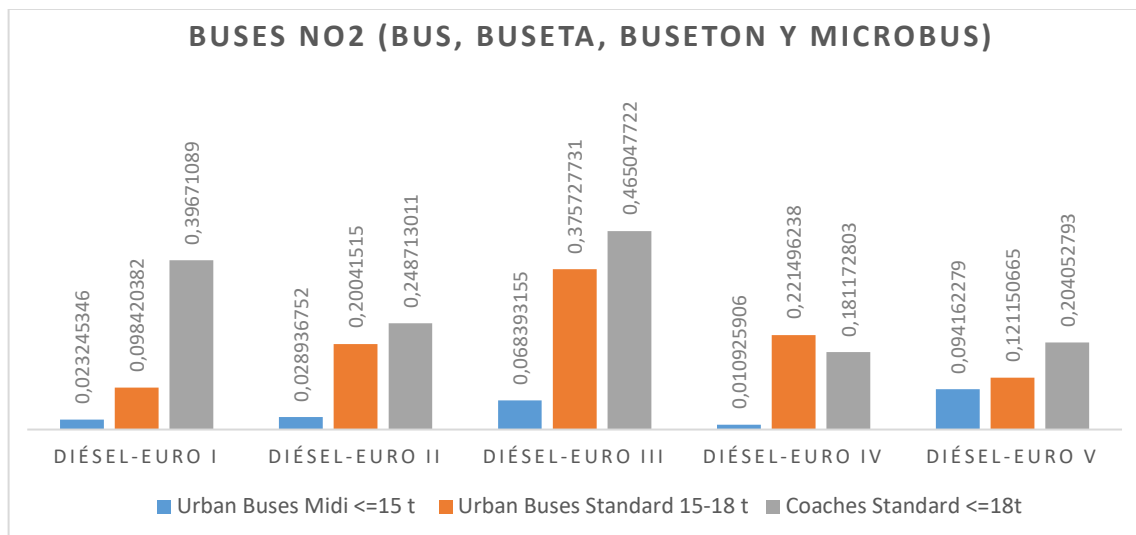
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Categoría Buses**

En la ilustración 12, identificamos la emisión del contaminante NO_2 en zona rural del municipio categoría Buses; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría Coaches Standard ≤ 18 t de tecnología Euro 1, Euro II, Euro III, Euro IV y Euro V con combustible diésel.

Ilustración 12.

Emisión NO_2 por normativa Euros Buses



Fuente: Elaboración propia.

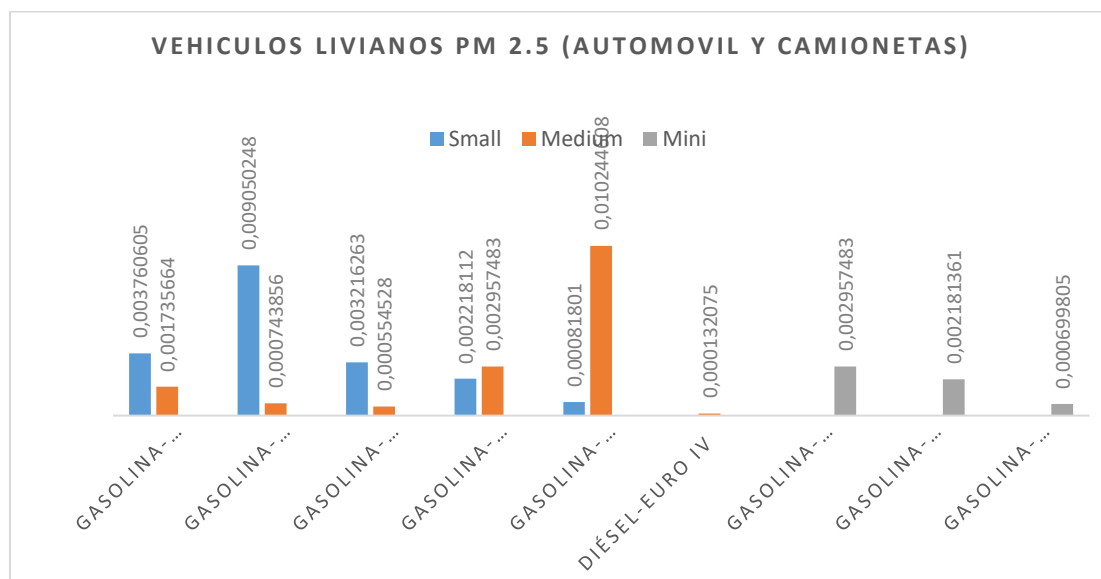
Material participado $PM_{2,5}$

➤ Categoría Passenger Cars (Vehículos Livianos)

En la ilustración 13, identificamos la emisión del contaminante $PM_{2,5}$ en zona rural del municipio categoría Passenger Cars; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría Small (Grande) tecnología Euro 1, Euro II, Euro III, Euro IV y Euro V con combustible gasolina.

Ilustración 13.

Emisión $PM_{2.5}$ por normativa Euros Passenger Cars (vehículos livianos)



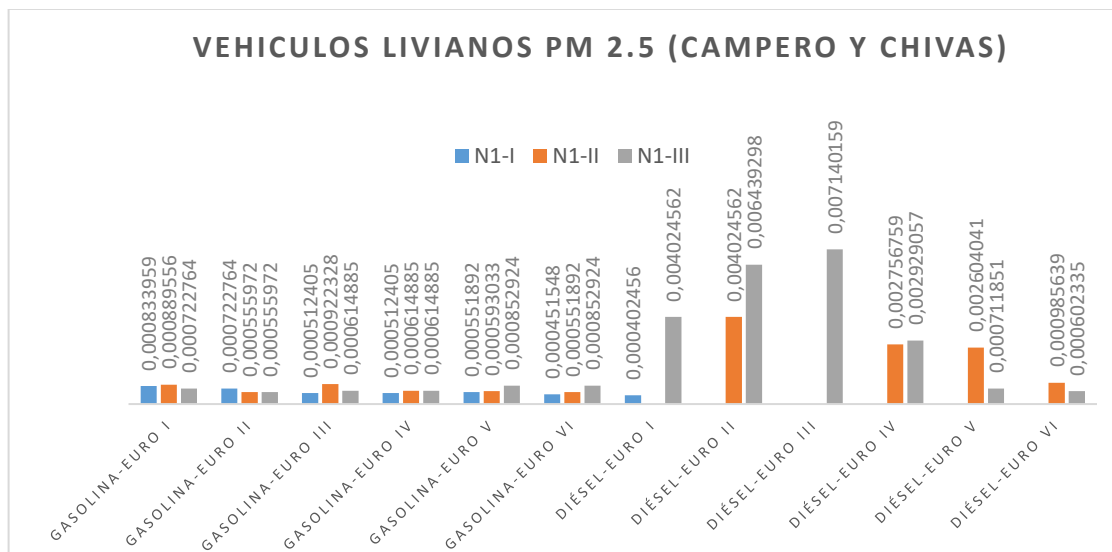
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Categoría Light Commercial Vehicles (Vehículos Livianos)**

En la ilustración 14, identificamos la emisión del contaminante $PM_{2.5}$ en zona rural del municipio categoría Light Commercial; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría N1-II tecnología Euro II, Euro IV, Euro V y Euro VI con combustible diésel.

Ilustración 14.

Emisión $PM_{2.5}$ por normativa Euros Light Commercial (vehículos livianos)



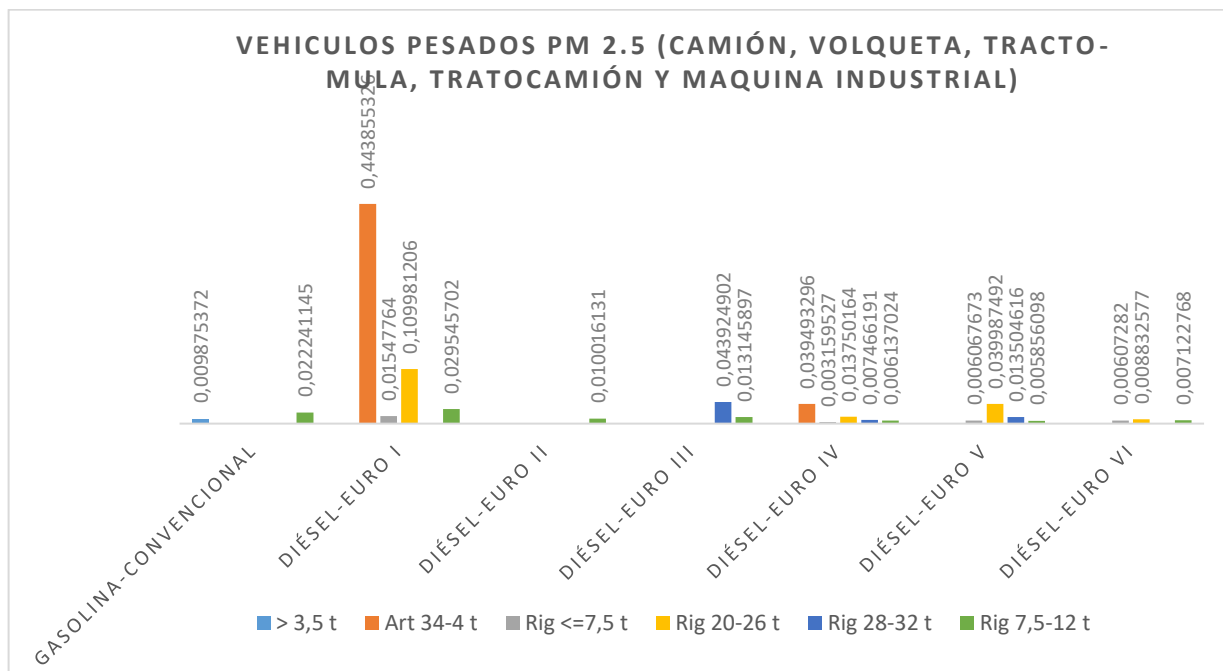
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Categoría Heavy Duty Trucks (Vehículos Pesados)**

En la ilustración 15, identificamos la emisión del contaminante $PM_{2.5}$ en zona rural del municipio categoría Heavy Duty; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría Articulado 34-40 t tecnología Euro I y Euro IV con combustible diésel.

Ilustración 15.

Emisión $PM_{2.5}$ por normativa Euros Heavy Duty Trucks



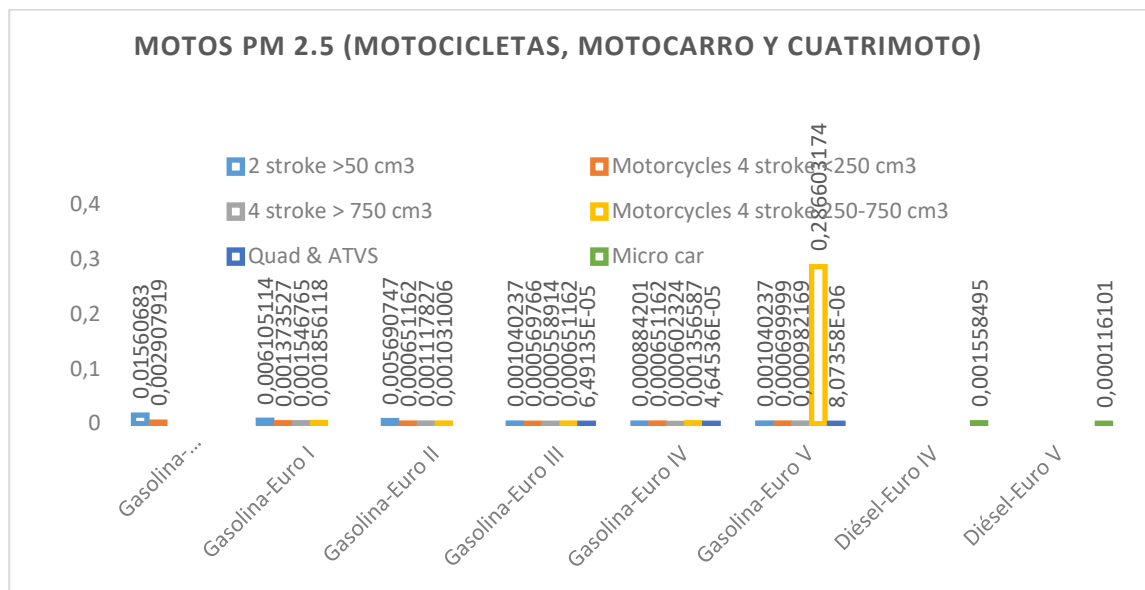
Fuente: Elaboración propia.

➤ **Categoría L-Category (Motocicletas)**

En la ilustración 16, identificamos la emisión del contaminante $PM_{2.5}$ en zona rural del municipio categoría L-Category; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría 4 Stroke 250-750 cm³ tecnología Euro I, Euro II, Euro III, Euro IV y Euro V con combustible gasolina.

Ilustración 16.

Emisión $PM_{2.5}$ por normativa Euros L-Category (Motocicletas)



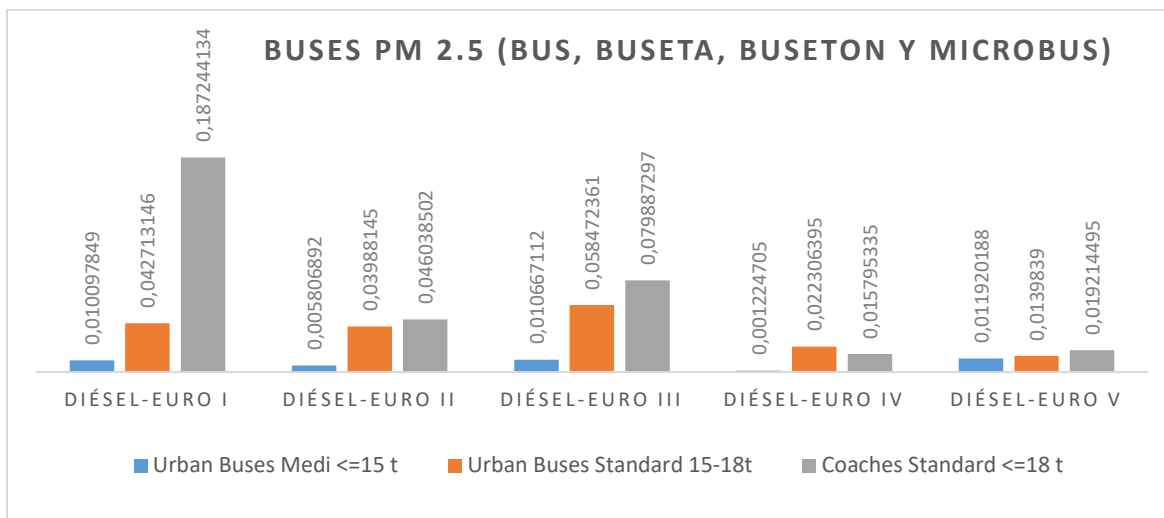
Fuente: Elaboración propia.

➤ Categoría Buses

En la ilustración 17, identificamos la emisión del contaminante $PM_{2.5}$ en zona rural del municipio categoría Buses; se evidencia mayor emisión en los vehículos de categoría Coaches Standard ≤ 18 t, tecnología Euro I, Euro II, Euro III, Euro IV y Euro V con combustible diésel.

Ilustración 17.

Emisión $PM_{2.5}$ por normativa Euros Buses



Fuente: Elaboración propia.

Identificación factor de emisión totales

Las siguientes figuras muestran los factores de emisión por contaminante, con el fin de estimar la cantidad de emisiones por distancia recorrida de acuerdo a la flota vehicular del parque automotor del municipio, las cuales están siendo emitidas a la atmosfera.

Contaminante CO (Monóxido de Carbono).

De acuerdo a la tabla 12, podemos observar que esta presenta los factores de emisión de CO por cada categoría vehicular. Los combustibles más utilizados son gasolina y diésel, la categoría vehicular que mayor masa de CO representa son las motocicletas a combustible gasolina ver tabla 12.

Tabla 12.*Factor de emisiones CO*

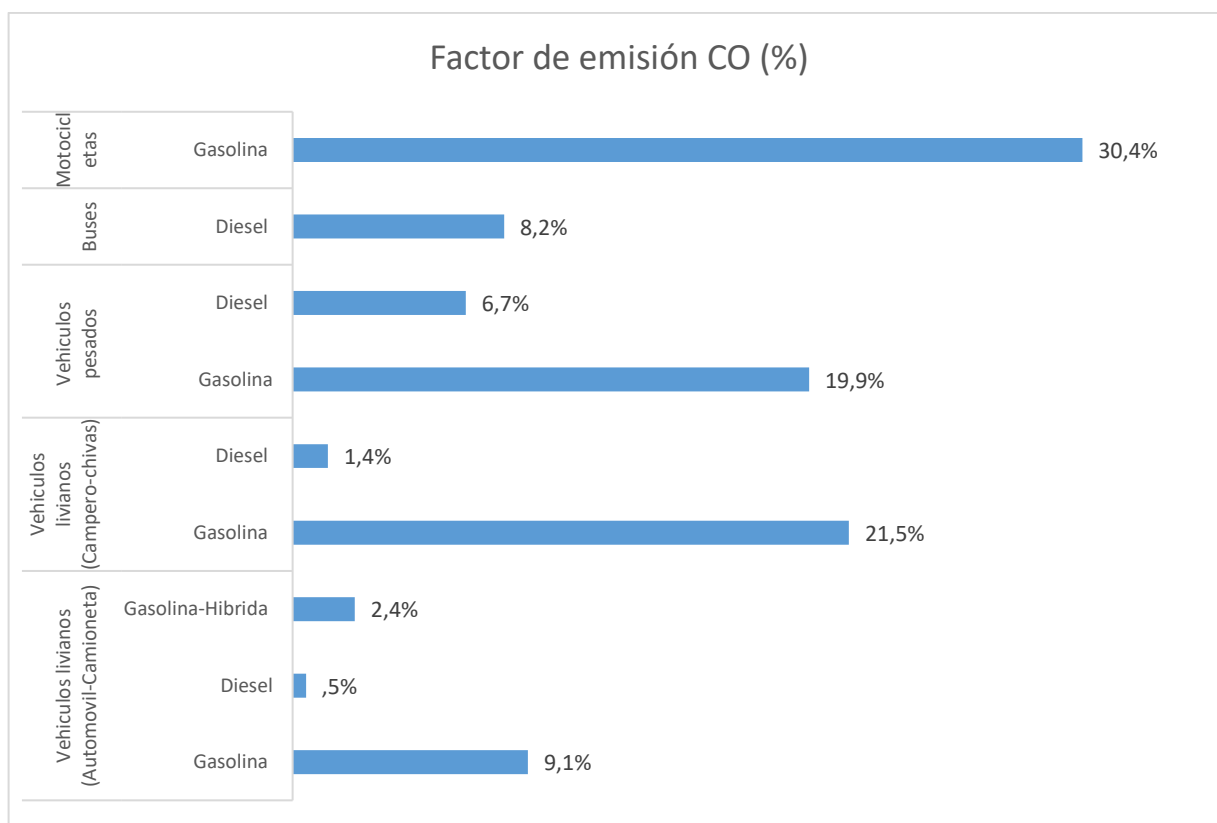
Categoría	Combustible	Total (g/km)	Porcentaje por categoría
Vehículos livianos	Gasolina	1,8767	9,1%
(Automóvil y	Diésel	0,1063	,5%
Camioneta)	Gasolina-Hibrida	0,4966	2,4%
Vehículos livianos	Gasolina	4,4358	21,5%
(Campero y chivas)	Diésel	0,2823	1,4%
Vehículos pesados	Gasolina	4,117	19,9%
	Diésel	1,3806	6,7%
Buses	Diésel	1,6861	8,2%
Motocicletas	Gasolina	6,296	30,4%
Total		20,6772	100%

Nota. Fuente: Elaboración propia

La ilustración 18, se identifica el porcentaje de emisión de las categorías vehiculares en relación con la emisión del contaminante CO, podemos observar que las categorías con mayor porcentaje de masa CO, utilizan combustible a gasolina como las motocicletas con 30 %, seguido de los vehículos livianos (Campero-chivas) con 21,5 % y finalmente los vehículos pesados con 19,9 %; también podemos identificar bajo consumo del combustible diésel en la categoría vehículos livianos (Automóvil-camioneta) con 0,5 % y finalmente los vehículos pesados con 1,4 %.

Ilustración 18.

Factor de misiones CO



Fuente: Elaboración propia

Contaminante Dióxido de nitrógeno NO_2

De acuerdo a la tabla 13, podemos observar que esta presenta los factores de emisión de NO_2 por cada categoría vehicular. Los combustibles utilizados son la gasolina y el diésel, sin

embargo el combustible más utilizado es el diésel con mayor masa NO_2 de la categoría vehicular buses ver tabla 13.

Tabla 13.

Factor de emisiones NO_2

Categoría	Combustible	Total (g/km)	Porcentaje por categoría
Vehículos livianos (Automóvil- camioneta)	Gasolina	0,0069	,29%
	Diésel	0,3095	13,12%
	Gasolina- Hibridad	0,0011	,05%
Vehículos livianos (Campero- Chivas))	Gasolina	0,0076	,32%
	Diésel	0,3265	13,84%
Vehículos pesados	Gasolina	0,1922	8,15%
	Diésel	0,6549	27,77%
Buses	Diésel	0,8551	36,26%
Motocicletas	Gasolina	0,0048	,20%
Total		2,3587	100

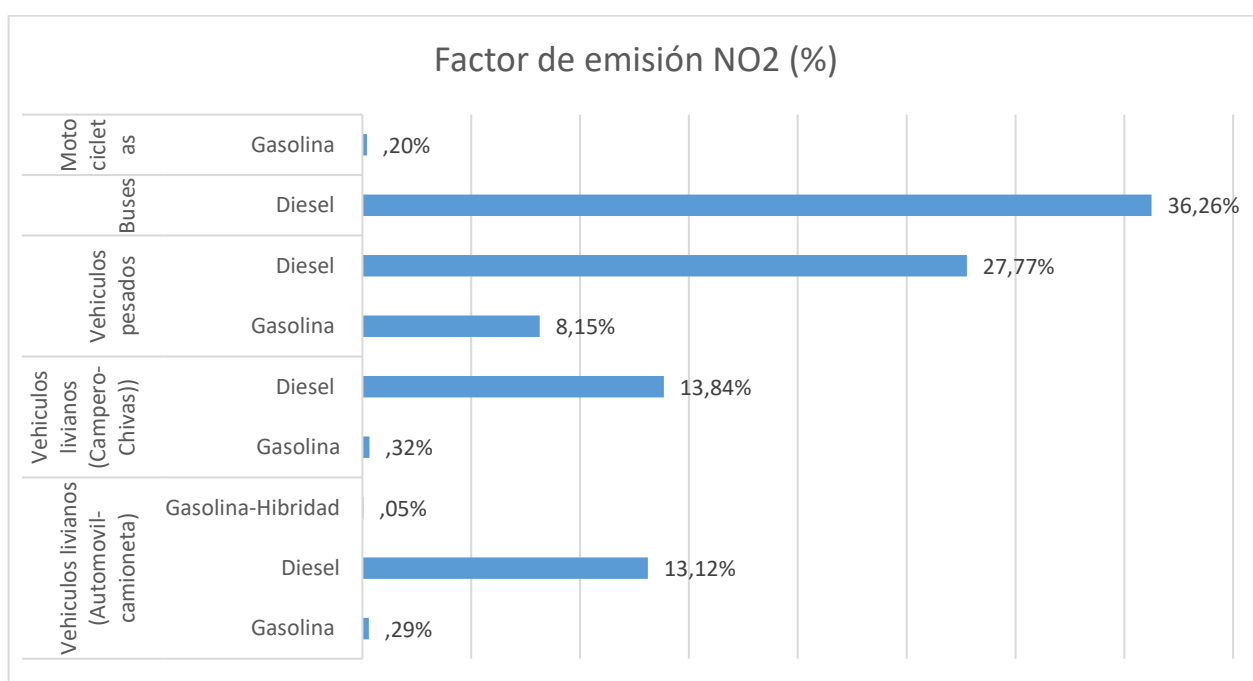
Fuente: Elaboración propia

La ilustración 19, se identifica el porcentaje de emisión de las categorías vehiculares en relación con la emisión del contaminante NO_2 , podemos observar que las categorías con mayor porcentaje de masa NO_2 , utilizan combustible a diésel como los buses con 36,26 %, seguido de los vehículos livianos pesados con 27,7 % y finalmente los vehículos livianos (Automóvil-

camioneta con 13,12%; también podemos identificar bajo consumo del combustible gasolina en la categoría vehículos pesados con 8,5 % y finalmente los vehículos vehículos livianos (Campero-chivas) con ,29%.

Ilustración 19.

Factor de emisión vehiculares NO2



Fuente: Elaboración propia

Material participado $PM_{2.5}$

De acuerdo a la tabla 14, podemos observar que esta presenta los factores de emisión de $PM_{2.5}$ por cada categoría vehicular. Los combustibles más utilizados son gasolina y diésel, la

categoría vehicular que mayor masa de $PM_{2.5}$ representa son los vehículos pesados a combustible diésel ver tabla 14.

Tabla 14.

Factor de emisiones $PM_{2.5}$

Categoría	Combustible	Total (g/km)	Porcentaje por categoría
Vehículos livianos (Automóvil-camioneta)	Gasolina	0,0147	2,29%
	Diésel	0,0433	6,73%
	Gasolina-Hibridad	0,0142	2,22%
Vehículos livianos (Campero-Chivas))	Gasolina	0,0198	3,08%
	Diésel	0,0608	9,45%
Vehículos pesados	Gasolina	0,0471	7,33%
	Diésel	0,2105	32,75%
Buses	Diésel	0,2021	31,45%
Motocicletas	Gasolina	0,0302	4,70%
Total		0,6427	100%

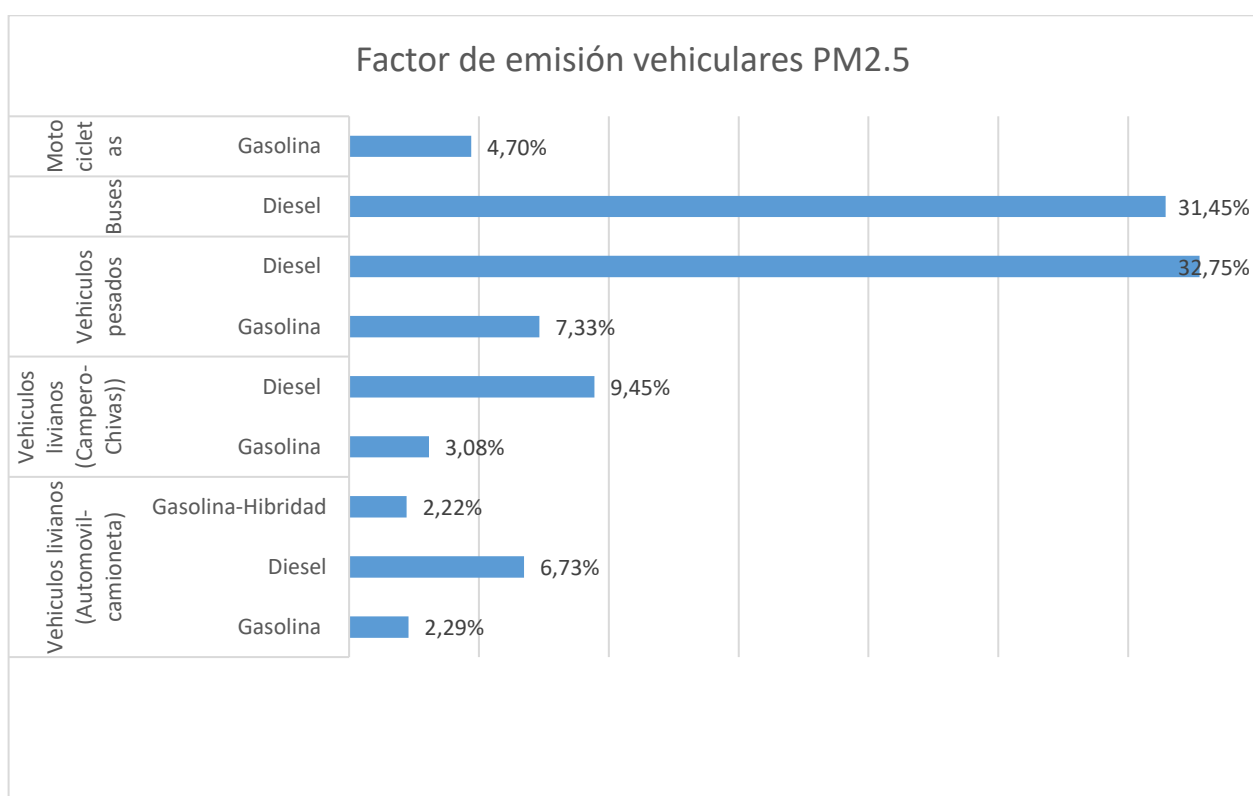
Fuente: Elaboración propia

La ilustración 20, se identifica el porcentaje de emisión de las categorías vehiculares en relación con la emisión del contaminante $PM_{2.5}$. Podemos observar que las categorías con mayor porcentaje de $PM_{2.5}$, utilizan combustible a diésel como los vehículos pesados con 32,75 %, seguido de los buses con 31,45 % y finalmente los vehículos livianos (Automóvil-camioneta) con

6,73 %. También podemos identificar bajo consumo del combustible gasolina en la categoría vehículos pesados 7,33%, seguido de las motocicletas con 4,70% y finalmente los vehículos livianos (Automóvil-camioneta) con 2,29 %.

Ilustración 20.

Factor de emisión vehiculares $PM_{2.5}$



Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

El parque automotor no cuenta con vehículos eléctricos, sin embargo, cuenta con movilidad sostenible como el transporte colectivo masivo de buses, micro-buses y busetas. Adicionalmente, se evidencia crecimiento constante del parque automotor por aumento demográfico de la población.

El modelo europeo COPERT permite identificar la exposición total de los niveles de emisión de los contaminantes presentes en la atmosfera a causa del uso de combustible de los vehículos y el ICA, índice calidad del aire monitorea los niveles de contaminación en la estación EU Joaquín Aristizabal del $PM_{2.5}$ (ICA, 2021). El programa COPERT aporta la medición de dos nuevos contaminates el CO y NO_2 para el municipio.

El municipio tiene una altura de 1.750 m.s.n.m aumentando la posibilidad de inmovilidad de las sustancias químicas emitidas a las atmosféricas como el óxido de nitrógeno, monóxido de carbono, óxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles provenientes de las fuentes móviles, aumentando las enfermedades respiratorias.

El parque automotor cuenta con 56% de motocicletas, por lo general las motocicletas son vehículos particulares que trasportan máximo 2 personas al día, aumentando el flujo vehicular y por ende aumento por emisión del contaminante CO.

La categoría vehicular con mayor factor de emisión con el contaminante CO son las motocicletas, así mismos la categoría con mayor relevancia en el contaminante NO_2 son los buses y finalmente la categoría que mayor emite sobre el contaminante $PM_{2.5}$ son los vehículos pesados.

Recomendaciones

El IDEAM no cuenta con los datos actualizados de los registros de % humedad relativa de la estación de monitoreo del SENA La Salada, se recomienda mantener la plataforma actualizada con información veraz y real.

Teniendo en cuenta el inventario preliminar realizado sobre el año 2020, año en el que inicio pandemia COVID 19, no se realizaron las revisiones tecno mecánica de los vehículos, se recomienda aforar con una flota vehicular de un año próximo; ya que se dificulto identificar el km/anual por vehículo, durante el año re realizaron pocas revisiones tecno mecánicas de los vehículos del parque automotor del municipio.

Es importante utilizar un GPS con el menor margen de error posible, ya que este permitirá obtener resultados más específicos en la distancia recorrida, que posteriormente serán utilizados en el archivo de entrada del modelo COPERT.

Es importante que las entidades gubernamentales del municipio de Caldas, presenten regulaciones más rigurosas frente a la tecnología vehicular usada por los habitantes, teniendo en cuenta que la mayor parte del parque automotor de la ciudad corresponden a motocicletas las cuales representan el 70% de la flota y se caracteriza por hacer uso de la gasolina en su proceso combustión interna

Se recomienda que el parque automotor del municipio de Caldas, haga uso de combustibles que se caractericen por generar menos emisión de agentes contaminantes, como es el caso del gas natural, ya que como se demostró en el planteamiento de la flota el 70% de los vehículos utilizan combustible gasolina

Referencias bibliográficas

- Aburrá, Á. M. (2017). Estrategias Ambientales Integradas. *Clean Air Institute*, 1-307. Obtenido de <https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Documents/PIGECA/PIGECA-Aprobado-Dic-2017.pdf>
- Agencia, A. (2016). Descripción e historia del modelo de factor de emisión de vehículos de carretera MÓVILES. *EPA*, 1. Obtenido de <https://www.epa.gov/moves/description-and-history-mobile-highway-vehicle-emission-factor-model>
- Alcazar, E. J., & Galarza, M. J. (2018). La contaminación atmosférica por fuentes móviles: caso Milagro. *Unemi*, 1-33. Obtenido de <http://repositorio.unemi.edu.ec/bitstream/123456789/3912/1/CONTAMINACION%20ATMOSFERICA.pdf>
- Ambiente., M. d. (2010). Resolución 0610. *Diario Oficial*, 1-3. Obtenido de https://www.icbf.gov.co/cargues/avance/docs/resolucion_minambientevdt_0610_2010.htm
- Bedoya, M. E. (2008). CALIDAD DEL AIRE EN EL VALLE DE ABURRÁ ANTIOQUIA - COLOMBIA. *Unal*, 1-9. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/10241/10757>
- Builes, L., Franco, M. C., Rave, C., & Smith, R. (2008). Estudio de alternativas para el mejoramiento de la calidad del aire en el municipio de itagui. *Gestión ambiente*, 1-14. Obtenido de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/13978/14776>
- Burgos, M. J. (2018). PRODUCTIVIDAD Y COMPETITIVIDAD DE BUCARAMANGA Y CÚCUTA: FACTORES CLAVES DEL DESARROLLO SOSTENIBLE EN EL MARCO DE LA ECONOMÍA DEL CONOCIMIENTO. *Gestión Libre.*, 1-6. Obtenido de <http://www.unilibrecucuta.edu.co/ojs/index.php/gestionyd/article/view/394>
- Caldas, A. d. (2022). Ubicación. *Caldas nuestro proposito*, 1. Obtenido de <https://caldasantioquia.gov.co/municipio/ubicacion/>
- Calla, D. L., & Luján, P. M. (2017). Inventario de emisiones de fuentes móviles con una distribución espacial y temporal para el área metropolitana de Cochabamba, Bolivia. *Scielo*, 1-32. Obtenido de http://www.scielo.org.bo/pdf/ran/v8n3/v8n3_a05.pdf
- Cames, M., & Helmers, E. (2013). Evaluación crítica del auge europeo del automóvil diésel: comparación global, efectos ambientales y diversas estrategias nacionales. *Springer*, 1-15. Obtenido de <https://enveurope.springeropen.com/articles/10.1186/2190-4715-25-15>
- Cardona, A. K. (2019). Arbolado urbano como estrategia de gestión de la calidad del aire. 1-20. Obtenido de <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/15906>

- Carmona, A. L., Rincon, P. M., Cartillo, R. A., Galvis, R. B., Sáenz, P. H., Manrique, F. R., & Pachón, Q. J. (2016). Conciliation of top-down and bottom-up inventories to estimate mobile source emissions in Bogota, Colombia. *Scielo*, 1-16. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v20n49/v20n49a04.pdf>
- Colombia, R. d. (1974). Por el cual se conceden facultades extraordinarias al Presidente de la República para expedir el Código de Recursos Naturales y de Protección al Medio Ambiente y se dictan otras disposiciones. *Diario Oficial*, 1-3. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/GestionIntegraldelRecursoHidrico/pdf/normativa/ley_23_de_1973.pdf
- Copert. (2020). La calculadora de emisiones estándar en la industria. *emisía*, 1. Obtenido de <https://www.emisia.com/utilities/copert/>
- Duque, G. E., Giraldo, C. D., & Sampedro, D. J. (2017). El factoring como herramienta financiera para las pequeñas y medianas empresas (pymes) del municipio de Caldas Antioquia. *Institución Universitaria Esumer*, 1-70. Obtenido de http://repositorio.esumer.edu.co/bitstream/esumer/822/2/Esumer_factoring.pdf
- Durán, F. C. (2019). Plan de desarrollo municipio de Caldas. *Caldas Progresá*, 1-110. Obtenido de <https://www.caldasantioquia.gov.co/uploads/entidad/control/0b881-plan-de-desarrollo-caldas-progresá-2016-2019.pdf>
- Emisia. (2020). European Road Transport & Emissions Trends Report. *ERTE*, 1. Obtenido de <https://www.emisia.com/>
- EPA. (2021). MOVES modelos relacionados. *EPA*, 1. Obtenido de <https://www.epa.gov/moves/moves-training-sessions>
- Futuro, S. (2019). CONDICIONES ESPECIALES DEL VALLE DE ABURRÁ. *Área Metropolitana de Aburrá*, 1. Obtenido de <https://www.metropol.gov.co/ambientales/calidad-del-aire/generalidades/condiciones-especiales>
- Gaitán, V. M., & Cárdenas, R. P. (2017). GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS. *MINAMBIENTE*, 1-92. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf
- Gaitán, V. M., & Cárdenas, R. P. (2017). GUÍA PARA LA ELABORACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS. *Minambiente*, 1-92. Obtenido de https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf

- García, R. H., & Calderón, E. L. (2012). Evaluación de la política de Biocombustibles en Colombia. *Fedesarrollo*, 1-154. Obtenido de https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/338/Repor_Octubre_2012_Garcia_y_Calderon.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Giraldo, A. L. (2005). Estimación del inventario de fuentes móviles. *Universidad de los Andes*, 1-78. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9147/u271368.pdf?s>
- Handl, G. (2012). DECLARACIÓN DE LA CONFERENCIA DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL MEDIO HUMANO (DECLARACIÓN DE ESTOCOLMO), DE 1972, Y DECLARACIÓN DE RÍO SOBRE EL MEDIO AMBIENTE Y EL DESARROLLO, DE 1992. *United Nations Audiovisual Library of International Law*, 1-14. Obtenido de https://legal.un.org/avl/pdf/ha/dunche/dunche_s.pdf
- Hernández, L. M., & Baloco, V. A. (2019). Estrategias de mejoramiento de la calidad del aire en ciudades con problemas de contaminación atmosférica. *Repositorio UDEA*, 1-61. Obtenido de <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/handle/10495/14402>
- ICA. (2021). Calidad del aire en Caldas. *IQAIR*, 1. Obtenido de <https://www.iqair.com/es/colombia/antioquia/caldas>
- IQAIR. (2021). Calidad del aire cerca de Caldas - E U Joaquin Aristizabal, Caldas. *Sistema de Alerta Temprana Valle de Aburra*, 1. Obtenido de <https://www.iqair.com/es/colombia/antioquia/caldas/caldas-e-u-joaquin-aristizabal>
- Londoño, J., Correa, M. A., & Palacio, C. A. (2011). ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS PROVENIENTES DE FUENTES MÓVILES EN EL ÁREA URBANA DE ENVIGADO, COLOMBIA. *EIA*, 1. Obtenido de https://www.redalyc.org/pdf/1492/Resumenes/Resumen_149222630011_1.pdf
- Medina, P. E. (2019). La contaminación del aire, un problema de todos. *Scielo*, 1-3. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rfmun/v67n2/0120-0011-rfmun-67-02-189.pdf>
- Merlinsky, G. (2017). EL CAMBIO CLIMÁTICO COMO PROBLEMA ECO-POLÍTICO. *MEGAFÓN*, 1-3. Obtenido de https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/75063/CONICET_Digital_Nro.cda53510-f725-45ab-9ebc-6c93d35b270f_A.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Metabiblioteca. (2013). Modelo IVE. *Metabiblioteca*, 1. Obtenido de <https://www.metarevistas.org/Search/Results?lookfor=Modelo%20IVE;&type=AllFields&limit=20&sort=relevance>
- Metropolitana, Á. (2020). Voces ciudadanas por un aire saludable. *Alcaldía Medellín*, 1-142. Obtenido de <https://repository.upb.edu.co/bitstream/handle/20.500.11912/6191/Voces%20Ciudadanas%20por%20un%20aire%20saludable.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Minambiente. (1974). Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. *Minambiente*, 1-122. Obtenido de <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-Ley-2811-de-1974.pdf>
- Minambiente. (2014). Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. *Minambiente*, 1-122. Obtenido de <http://parquearvi.org/wp-content/uploads/2016/11/Decreto-Ley-2811-de-1974.pdf>
- Minambiente. (2021). Contaminación Atmosférica. *El ambiente es de todos*, 1. Obtenido de <https://www.computrabajo.com.co/trabajo-de-ambiental-en-antioquia?q=ambiental>
- Minjusticia. (1953). DECRETO 2278 Por el cual se dictan medidas sobre cuestiones forestales. *Suin*, 1. Obtenido de <http://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/1430092>
- Mohammed, B. (2012). Techno-economic analysis and decision making for PHEV benefits to society, consumers, policymakers and automakers. *Colorado State University*, 1-237. Obtenido de https://mountainscholar.org/bitstream/handle/10217/68032/AIAlawi_colostate_0053A_11181.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Muñoz, A. m., Paz, J. J., & Quiroz, C. M. (2007). Air pollution and its effects in adults working at different levels of exposure. *Salud pública*, 1-10. Obtenido de <https://revistas.udea.edu.co/index.php/fnsp/article/view/85/102>
- OMS. (2002). Organización Mundial de la Salud. *OMS*, 1. Obtenido de https://www.who.int/topics/air_pollution/es/
- Orrego, G. A., & Molina, C. Á. (2015). CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SUS EFECTOS SOBRE LA SALUD DE LOS HABITANTES DEL VALLE DE ABURRÁ. *Minambiente*, 1-116. Obtenido de https://www.metropol.gov.co/ambiental/calidad-del-aire/Biblioteca-aire/Re-analisis/ContaminacionAtmosferica_y_sus_Efectos_en_la_Salud-AMVA_2019.pdf
- Pachés, G. M. (2020). Red Valenciana de Vigilancia y Control de la Contaminación Atmosférica. *Escuela Técnica Superior*, 1-9. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/142217/Pach%20-%20Red%20Valenciana%20de%20Vigilancia%20y%20Control%20de%20la%20Contaminaci%20Atmosf%20rica.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Represa, N. S. (2020). Elaboración e implementación de una propuesta metodológica para la evaluación y gestión de la calidad del aire mediante el enfoque de la ciencia de datos. *Universidad Nacional de la Planta*, 1-284. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/144645/Represa%20-%20Elaboraci%20e%20implementaci%20de%20una%20propuesta%20>

20metodol% c3% b3gica% 20para% 20la% 20evaluaci% c3% b3n% 20y% 20gesti% c3% b3n... pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Rojas, G. J. (2017). Monitoreo de cuatro contaminantes atmosféricos a nivel individual. *Universidad Veracruzana*, 1-71. Obtenido de <https://cdigital.uv.mx/bitstream/handle/1944/49406/RojasGarciaJuan.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rojas, I. D., Salazar, C. J., Montoya, E. D., & Muñoz, C. E. (2020). Problemática de la contaminación del aire en Colombia y estrategias de solución para la calidad del aire en Medellín, Área metropolitana del valle de aburra (Antioquia). *Éolo*, 1-14. Obtenido de <http://revistaeolo.fconvida.org/index.php/eolo/article/view/12/11>
- Rojas, R. N., Ágreda, J., Ochoa, M. T., Mesa, C. G., Osorio, S., & Hernández, F. L. (2016). Reflexiones acerca de la relación ambiente y salud. *Editorial*, 1-69. Obtenido de <https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=bLekDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA65&dq=En+Colombia+la+calidad+del+aire+y+las+emisiones+se+trabaja+en+funci%C3%B3n+de+la+calidad+y+protecci%C3%B3n+de+la+salud+de+las+personas+mediante+programas+de+reducci%C3%B3n+y+minimiz>
- Rojas, R. R., & Jaime, A. Y. (2019). Tercer Encuentro Nacional de Semilleros de Investigación de Ingeniería Industrial. *ENSIII*, 1-133. Obtenido de <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/30841/LIBRO%20DE%20MEMORIAS%20ENSIII%202019.pdf?sequence=1&isAllowed=y#page=45>
- Segura, S. H. (2019). Incentivos a actividades económicas consolidadas en Colombia: El caso de los biocombustibles como el Etanol y el Biodiesel. *Facultad derecho*, 1-21. Obtenido de <https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/23787/2/RAE-2107491.pdf>
- Sostenible, M. d. (2017). Norma calidad del aire y se dictan otras disposiciones. *IDEAM*, 1-11. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/527391/2.+Resoluci%C3%B3n+2254+de+2017+-+Niveles+Calidad+del+Aire..pdf/c22a285e-058e-42b6-aa88-2745fafad39f>
- Suárez, G. H. (2008). Análisis sobre la sustitución de la Constitución Política de Colombia de 1991 entre los años 2005 a 2008. *RIDUM*, 1-155. Obtenido de <http://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/3846>
- Suescún, E. J. (2020). From the Fourth Urban Revolution to the Fourth Industrial Revolution: Environmental Air Quality Challenges for Medellín and the Valle de Aburrá. *SSRN*, 1-8. Obtenido de https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3620146
- Tique, O. V., & Pinzón, H. A. (2019). Análisis de series de tiempo de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Bogotá a partir del desarrollo de modelos estadísticos arima. *Repositorio Institucional*, 1-142. Obtenido de

<https://repository.udistrital.edu.co/bitstream/handle/11349/24495/Pinz%c3%b3nHassanAngieDaniella2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Trejos, Z. E. (2017). Estimación de emisiones atmosféricas por fuentes móviles en ruta aplicando la metodología COPERT y determinación de las emisiones de material particulado susceptible de resuspensión con información local. *Universidad Nacional*, 1-171. Obtenido de <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80448>
- Valdez, A. B. (2013). Modelos para elaborar inventarios. *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares*, 1-21. Obtenido de <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/618/modelos.pdf>
- Vega, D., Ocaña, L., & Parra, R. (2012). InventariodeemisionesatmosféricasdeltráficovehicularenelDistritoMetropolitano de Quito. *Avances*, 1-9. Obtenido de <https://revistas.usfq.edu.ec/index.php/avances/article/view/270/271>
- Weatherspark. (2021). El clima y el tiempo promedio en todo el año en Caldas Colombia. *Weatherspark*, 1. Obtenido de <https://es.weatherspark.com/y/22505/Clima-promedio-en-Caldas-Colombia-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Humidity>
- Zambrano, B. L. (2019). Análisis de las condiciones geográficas de las ciudades asociadas a la calidad del aire en Colombia. *RI-UTS*, 1-95. Obtenido de <http://repositorio.uts.edu.co:8080/xmlui/handle/123456789/2993>

Anexos

Anexo A. Contaminante CO (Monóxido de Carbono).

Categoría	Tecnología Vehicular	Total Small	Total Medium	Total Mini	
Passenger Cars	Gasolina Euro I	2,13947711	0,874886708		
	Gasolina Euro II	3,01048059	0,212702645		
	Gasolina Euro III	0,8681038	0,124748125		
	Gasolina Euro IV	0,17304516	0,192133423		
	Gasolina Euro V	0,06575864	0,696672654		
	Diésel-Euro IV		0,000685193		
	Gasolina Híbrida-Euro IV			0,221853993	
	Euro V			0,155297795	
	Gasolina Híbrida Euro VI			0,049917148	
	Total Gasolina		6,2568653	2,101143555	
	Total Diésel			0,000685193	
	Total Gasolina Hibrididad				0,427068936

Categoría	Tecnología Vehicular	Total N1-I	N1-II	N1-III
Light Commercial	Gasolina-Euro I	1,13431916	0,885530934	0,719493884
Vehicles	Gasolina Euro II	0,49859543	0,365381824	0,365381824
	Gasolina Euro III	0,30327538	0,563482578	0,375655052
	Gasolina Euro IV	0,10721666	0,155663509	0,155663509
	Gasolina Euro V	0,01960347	0,041618222	0,101072825
	Gasolina Euro VI	0,0160392	0,065400063	0,077290984
	Diésel Euro I	0,00214589		0,02145886
	Diésel Euro II		0,02145886	0,034334176
	Diésel Euro III			0,043990663
	Diésel Euro IV		0,022317215	0,023712041
	Diésel Euro V		3,03429E-05	2,19143E-05
	Diésel Euro VI		1,85429E-05	1,85429E-05
	Total Gasolina	2,07904931	2,07707713	1,794558078
	Total Diésel	0,00214589	0,043824961	0,123536198

Categoría	Tecnología Vehicular	Urban Buses Midi <=15 t	Urban Buses Standard 15 - 18 t	Coaches Standard >18 t
Buses	Diésel Euro I	0,05867931	0,253762838	1,04656389
	Diésel Euro II	0,06082792	0,431882964	0,476457916
	Diésel Euro III	0,11291915	0,647190184	0,795252716
	Diésel Euro IV	0,0187268	0,37453303	0,341297408
	Diésel Euro V	0,30566978	0,403043938	0,631633681
	Total Diésel	0,55682296	2,110412954	3,291205611

Categoría	Tecnología Vehicular	Total > 3,5 t	Art 34-40 t	Rig <=7,5 t	Rig 20-26 t	Rig 28-32 t	Rig 7,5-12 t
Heavy	Gasolina Convenci	1,50202452					0,14338984
Duty	Diésel Euro I		1,980343969	0,065776976	0,499418132		0,13652902
Trucks	Diésel Euro II						0,079438
	Diésel Euro III					0,40606491	0,10866082

Categoría	Tecnología Vehicular	Total > 3,5 t	Art 34-40 t	Rig <=7,5 t	Rig 20-26 t	Rig 28-32 t	Rig 7,5-12 t
	Diésel Euro IV		0,614572739	0,030773419	0,229985858	0,13121226	0,08198547
	Diésel Euro V			0,083793386	0,780065201	0,31030884	0,10036199
	Diésel Euro VI			0,015213831	0,045942232		0,01336476
	Total Gasolina	1,50202452					
	Total Diésel		2,594916707	0,195557612	1,555411422	0,84758601	0,6637299
Categoría	Tecnología Vehicular	2-stroke >50 cm ³	Motorcycles 4-stroke <250 cm ³	4-stroke >750 cm ³	Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm ³	Quad & ATVs	Micro-car
L-Category	Gasolina Convenci	1,73749224	2,864026449				
	Gasolina Euro I	1,06900062	0,825467364	1,002938502	1,203526203		
	Gasolina Euro II	1,46269226	0,381509714	0,561349529	0,517749565		
	Gasolina Euro III	0,19112445	0,03949986	0,036984505	0,043088744	0,01079684	
	Gasolina Euro IV	0,21673757	0,052250624	0,020384617	0,045911299	0,00498572	

Categoría	Tecnología Vehicular	Total > 3,5 t	Art 34-40 t	Rig <=7,5 t	Rig 20-26 t	Rig 28-32 t	Rig 7,5-12 t
	Gasolina Euro V	0,09824288	0,049145445	0,029155482	0,016108001	0,00092637	
	Diésel Euro IV						0,01819288
	Diésel Euro V						0,01663349
	Total Gasolina	4,77529001	4,211899454	1,650812635	1,826383812	0,01670894	
	Total Diésel						0,03482636

Fuente: Elaboración propia

Anexo B. Contaminante NO₂ (Dióxido de nitrógeno)

Categoría	Tecnología Vehicular	Total Small (Pequeño)	Total Medium (Medio)	Total Mini (Mini)
Passenger Cars	Gasolina-Euro I	0,006374148	0,00292367	
(Carros livianos)	Gasolina-Euro II	0,010037719	0,000819388	
	Gasolina Euro III	0,001196585	0,000204744	

Categoría	Tecnología Vehicular	Total Small (Pequeño)	Total Medium (Medio)	Total Mini (Mini)
	Gasolina-Euro IV	0,000620318	0,000822399	
	Gasolina-Euro V	0,000158048	0,001963938	
	Diésel-Euro IV		0,001131011	
	Gasolina híbrida-Euro IV			0,000359244
	Gasolina híbrida-Euro V			0,000251471
	Gasolina Híbrida-Euro VI			8,08299E-05
Total Gasolina		0,0183868	0,006734139	
Total Diésel			0,001131011	
Total Gasolina híbrida				0,000691544
Categoría	Tecnología Vehicular	Total N1-I	N1-II	N1-III
Light Commercial	Gasolina-Euro I	0,001429173	0,001339561	0,001088394
Vehicles	Gasolina-Euro II	0,000366457	0,000408614	0,000408614
(Vehículos livianos)	Gasolina-Euro III	0,000102751	0,000285795	0,00019053

Categoría	Tecnología Vehicular	Total Small (Pequeño)	Total Medium (Medio)	Total Mini (Mini)
	Gasolina-Euro IV	4,42904E-05	9,8837E-05	9,8837E-05
	Gasolina-Euro V	2,54917E-05	4,48639E-05	0,000108955
	Gasolina- Euro VI	1,39046E-05	4,70003E-05	5,55458E-05
	Diésel-Euro I	0,000427625		0,004276251
	Diésel-Euro II		0,004276251	0,006842001
	Diésel-Euro III			0,020409378
	Diésel-Euro IV		0,023262803	0,024716728
	Diésel-Euro V		0,02539944	0,01834404
	Diésel-Euro VI		0,009405194	0,009405194
Total Gasolina		0,001982067	0,002224671	0,001950876
Total Diésel		0,000427625	0,062343687	0,083993591
Categoría	Tecnología Vehicular	Urban Buses Midi <=15 t	Urban Buses Standard 15 - 18 t	Coaches Standard >18 t
Buses	Diésel-Euro I	0,023245346	0,098420382	0,39671089

Categoría	Tecnología Vehicular	Total Small (Pequeño)	Total Medium (Medio)	Total Mini (Mini)
	Diésel-Euro II	0,028936752	0,20041515	0,248713011
	Diésel-Euro III	0,068393155	0,375727731	0,465047722
	Diésel-Euro IV	0,010925906	0,221496238	0,181172803
	Diésel-Euro V	0,094162279	0,121150665	0,204052793
	Total	0,225663437	1,017210166	1,495697218

Categoría	Tecnología Vehicular	Total > 3,5 t	Articulado 34-40 t	Rig <=7,5 t	Rig 20-26 t	Rig 28-32 t	Rig 7,5-12 t
Heavy Duty Trucks (Vehículos pesados)	Gasolina- Convencional	0,04957434 4					0,0394926 2
	Diésel-Euro I		0,794794741	0,02597598	0,18196494		0,0527144
	Diésel-Euro II			8	8		5 0,0459813

Categoría	Tecnología Vehicular	Total > 3,5 t	Articulado 34-40 t	Rig <=7,5 t	Rig 20-26 t	Rig 28-32 t	Rig 7,5-12 t
	Diésel-Euro III					0,19917316	0,0519280
						7	5
	Diésel-Euro IV	0,351761753		0,01618253	0,12199919	0,07234897	0,0424543
				7	5	7	6
	Diésel-Euro V			0,03229858	0,34134232	0,12805868	0,0421235
				8	3	2	4
	Diésel-Euro VI			0,00733993	0,01830553		0,0051064
					5		8
Total		0,04957434	1,146556494	0,08179704	0,663612	0,39958082	0,2798008
		4		4		7	
Categoría	Tecnología Vehicular	2-stroke >50 cm ³	Motorcycles 4-stroke <250 cm ³	4-stroke >750 cm ³	Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm ³	Quad & ATVs	Micro-car

Categoría	Tecnología Vehicular	Total > 3,5 t	Articulado 34-40 t	Rig <=7,5 t	Rig 20-26 t	Rig 28-32 t	Rig 7,5-12 t
	Diésel-Euro V						0,0003670 4
	Total Gasolina	0,00081643	0,002495923	0,00153094 6	0,00148416 6	3,96857E- 05	
	Total Diésel						0,0067057 3

Fuente: Elaboración propia

Anexo C. Contaminante $PM_{2.5}$ (Partículas menores 2.5)

Categoría	Tecnología vehicular	Total Small (Pequeño)	Total Medium (Mediano)	Total Mini (Mini)	Normativa
Passenger	Gasolina-Euro I	3760610000	1735660000		25
Cars	Gasolina-Euro II	9050250000	7486000000		25

Categoría	Tecnología vehicular	Total Small (Pequeño)	Total Medium (Mediano)	Total Mini (Mini)	Normativa
(Vehículos	Gasolina-Euro III	3216260000	554530000		25
s	Gasolina-Euro IV	2218110000	2957480000		25
Livianos)	Gasolina-Euro V	8180100000	10244610000		25
	Diésel-Euro IV		132080000		25
	Gasolina-Euro IV			2957480000	25
	Gasolina-Euro V			2181360000	25
	Gasolina-Euro VI			699810000	25
Categoría	Tecnología vehicular	Total N1-I	N1-II	N1-III	Normativa
Light	Gasolina-Euro I	2181361000	512405000	614885000	25
Commerci	Gasolina-Euro II	699805000	51892000	351204000	25
al	Gasolina-Euro III	121753000	451548000	551892000	25
Vehicles	Gasolina-Euro IV	833959000	889556000	722764000	25

Categoría	Tecnología vehicular	Total Small (Pequeño)	Total Medium (Mediano)	Total Mini (Mini)	Normativa
(Vehículo	Gasolina-Euro V	722764000	846616800	555972000	25
s livianos)	Gasolina- Euro VI	512405000	922328000	555972000	25
	Diésel- Euro I	1911803000		2656779000	25
	Diésel-Euro II		867746000	985639000	25
	Diésel-Euro III			602335000	25
	Diésel-Euro IV		662558000	4024562000	25
	Diésel-Euro V		686843000	6439298000	25
	Diésel-Euro VI		402456000	7140159000	25
	Tecnología vehicular	Urban Buses Midi <=15 t	Urban Buses Standard 15 - 18 t	Coaches Standard <=18 t	Normat iva
	Diésel-Euro I	1,09981E+11	7466191000	5806892000	25
	Diésel-Euro II	13750164000	13504616000	10667112000	25

Categoría	Tecnología vehicular	Total Small (Pequeño)	Total Medium (Mediano)	Total Mini (Mini)	Normativa
	Diésel-Euro III	39987492000	4,43855E+11	1224705000	25
	Diésel-Euro IV	8832577000	39493296000	11920188000	25
	Diésel-Euro V	43924902000	10097849000	42713146000	25

Categoría	Tecnología vehicular	Total > 3,5 t	Articulado 34-40 t	Rig <=7,5 t	Rig 20-26 t	Rig 28-32 t	Rig 7,5-12 t
Heavy Duty Trucks (Vehículos Pesados)	Gasolina-Convencional	5842467000					9,875E+10
	Diésel-Euro I		39987492000	651535100	1001613000		1,548E+10
	Diésel-Euro II			0	0		3,16E+09
	Diésel-Euro III					3,4E+09	6,068E+09

Categoría	Tecnología vehicular	Total > 3,5 t	Articulado 34-40 t	Rig <=7,5 t	Rig 20-26 t	Rig 28-32 t	Rig 7,5-12 t
	Diésel-Euro IV		8832577000	270711000	1314190000	1,1E+11	6,073E+09
	Diésel-Euro V			703097000	6137020000	1,38E+10	2,224E+10
	Diésel-Euro VI			594928000	5856100000		3,023E+11
Categoría	Tecnología vehicular	2-stroke >50 cm ³	Motorcycles 4-stroke <250 cm ³	4-stroke >750 cm ³	Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm ³	Quad & ATVs	Micro-car
L-Category (Motocicletas)	Gasolina-Convencional	2230639500	1,92145E+11				
	Gasolina-Euro I	0		651162000	1040237000		
	Gasolina-Euro II	13983900000	1,56068E+11				
	Gasolina-Euro II	18724413400	6105114000	699999000	2907919000		

Categoría	Tecnología vehicular	Total > 3,5 t	Articulado 34-40 t	Rig <=7,5 t	Rig 20-26 t	Rig 28-32 t	Rig 7,5-12 t
	Gasolina-	46038502000	5690147000	185611800	1373527000	1,36E+09	
	Euro III			0			
	Gasolina-	79887297000	1040230000	103100600	651162000	5,43E+08	
	Euro IV			0			
	Gasolina-	15795335000	884201000	651162000	2,89315E+11	1,55E+08	
	Euro V						
	Diésel-Euro IV						1,125E+09
	Diésel						93193300
	-Euro V						0

Fuente: Elaboración propia