



Corporación Autónoma
Regional del Valle del Cauca



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

INVENTARIO DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA POR FUENTES MÓVILES PARA EL MUNICIPIO DE YUMBO – AÑO BASE 2021

CONVENIO INTERADMINISTRATIVO No. 036 DE 2021 CVC-UNAL



**INVENTARIO DE EMISIONES A LA ATMÓSFERA POR
FUENTES MÓVILES PARA EL MUNICIPIO DE YUMBO – AÑO
BASE 2021**

PROYECTO 4001 RESULTADO 1 ACTIVIDAD 16

**CONVENIO INTERADMINISTRATIVO CVC No. 036 DE 2021
CELEBRADO ENTRE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA
REGIONAL DEL VALLE DEL CAUCA -CVC- Y LA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE PALMIRA-
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ADMINISTRACIÓN**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
DICIEMBRE DE 2021**

EQUIPO DE TRABAJO UNAL

Germán Rueda Saa
Director del Proyecto

Rodrigo Jiménez Pizarro
Director Científico

Néstor Yezid Rojas
Asesor Inventario de Emisiones

Sonia C. Mangones M
Asesora de movilidad y tráfico vehicular

Liseth González Delgado
Coordinadora General

PROFESIONALES

Andrés Ardila Ardila
Ingeniero Ambiental

Ángela C Vargas Burbano
Ingeniera ambiental

David Fernando García
Ingeniero Químico

Diego Andrés Arias Arana
Físico

Jennifer Marín Ospina
Ingeniera ambiental

Luis David López Buitrago
Ingeniero civil

Pablo Gutiérrez Espada
Ingeniero ambiental

EQUIPO DE TRABAJO CVC

COMITÉ TÉCNICO:

Nubia Madeleine Bastidas Bonilla
Supervisora

Marleni Marín Ocampo
DAR Suroccidente

Alexander Barona Serrano
Profesional DGA

Sigifredo Salgado Echeverri
Ingeniero Agrónomo
Profesional especializado, DGA

PROFESIONALES DE APOYO:

Carlos Fernando De Jesús Murillo
Profesional Contratista, DTA

Ever Alonso Ríos Sosa
Ingeniero Sanitario
Profesional Contratista, DAR Suroccidente

CONTENIDO

SIGLAS Y ABREVIATURAS	8
RESUMEN EJECUTIVO	9
INTRODUCCIÓN.....	10
OBJETIVO GENERAL	11
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
1. MARCO DE REFERENCIA	12
1.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	12
1.1.1. Municipio de Yumbo - Valle del Cauca	12
1.2 INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES MÓVILES	13
1.2.1 Estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta.....	13
1.2.2 Factor de emisión	14
1.2.3 Factor de actividad	14
1.2.4 Modelos de emisiones vehiculares	14
2. INVENTARIO DE FUENTES MÓVILES.....	16
2.1 ENFOQUE METODOLÓGICO.....	16
2.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE VENTAS Y CONSUMO ESTIMADO DE COMBUSTIBLE	17
2.2.1 Ventas de combustibles líquidos y gaseosos.....	18
2.2.2 Parque Automotor ($N_{VEH,J}$)	18
2.2.3 Factor de actividad vehicular	20
2.2.4 Agrupación por categoría vehicular	21
2.2.5 Consumo de Combustibles (FA_i)	26
2.2.6 Comparación de ventas vs. consumo estimado de combustible	26
2.3 ESTIMACIÓN TOP-DOWN DE EMISIONES DE CO₂.....	28
2.4 ESTIMACIÓN BOTTON-UP	30
2.4.1 Actividad vehicular.....	30
2.4.2 Factores de emisión (FE_{ij})	47
2.4.3 Emisiones vehiculares (E_i).....	58
3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	64
4. BIBLIOGRAFIA.....	66
5. ANEXOS.....	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Resumen del procesamiento de datos provenientes de los CDA de Yumbo.	24
Tabla 2. Actividad vehicular diaria por cada categoría.	24
Tabla 3. Actividad vehicular por día en Palmira, Yumbo, Manizales y AMVA	25
Tabla 4. Consumo de combustible por tipo de combustible y categoría vehicular ..	26
Tabla 5. Factores de emisión para el inventario de emisiones por fuentes móviles del municipio de Yumbo, de acuerdo con la UPME.	29
Tabla 6. Emisiones de CO₂ por tipo de combustible de acuerdo con el consumo estimado del parque automotor registrado en Yumbo.	29
Tabla 7. Emisiones de CO₂ por tipo de combustible de acuerdo con el consumo reportado por el SICOM en Yumbo.	29
Tabla 8. Velocidades promedio de la malla vial del municipio de Yumbo en horas valle.	31
Tabla 9. Características de los puntos aforo vehicular Yumbo	33
Tabla 10. Relación de vehículos particulares y taxis.	34
Tabla 11. Jerarquización vial del municipio de Yumbo.	39
Tabla 12. Caracterización de la malla vial.	40
Tabla 13. Agrupación de puntos de aforo para definición de polígonos de Thiessen	42
Tabla 14. Kilómetros recorridos por día y tipo de vehículos en los días evaluados	46
Tabla 15. Calendario de introducción de tecnologías a Colombia.	50
Tabla 16. Relación Peso bruto vehicular de los vehículos pesados según el cilindraje.	51
Tabla 17. Reglas para la asignación del segmento y categoría al parque automotor.	52
Tabla 18. Actividad acumulada por categoría vehicular, estándar Euro y tipo de combustible, según los datos de CDA.	53
Tabla 19. Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular.	56
Tabla 20. Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular y combustible.	57
Tabla 21. Emisiones diarias de contaminantes para los días evaluados	58
Tabla 22. Relación de expansión de emisiones para el mes de noviembre	60
Tabla 23. Emisiones atmosféricas totales por fuentes móviles en Yumbo.	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del municipio de Yumbo, Valle del Cauca.....	13
Figura 2. Esquema metodológico de estimación de emisiones por enfoque Top-Down y Bottom-Up.....	16
Figura 3. Flujograma para la estimación de flujo vehicular en la malla vial usando polígonos de Thiessen	17
<i>Figura 4. Serie temporal de ventas de combustible líquidos reportados por el SICOM para Yumbo.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 5. Distribución del parque automotor registrado en Yumbo agrupado por categoría vehicular según datos reportados por el RUNT.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 6. Distribución de uso de combustible por categoría vehicular para el municipio de Yumbo, según datos reportados por el RUNT.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7. Histograma (a) y qq plot (b) para el CDA Tecnimas.....</i>	<i>23</i>
Figura 8. Actividad vehicular por día en Yumbo, Palmira, Manizales y AMVA.....	25
<i>Figura 9. Comparativo entre la estimación de consumo y ventas según SICOM de a) gasolina y b) Diesel y c) GNV.....</i>	<i>27</i>
Figura 10. Tramos viales con velocidad promedio medida en el municipio de Yumbo.	31
Figura 11. Ubicación de puntos de aforo vehicular 2021 municipio de Yumbo.	32
Figura 12. Perfiles de conteos vehiculares horarios para el punto de aforo Y8 por categoría vial para los días de la semana.....	35
Figura 13. Diagrama de barras para el conteo total de vehículos por punto de aforo y categoría vehicular para el día típico.	36
<i>Figura 14. Diagrama el promedio y máximo del conteo por carril de vehículos por punto de aforo y categoría vehicular para el día típico.....</i>	<i>37</i>
Figura 15. Diagramas de Pareto de la contribución a los VKT totales por día y punto de aforo.	38
Figura 16. Ejemplo vía rural y urbana municipio de Yumbo con reducción de capacidad	39
Figura 17. Jerarquización de la malla vial municipio de Yumbo	41
Figura 18. Polígonos de Thiessen por categoría vial a) vías primarias, b) vías secundarias, c) vías terciarias.....	44
Figura 19. Mapa de flujo vehicular día típico 24 horas.....	45
Figura 20. Kilómetros recorridos de todas las categorías vehiculares para el día típico por tramo vial.....	47
Figura 21. Esquema metodológico para la estimación de factores de emisión vehicular mediante el modelo COPERT 5.5.	48
Figura 22. Perfil horario de emisiones por contaminante para los días evaluados.	59
Figura 23. Emisiones de CO2 en un día típico por tramo vial.....	60
Figura 24. Emisiones vehiculares por tipo de vehículo y contaminante.	62
Figura 25. Emisiones de contaminantes por tipo de combustible consumido.	63
Figura 26. Comparativo de estimación emisiones por enfoques empleados.....	63

SIGLAS Y ABREVIATURAS

CDA	Centro de diagnóstico automotriz
COPERT	Computer Program to calculate Emissions from Road Transport, desarrollado por European Topic Centre on Air and Climate Change
COV	Compuestos orgánicos volátiles
COVNM	Compuestos orgánicos volátiles no metánicos
DAR	Dirección ambiental regional
DTA	Dirección técnica ambiental
EDS	Estaciones de servicio
PM ₁₀	Material particulado menor a 10 micrómetros
PM _{2.5}	Material particulado menor a 2.5 micrómetros
RUA	Registro único ambiental
RUNT	Registro Único Nacional de Tránsito
SICOM	Sistema de Información de Combustibles
TSP	Partículas suspendidas totales
VAP	Vías arterias principales
VAS	Vías arterias secundarias
VCP	Vía colectora principales
VCS	Vía colectora secundaria
VKT	Vehículos kilómetro recorridos en una red de transporte
VL	Vías locales

RESUMEN EJECUTIVO

La estimación del inventario de emisiones para el municipio de Yumbo se realizó en primera medida bajo enfoque Top-Down como método de referencia, y el enfoque Bottom-Up como metodología principal.

Desde el enfoque Top-Down se estimaron las emisiones de CO₂ empleando dos parámetros distintos, por un lado, los consumos de combustible reportados por el Sistema de Información de Combustibles (SICOM) y factores de emisión reportados por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), este proceso determinó que anualmente se generan 288,893 toneladas de CO₂. Por otro lado, se realizó la estimación de consumo a partir de la actividad vehicular promedio reportado en los CDA y el registro de vehículos del RUNT para en el municipio, con este método de se estimó una generación de 116,057 toneladas de CO₂ anuales.

La estimación de emisiones de contaminantes del enfoque Botton-Up, empleó aforos vehiculares de 24 horas durante 4 días (Día típico, viernes, sábado y domingo), en 9 puntos de aforo de diferentes tipos de vías del municipio de Yumbo y 4 aforos más del año 2018 que fueron proyectados al presente con la relación de crecimiento del parque automotor para cada categoría vial, con el fin de caracterizar la actividad vehicular, la cual fue distribuida al total de la malla vial empleando Polígonos de Thiessen segregados en tres categorías viales. Arrojando una actividad diaria promedio de todos los vehículos alrededor de los 3 millones de kilómetros recorridos.

Por otra parte, para la determinación de factores de emisión fue empleado el software *COPERT 5.5*, al cual le fueron ingresadas variables ambientales y de tráfico propias de Yumbo, obteniendo factores de emisión (gramos del contaminante c por kilómetro recorrido) para los contaminantes evaluados en las categorías vehiculares: (Particulares, Motos, Taxis, Buses y Camiones)

La estimación de las emisiones totales diarias se obtuvo del producto de los kilómetros recorridos por tipología vehicular y el factor de emisión para cada contaminante evaluado (BC, CH₄, CO, CO₂, N₂O, NO₂, NO_x PM_{2.5}, PM₁₀, SO₂, COV y COVNM), posteriormente se realizó la expansión mensual definiendo el número de días de cada tipo en el mes de noviembre, y finalmente se estimó la emisión anual a partir del factor de relación de ventas totales de combustibles de cada mes del año con respecto al mes de noviembre.

La estimación Botton-up permitió obtener para el municipio de Palmira, las emisiones vehiculares anuales de CO₂ (214,413 toneladas), PM₁₀ (125 toneladas) y CO (10,086 toneladas).

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial la contaminación del aire representa uno de los mayores riesgos para la salud humana y en el año 2017 de acuerdo con el informe “State of Global Air/2019” fue la quinta causa de mortalidad con 4,9 millones muertes, siendo el material particulado fino (PM_{2.5}), el contaminante criterio que causó mayores pérdidas de vida con 2.9 millones. Los principales efectos negativos en la salud de las personas están relacionados con la disminución de la función pulmonar y afectación del sistema cardiovascular y los más afecta

dos son los receptores sensibles (niños y adultos mayores) que han estado expuestos por periodos prolongados a concentraciones que exceden los límites máximos permisibles en el aire, con periodos prolongados de exposición (HEI – IHME, 2019).

La Organización Mundial de la Salud – OMS con el fin de reducir a nivel mundial los efectos en la salud humana por la exposición a respirar material particulado, estableció como directriz de calidad del aire el valor de 10 µg/m³ como el nivel máximo de PM_{2.5} con el cual se ha demostrado (95% de confianza) una gran disminución de la mortalidad total, específicamente el cáncer de pulmón y afectación cardiopulmonar (OMS, 2005), sin embargo, en el año 2017 a nivel mundial, el 95% de la población vive en ciudades con concentraciones de PM_{2.5} mayores a este nivel (HEI – IHME, 2019).

En el año 2017, en el marco de la Política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire en Colombia, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, presentó la “*Guía para la Elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas*”, como un documento de referencia que incluye los criterios técnicos para determinar las emisiones asociadas a diferentes tipos de fuentes en un área geográfica y en un intervalo de tiempo. El resultado del inventario de emisiones atmosféricas (IEA) constituye un conjunto de datos que caracterizan las emisiones y consolidan la sumatoria de los contaminantes (ton/año) de acuerdo con el tipo de fuente.

En el Valle del Cauca, la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca – CVC además de realizar el monitoreo de la calidad del aire en áreas priorizadas industriales y urbanas de algunos municipios a través de su Sistema de Vigilancia de Calidad del Aire (SVCA), en su Plan de Acción de la CVC 2020-2023, priorizó la elaboración de inventarios detallados de las emisiones contaminantes al aire en el municipio de Yumbo. El desarrollo de estos inventarios además de contribuir con la Gestión de la Calidad del Aire en el departamento, se constituyen en una herramienta técnica que permitirá la definición de estrategias de reducción de las emisiones contaminantes.

En este sentido, mediante Convenio Interadministrativo CVC-UNAL 036 de 2021, cuyo objeto contractual es “aunar esfuerzos técnicos, y recursos económicos para contribuir a la gestión y planificación del recurso aire en el Departamento del Valle del Cauca, orientado a la prevención, reducción y control de la contaminación del aire en centros poblados ubicados en el área de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca - CVC”, específicamente el Proyecto 4001 Resultado 1 Actividad 16 se orientará al desarrollo de los Inventarios de emisiones a la atmósfera (fuentes fijas y móviles) en los en los municipios de Palmira y Yumbo.

Este documento presenta el “Inventario de Emisiones a la Atmósfera por Fuentes Móviles para el Municipio de Yumbo – Año Base 2021” desarrollado por la Universidad Nacional de Colombia. En el desarrollo del inventario de fuentes móviles se tuvieron en cuenta dos aproximaciones: i) la estimación Top-Down, basada en las ventas de combustible, el registro vehicular y las actividades vehiculares provenientes de los Centros de Diagnóstico Automotriz - CDA agregadas por tipo de vehículo, adicionalmente, incluye el análisis de la información disponible en el RUNT, SICOM y Secretarías de Tránsito Municipal y ii) una aproximación Bottom-up que establece de manera detallada las emisiones de contaminantes atmosféricos basados en datos de tráfico vehicular, a partir de aforos vehiculares en sitios priorizados representativos de la malla vial del Municipio de Yumbo y factores de emisión obtenidos a partir de COPERT 5.5. El desarrollo del proyecto se enmarca en los siguientes objetivos:

OBJETIVO GENERAL

Elaborar el inventario de emisiones a la atmósfera por fuentes móviles para el Municipio de Yumbo – Año Base 2021, incluye contaminantes criterio y gases de efecto invernadero (GEI)

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar la estimación Top-Down de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles en el Municipio de Yumbo, incluye el análisis comparativo de las ventas de combustibles con el consumo de combustible del parque automotor basados en los factores de actividad obtenidos en los CDA
- Realizar la estimación Bottom-up de las emisiones de contaminantes atmosféricos provenientes de fuentes móviles, incluye el análisis de la actividad vehicular en la malla vial a partir de aforos vehiculares y el uso de factores de emisión utilizando COPERT 5.5.

1. MARCO DE REFERENCIA

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

1.1.1. Municipio de Yumbo - Valle del Cauca

El municipio de Yumbo está localizado en el suroccidente del Valle del Cauca a 1,021 msnm y tiene un área total de 228 km² (**Figura 1**). Se estima que para el año 2021 la población fue de 110,683 habitantes, de los cuales el 86.5% habitan en la zona urbana y el 13.5% en la zona rural (Yumbo cómo vamos, 2021). El municipio presenta condiciones de temperatura promedio de 24 °C, y una precipitación anual de 972 mm, con un régimen bimodal de lluvias en los meses de marzo a mayo y septiembre – noviembre (CVC, 2010). Limita al sur con Santiago de Cali, al norte con el municipio de Vijes, por el oriente con el municipio de Palmira y al occidente en el municipio de la Cumbre y la cordillera Occidental.

El municipio de Yumbo es considerado como la capital industrial del Valle del Cauca debido a su desarrollo empresarial que ha venido creciendo desde hace más de 50 años, donde se asentaron inicialmente industrias dedicadas a la fabricación de cemento, papel, cartón, metalúrgicas, entre otras. Dado el gran desarrollo industrial del municipio, y la necesidad de trabajadores, constantemente las personas se trasladan desde Cali, Palmira y otros municipios aledaños a cumplir con su horario laboral. También, existe una actividad considerable de vehículos de carga por las vías del municipio no solo por su vocación industrial sino también por su cercanía con el Puerto de Buenaventura, el más importante puerto de Colombia sobre el océano Pacífico. Además del flujo vial intermunicipal y el transporte de carga, se suman los 22919 vehículos que se encuentran matriculados en el municipio según el RUNT y la secretaria de tránsito y transporte. De los cuales, gran parte son motos (14227) y vehículos livianos (6659). No obstante, dada la conectividad con otros municipios como Cali, Buenaventura y Palmira es probable que el parque automotor circulante dentro del municipio sea mayor.

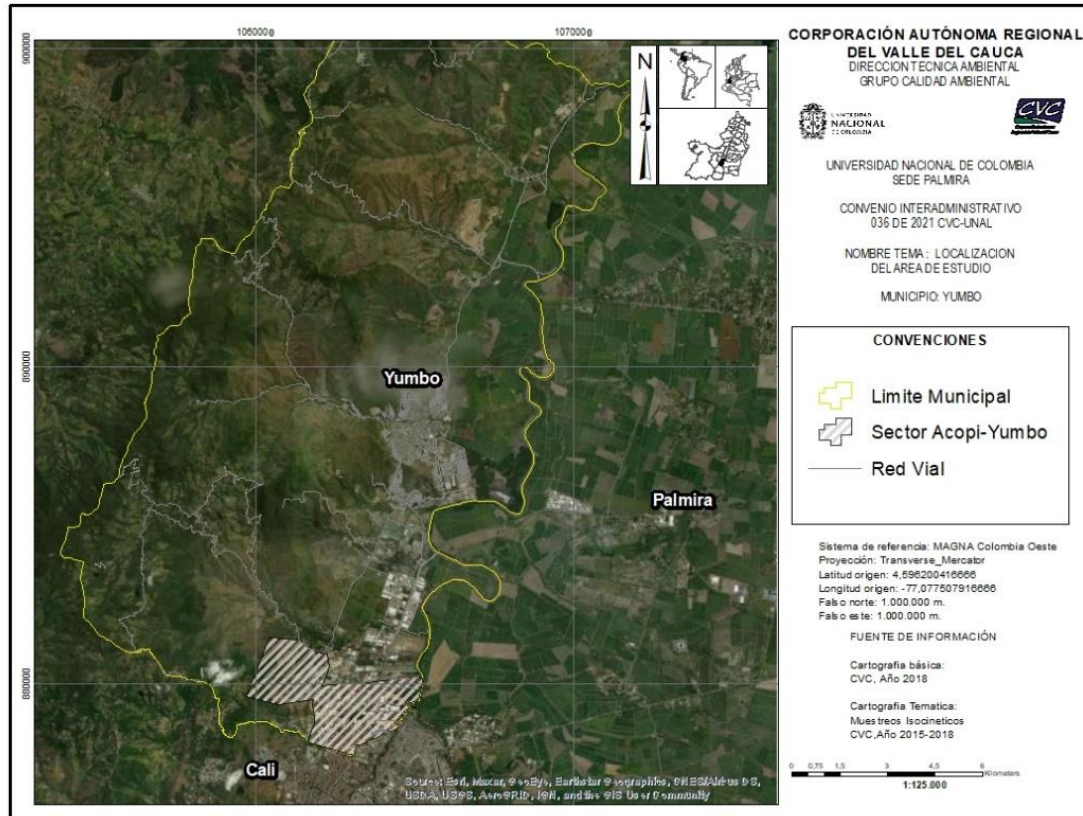


Figura 1. Localización del municipio de Yumbo, Valle del Cauca.

Fuente: Elaboración propia.

1.2 INVENTARIO DE EMISIONES DE FUENTES MÓVILES

Es una herramienta cuantitativa que representa las emisiones contaminantes producidas por la actividad vehicular en un área delimitada. Permite generar un conjunto de datos que caracterizan las emisiones de contaminantes atmosféricos, de acuerdo con el tipo de fuente y contaminantes emitidos. Son empleados durante el proceso de planeación y la gestión de la calidad del aire del lugar de estudio, dado que, proporciona una visión general de posibles causas de no cumplimiento con las normas de calidad del aire e información clave para los modelos de calidad de aire (Instituto Nacional de Ecología, 2005).

1.2.1 Estimación de emisiones por fuentes móviles en ruta

La **Ecuación 1** muestra la fórmula general para la estimación de emisiones vehiculares.

$$E_{ij} = FE_{i,j} \times FA_j \times N_{veh,j} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

E_{ij} es la emisión del contaminante i para cada categoría vehicular j .

$FE_{i,j}$, son los factores de emisión ajustados a condiciones locales.

FA_j , es el factor de actividad vehicular.

$N_{veh,j}$, es el número total de vehículos de cada categoría vehicular j .

1.2.2 Factor de emisión

Es un valor representativo que relaciona la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la emisión del contaminante que generalmente corresponde al consumo de combustible y/o kilómetros recorridos.

1.2.3 Factor de actividad

El factor de actividad se refiere al dato que contiene la información sobre la magnitud de la actividad generadora de la emisión y se relacionan al consumo de combustible y kilómetros recorridos, estos provienen de datos estadísticos locales y oficiales.

1.2.4 Modelos de emisiones vehiculares

Los modelos han sido desarrollados debido a la necesidad y la alta complejidad de estimación de este tipo de emisiones, ya que la estimación involucra diferentes tipos de emisiones y están en función de diversas características de los vehículos que transitan en cada zona de estudio (tipo de vehículo, año y modelo del vehículo, tecnología vehicular, combustible, kilometraje recorrido, ciclos de conducción, entre otros).

Existen diferentes modelos computacionales de emisiones vehiculares como MOVES (Motor Vehicle Emission Simulator), IVE (International Vehicle Emissions Model) y COPERT (International Vehicle Emissions Model) que permiten la estimación de factores de emisión y en algunos casos emisiones. Estos modelos han sido desarrollados bajo condiciones específicas de un área de estudio, sin embargo, permiten ser aplicados para otras zonas de estudio bajo el ajuste de diferentes parámetros relacionados con el parque automotor, combustibles, entre otros. Todos los modelos difieren principalmente en el tipo y cantidad de información de entrada, contaminantes estimados, las tecnologías vehiculares que contienen y tipo de corrección y/o ajuste. A continuación, se describe el modelo COPERT que será utilizado en la estimación del inventario para el municipio de Yumbo, el cual es ampliamente utilizado en ciudades latinoamericanas, y que permite hacer adaptaciones de variables climáticas, tráfico y topografía de la zona en que se está aplicando.

- **COPERT:** Es un modelo desarrollado en Microsoft Windows por la Agencia Europea de Medio Ambiente (EEA) y EMISIA, que presenta actualizaciones periódicas en los factores de emisión y disponibilidad en tecnologías vehiculares (última actualización año 2021). El modelo fue desarrollado inicialmente para condiciones de la Unión Europea, sin embargo, se presenta una versión diferente para uso en otros países.

Cabe destacar que el presente modelo a diferencia de otros permite estimar tanto factores de emisión como emisiones, estas últimas incluyen emisiones asociadas al tubo de escape, evaporativas y no exhosto. Los factores de emisión están en función de la velocidad promedio vehicular. Otros parámetros para el ajuste a condiciones locales involucran las características del parque automotor, actividad vehicular, distribución horaria, características del combustible y condiciones meteorológicas. Incluye la estimación de contaminantes criterio, gases de efecto invernadero y COV, COVNM, BC, PM_{2.5} y metales pesados.

2. INVENTARIO DE FUENTES MÓVILES

2.1 ENFOQUE METODOLÓGICO

El desarrollo del “*Inventario de emisiones por fuentes móviles en el Municipio de Yumbo*” incluyó la estimación y análisis de las emisiones asociadas a la actividad vehicular a partir de: i) la comparación de las ventas de combustibles con las estimaciones de consumo de combustible basados en el parque automotor y factores de actividad obtenidos a partir de la información de los CDA (enfoque Top Down) , ii) la estimación de las emisiones de CO₂ basados en las ventas y estimaciones del enfoque Top-Down iii) las estimaciones de las emisiones de contaminantes a partir del enfoque Bottom-up que incluye el análisis de la actividad vehicular en la malla vial a partir de aforos vehiculares y el uso de factores de emisión utilizando COPERT 5.5. Estos tres componentes se presentan en las secciones **2.2, 2.3 y 2.4** de este documento.

Las estimaciones de emisiones por fuentes móviles en ruta (emisiones asociadas al tubo de escape y evaporativas), para el municipio de Yumbo, tal y como se mencionó anteriormente, se realizó a partir del enfoque Top-Down y Bottom-Up. En la **Figura 2** se presenta el esquema metodológico para la estimación de las emisiones para los dos enfoques. La estimación de emisiones a partir del enfoque Botton-up se realizará utilizando la **Ecuación 1** descrita en el ítem 1.2.1.

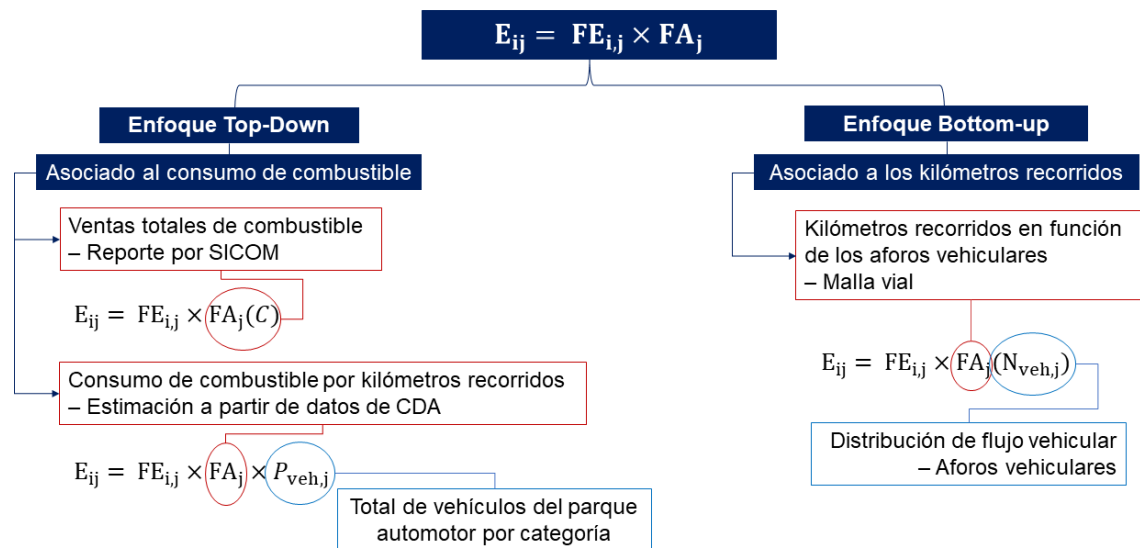


Figura 2. Esquema metodológico de estimación de emisiones por enfoque Top-Down y Bottom-Up.

Fuente: Elaboración Propia.

La estimación del factor de actividad en función de los aforos vehiculares, para el enfoque Bottom-Up, empleó distribución del flujo vehicular utilizando polígonos de Thiessen, los cuales permiten tener un área de influencia para una característica determinada, en este caso el flujo vehicular para la malla vial. En la **Figura 3**, se presenta la transformación de los aforos vehiculares en kilómetros recorridos a través de la malla vial por categoría vehicular. Se aclara que este proceso se realiza para cada hora en los días evaluados y para cada categoría vehicular.

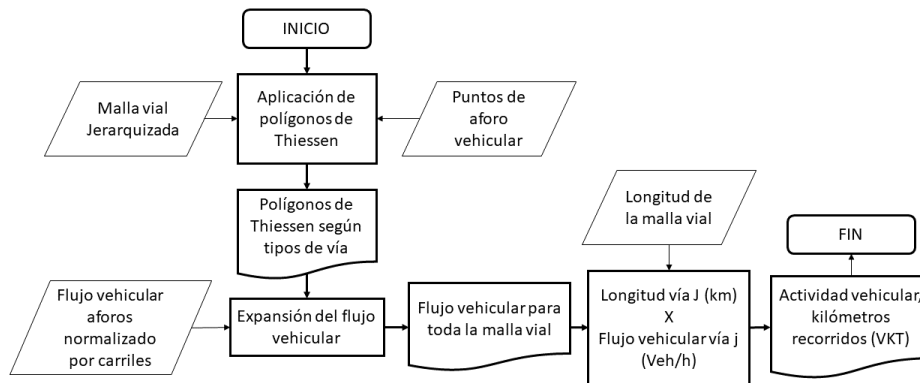


Figura 3. Flujograma para la estimación de flujo vehicular en la malla vial usando polígonos de Thiessen

Fuente: Elaboración propia

En cuanto a los factores de emisión del enfoque Bottom-Up, fueron obtenidos mediante el Software *COPERT 5.5*, el cual permite adaptar las características ambientales, de combustibles, tráfico, entre otras a las condiciones propias del municipio de Yumbo y de esta forma tener una mejor aproximación a las condiciones reales de emisión. Este proceso se describe en la sección 2.4.2 del presente informe.

2.2 ANÁLISIS COMPARATIVO DE VENTAS Y CONSUMO ESTIMADO DE COMBUSTIBLE

La estimación del consumo de combustible usando parámetros agregados del parque automotor y de la actividad vehicular, y su contraste con las ventas de combustible en el municipio, sirve como punto de partida para entender las dinámicas de los sistemas de transporte y el mercado del combustible en el municipio, las cuales están relacionadas con las emisiones del área. Suponiendo que los vehículos registrados en un municipio operan y compran sus combustibles en el mismo municipio, se esperaría que el consumo estimado a partir del parque automotor y su actividad se acercara a las cifras de ventas de combustibles. Sin embargo, existen dinámicas de escala metropolitana, regional y nacional que influyen de manera importante, tanto en las cifras de ventas de combustibles, como en consumo real. Por ejemplo, la flota que circula en un municipio como Yumbo, puede no estar registrada en el mismo municipio, o los vehículos de carga, que van de paso por la región pueden comprar sus combustibles en Yumbo. Pese a lo anterior, el análisis comparativo de ventas y consumos estimados de gasolina y diésel fue llevado a cabo para

la comprensión y referencia, que se utilizan para contrastar las emisiones estimadas por el método Bottom-up.

2.2.1 Ventas de combustibles líquidos y gaseosos

Las series temporales de venta de combustibles líquidos para el municipio de Yumbo reportados por SICOM entre el 2013 y 2021 se presentan en la **Figura 4**. Se ve reflejado un comportamiento relativamente similar entre las ventas de Diésel y las ventas de gasolina corriente. Así mismo, se puede apreciar que las ventas de estos dos combustibles fueron estables hasta el año 2019, es decir que las variaciones año a año en estos combustibles son pequeñas. Por otro lado, las ventas de gasolina extra tienen un alza entre 2013-2014 y tienden a estabilizarse entre los años 2015-2017, para posteriormente disminuir sus ventas entre los años 2017-2018 y nuevamente en el año 2020. Es de considerar que, la disminución de las ventas en el año 2020 en los 3 combustibles se debió probablemente a las medidas implementadas por el virus SARS-CoV2 (Covid 19).

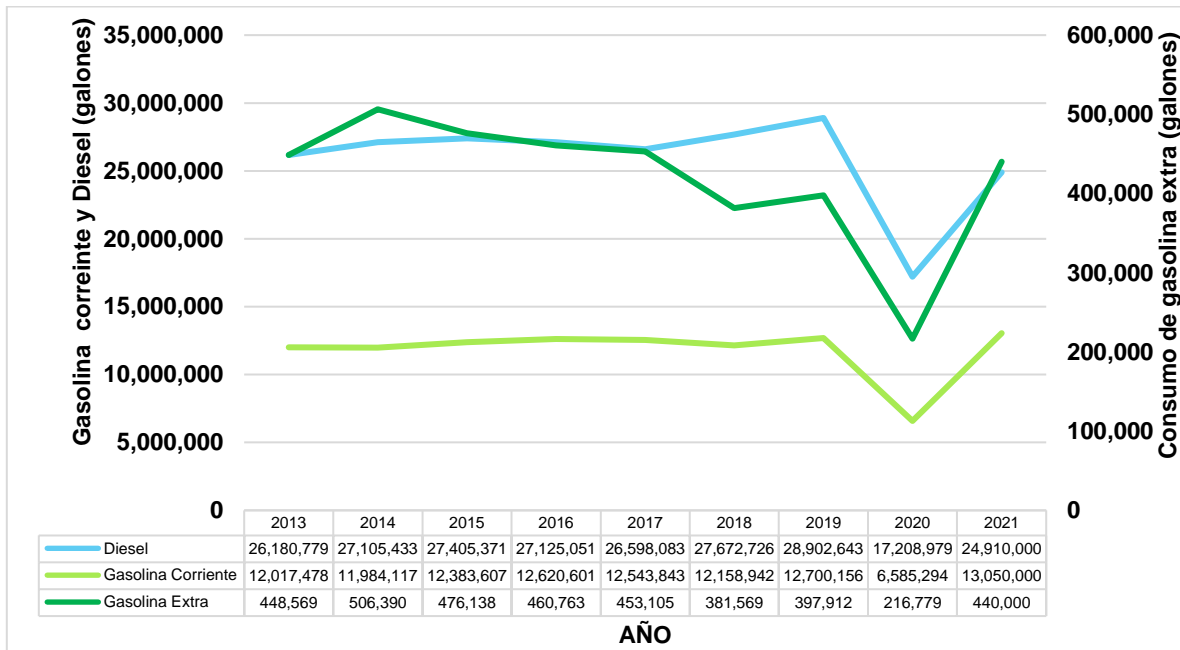


Figura 4. Serie temporal de ventas de combustible líquidos reportados por el SICOM para Yumbo.

2.2.2 Parque Automotor ($N_{VEH,J}$)

El parque automotor de Yumbo se analizó considerando los datos reportados por el Registro Único Nacional de Tránsito - RUNT para el año 2018. Las categorías vehiculares fueron definidas como se muestra a continuación:

- Vehículo Particular: automóvil particular, campero y camioneta.
- Taxi: automóvil público.
- Motocicleta: moto, motocicleta, motocarro y cuatrimoto.

- Bus: microbús, buseta y bus.
- Vehículos de Carga: volqueta, tractocamión y camión.

Según la distribución porcentual de la flota vehicular, los vehículos de transporte particular y motocicletas en Yumbo, representan el 85.3% del total del parque automotor registrado en el municipio, mientras que los buses y vehículos de carga el 8.9%, en el caso de los taxis el porcentaje corresponde al 5.8%, como se observa en la **Figura 5**.

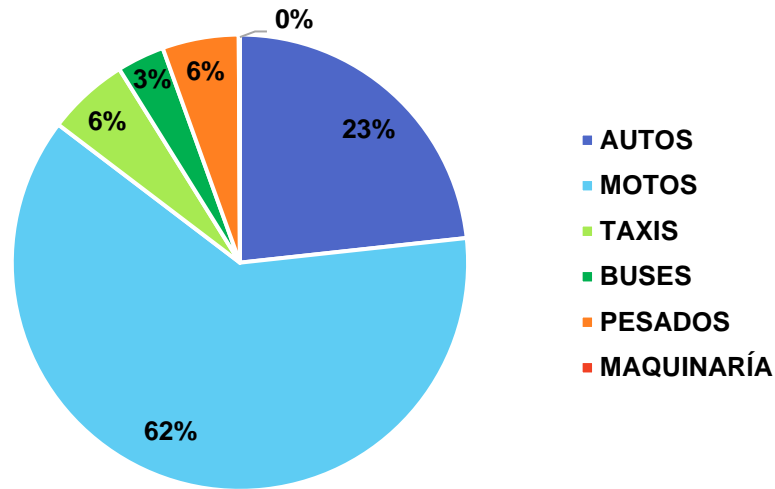


Figura 5. Distribución del parque automotor registrado en Yumbo agrupado por categoría vehicular según datos reportados por el RUNT.

En cuanto al combustible usado por los automotores registrados en Yumbo, según el RUNT, el 84.52% de los vehículos utilizan gasolina en el proceso de combustión, seguido del diésel con un 13.28% de participación. Los vehículos que más funcionan a gasolina son las motos (99.92% usan gasolina), los vehículos particulares (79.10%) y taxis (47.09%). Por otro lado, los vehículos de carga y buses tienden a usar diésel para su funcionamiento (81.79% y 78.14% respectivamente). Mientras que el GNV es utilizado tanto por vehículos pesados como los vehículos tipo taxi y particulares (**Figura 6**).

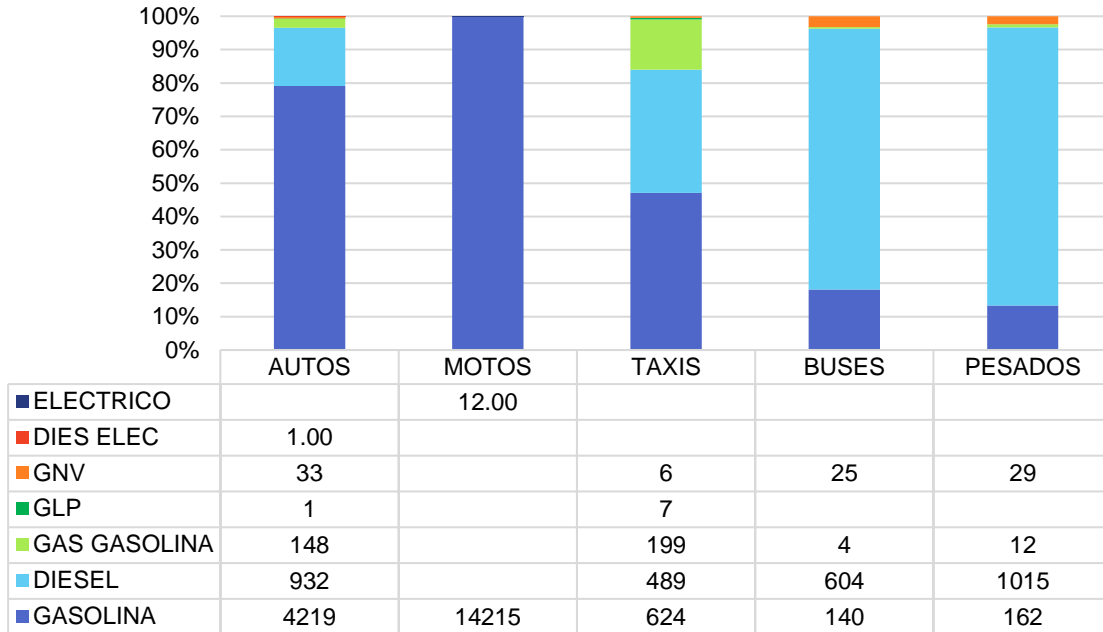


Figura 6. Distribución de uso de combustible por categoría vehicular para el municipio de Yumbo, según datos reportados por el RUNT.

Fuente: Elaboración propia

2.2.3 Factor de actividad vehicular

Los Centros de Diagnóstico Automotriz (CDA) son entidades, tanto públicas como privadas, responsables de la revisión técnico-mecánica de vehículos automotores y la revisión del control de emisiones al ambiente conforme a las normas (Artículo 53 de la Ley 729 de 2002). Los vehículos de servicio particular sin incluir motocicletas deben efectuar la primera revisión a partir del sexto año contado desde la fecha de su matrícula; los vehículos de servicio público, motocicletas y similares deben realizar la primera revisión al cumplir dos años de su fecha de matrícula (Artículo 13 de la Ley 1383 de 2010).

La revisión tecno-mecánica debe incluir el registro de la lectura del odómetro (contador de kilometraje) del vehículo. Esta información permite estimar la actividad vehicular, es decir, los kilómetros recorridos anuales de los vehículos que realizan su procedimiento de revisión técnico-mecánica en los CDA. Sin embargo, no todos los CDA registran apropiadamente las lecturas de odómetro, por lo que las bases de datos suministradas requieren un análisis estadístico riguroso, para extraer información válida que permita la obtención de la actividad vehicular. La información disponible después de una depuración cuidadosa permitió estimar la actividad [km/día] de una muestra importante de automotores en el municipio de Yumbo. A partir de esta muestra fue posible estimar valores estadísticamente representativos de la actividad vehicular promedio [km vehículo⁻¹ día⁻¹] para las diferentes categorías vehiculares.

Con el apoyo de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC) se realizó la solicitud de información de registros en 3 CDA ubicados en el municipio de Palmira, de

estos, 3 enviaron bases de datos de los registros con la siguiente información: fecha en la de revisión técnico-mecánica del automotor; placa; marca; línea de vehículo; modelo; tipo de vehículo; tipo de combustible; tipo de servicio; cilindraje; tipo de motor; kilometraje. Las bases de datos incluían revisiones tecno-mecánicas realizadas entre 2015 y 2019.

El procesamiento de los datos incluyó las siguientes etapas: 1) reagrupación de categorías vehiculares; 2) construcción de una base de datos unificada y 3) depuración de datos atípicos y 4) test de hipótesis. Este procesamiento se realizó usando el software estadístico *Rstudio* (R Core Team, 2020). A continuación, se describen las principales actividades y resultados obtenidos de la información de los CDA, para la caracterización de la actividad vehicular.

2.2.4 Agrupación por categoría vehicular

Las bases de datos de los CDA reportan las siguientes categorías de vehículos, según tipo y servicios: automóvil particular, campero, camioneta, automóvil público, moto, motocicleta, motocarro, microbús, buseta, bus, volqueta, tractocamión y camión. Estas categorías fueron reagrupadas según las 5 categorías estudiadas (Vehículo particular, Taxi, Motocicleta, Bus, Vehículos de carga). A partir de la reagrupación se realizó la identificación de placas con más de un registro de odómetro y de datos anómalos.

2.2.4.1 Construcción de bases de datos unificada

De acuerdo con lo establecido en Ley 1383 de 2010, a partir del sexto y segundo año dependiendo de la categoría vehicular, las revisiones técnico-mecánicas vehiculares deben realizarse cada año. Por lo tanto, en una base de datos multianual de múltiples CDA, es posible encontrar múltiples registros de un mismo vehículo identificado por su placa, es decir de diferentes años en uno o varios CDA. También debiera ser frecuente encontrar que, al realizarse una revisión, el automotor en primera instancia no obtenga el certificado de funcionamiento, pero que, una vez realizados los ajustes técnicos y mecánicos, poco tiempo después (horas o días), el automotor reingrese al CDA y obtenga el certificado. Esta nueva evaluación debería generar una segunda entrada en la base de datos.

En concordancia con el objetivo de este análisis, a los vehículos con múltiples reportes en un corto periodo de tiempo (horas o días), solo se tuvo en cuenta el primer reporte descartando los demás. De igual forma, al observar que los registros anuales presentaban algunas inconsistencias, como reportar el mismo kilometraje en diferentes años o menor kilometraje al reportado en años anteriores, se tomó como referencia el primer reporte para el vehículo.

Una vez realizada esa primera depuración, la actividad vehicular diaria se estimó mediante la relación entre el kilometraje reportado al momento de la revisión, la fecha del modelo del vehículo y la fecha de realización de la revisión (**Ecuación 2**).

$$AV \left[\frac{km}{día} \right] = \frac{Kilometraje [km]}{(Fecha\ revisión - Fecha\ modelo)} \quad \text{Ecuación 2}$$

2.2.4.2 Depuración de datos atípicos

Los datos atípicos son aquellos que se desvían del comportamiento esperado de un conjunto de datos, esta observación hace pensar que este fue generado por algún mecanismo diferente a los datos del conjunto. Estos datos tienen una gran influencia en la estadística del grupo, reduciendo capacidad de estimación del comportamiento estadístico de un grupo (ghorbani, 2019).

Los datos atípicos para cada categoría y CDA se identificaron a través de histogramas de frecuencias relativas y gráficos de cuantiles (qq plot en inglés) (Anexo A). Los histogramas nos permiten la concentración de los datos y el grado de dispersión de estos. Los qq plot nos permite visualizar las posibles diferencias del conjunto de datos con una función de distribución teórica, en este caso una función de distribución normal. Una vez identificados los valores que se alejan del comportamiento de la distribución normal, estos se eliminan considerando cuantiles e intervalos determinados en el diagrama de cuantiles. La actividad vehicular media [$\text{km vehículo}^{-1} \text{ día}^{-1}$] se representa en una escala logarítmica base 10 (\log_{10}), esta transformación permite observar de manera más clara si los datos se comportan de acuerdo con la distribución normal.

La **Figura 7** muestra a modo de ejemplo el proceso realizado para uno de los CDA (CDA Tecnicas) con todas las categorías vehiculares. El histograma de frecuencias relativas (Figura 6a) representa que los datos se concentran entre \log_{10}^1 y \log_{10}^3 , es decir, entre 10 y 1000 kilómetros día. El diagrama de cuantiles (Figura 6b) indica que los datos se comportan como una función de distribución normal, siendo las equis (“x”) azules las observaciones reportadas por el CDA y la línea punteada roja la función de distribución normal, entre -2 y +2 sigma desviaciones estándar (σ). Como regla general dentro de una función de distribución normal una sigma equivale al 68% de los datos, 2 sigma al 95% y 3 sigma al 99.7 %.

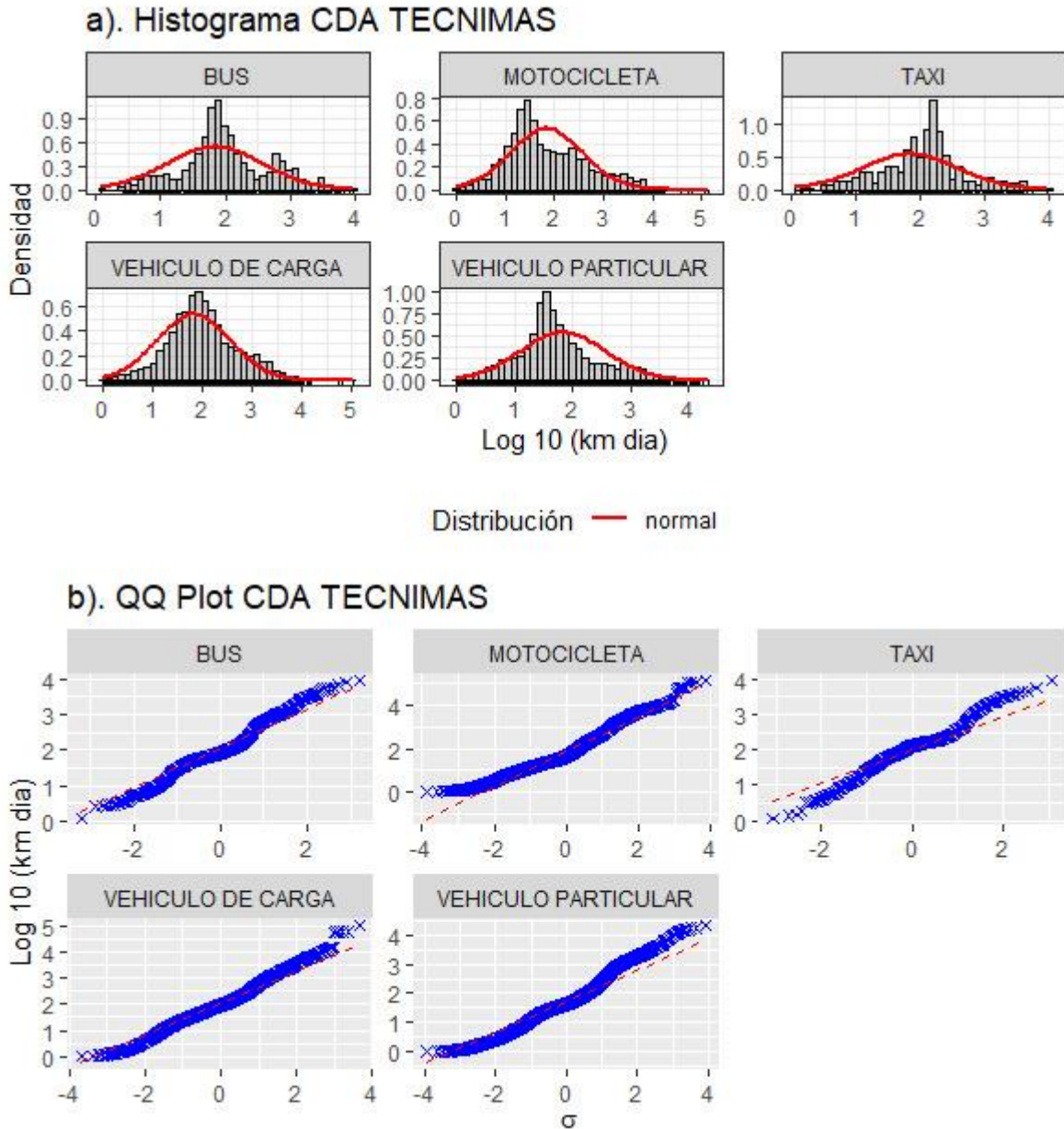


Figura 7. Histograma (a) y qq plot (b) para el CDA Tecnimas.

Fuente: Elaboración propia

De los CDA se recibieron alrededor de 90 mil registros (**Tabla 1**). Como resultado del proceso de depuración de datos se eliminaron alrededor del 72% de los datos, es decir, se obtuvieron aproximadamente 24 mil datos válidos, que se consideran una muestra suficiente de la que se pueden extraer actividades promedio estadísticamente válidas. Particularmente, el CDA ITAC no fue tenido en cuenta, dado que este CDA envió datos que no tenían la fecha de la revisión técnico-mecánica.

Tabla 1. Resumen del procesamiento de datos provenientes de los CDA de Yumbo.

Cantidad de datos registrados por CDA		
Tecnimas	Yumbo	ITAC*
33,891	10,589	45,966
Total = 90,446 datos registrados		
Cantidad de datos validos por CDA		
Tecnimas	Yumbo	ITAC*
18829	5752	0
24581		

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.4.3 Test de hipótesis

Una vez realizada la depuración de los datos, se aplicaron pruebas de hipótesis, para verificar si existen diferencias estadísticas entre las actividades vehiculares reportadas por los CDA en las diferentes categorías vehiculares, con la finalidad de hacer una estimación adecuada de la actividad vehicular diaria por categoría vehicular. Para esto se aplicó la prueba paramétrica t-student a cada categoría vehicular, la cual nos indica la diferencia significativa existente entre los datos y prueba la igualdad de medias. Se encontró que si hay diferencias significativas con valores de $p < 0.01$, y por tanto la actividad de cada categoría es independiente de las demás.

El procesamiento de los datos registrados por los CDA indica que los automotores que más kilómetros recorren por día son en su respectivo orden taxis, buses, vehículos de carga, vehículos particulares y motocicletas con 114, 99, 98, 45 y 34 km/día respectivamente (**Tabla 2**).

Tabla 2. Actividad vehicular diaria por cada categoría.

Categoría	Número de datos	Promedio km día ⁻¹	Desviación Estándar	Mediana	Máximo	Mínimo
Bus	531	99	139	83	641	10
Motocicleta	11,171	35	86	29	465	3
Taxi	352	114	72	135	374	26
Vehículo De Carga	2,937	98	118	94	573	25
Vehículo Particular	9,583	45	49	40	268	9
Total	24,574					

Fuente: Elaboración Propia.

Los datos obtenidos son comparables con los reportes de actividad registrados en otras regiones del país, tales como Palmira, Manizales y el Área Metropolitana del Valle de Aburra – AMVA (AMVA & UPB, 2019; Universidad Nacional de Colombia & Corpocaldas, 2019) (**Tabla 3 y Figura 8**) En áreas urbanas con mayor población se podría esperar que la actividad vehicular diaria sea mayor, debido principalmente al tamaño de los municipios, donde las distancias que deben recorrer sus habitantes para llegar a sus destinos a diario son generalmente mayores. Sin embargo, esta actividad obedece a patrones particulares de cada región.

Tabla 3. Actividad vehicular por día en Palmira, Yumbo, Manizales y AMVA

Categoría	Yumbo	Palmira	Manizales	AMVA
	km/día			
Bus	99	56	168	146
Motocicleta	35	25	23	56
Taxi	114	172	199	167
Vehículo De Carga	98	56	50	146
Vehículo Particular	45	36	25	40

Fuente: Elaboración Propia.

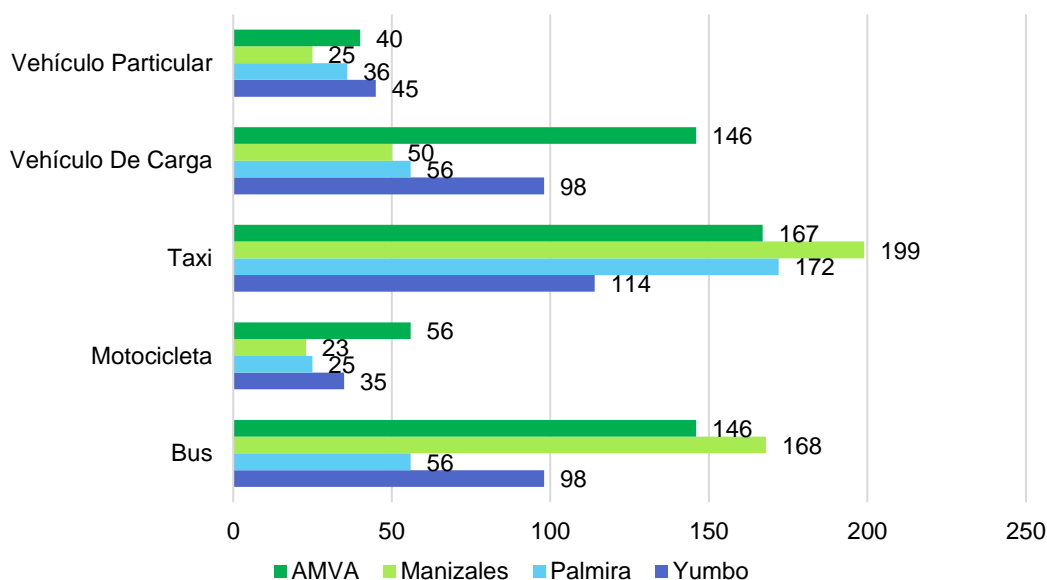


Figura 8. Actividad vehicular por día en Yumbo, Palmira, Manizales y AMVA

Fuente: Elaboración Propia.

El AMVA presenta 3.9 Millones de habitantes en comparación con los 450 mil habitantes de Manizales y conjuntamente de Palmira y Yumbo, en el 2018 (DANE, 2020). Por lo tanto, es el AMVA la región que presenta en general una mayor relación de kilómetros diarios, no obstante, Yumbo presenta actividades ligeramente mayores en cuanto a los vehículos particulares, teniendo alrededor de ocho veces menos habitantes que el AMVA. Esto probablemente debido a los patrones de tránsito intermunicipal que existe en la región conurbada (Cali, Palmira, Yumbo, Jamundí, Candelaria).

A partir de los datos de actividad vehicular aquí obtenidos para el municipio de Yumbo es posible estimar los consumos de combustible, y compararlos con los valores obtenidos del SICOM. Estos valores servirán de contraste en la estimación de actividad a partir de aforos vehiculares y factores de emisión COPERT, con los que finalmente se podrán estimar las emisiones debidas a fuentes móviles en el municipio de Yumbo.

2.2.5 Consumo de Combustibles (FA_j)

La estimación del consumo de combustible se determinó por dos métodos, el primero a través de la **Ecuación 2** donde se requiere la determinación de la actividad vehicular diaria de cada categoría vehicular (AV_j) y el segundo a través de las observaciones del reporte de las ventas de combustibles líquidos en el SICOM. De tal forma que se obtuvo dos acercamientos Top-down para la estimación de emisiones de CO₂ (**sección 2.3**) que se usará como referencia de contraste de las estimaciones Bottom-up (**sección 2.4**).

En la **Tabla 4** se puede observar que el consumo de gasolina estimado fue de 6,295,025.33 galones y corresponde en gran medida a la actividad de los automóviles particulares y motos. Por otro lado, el consumo calculado de diesel fue 14,434,201 galones y se debe a los camiones y buses. Finalmente, el consumo de GNV obtenido fue de 1,835,326.31m³ y está relacionado con la actividad de los taxis y buses.

Tabla 4. Consumo de combustible por tipo de combustible y categoría vehicular

Categoría vehicular	Combustible	Flota vehicular	Rendimiento (km/gal)	Actividad vehicular (km/(día veh))	Gasolina (galones)	Diesel (galones)	GNV (m ³)
Autos	Diesel	932	29	45.22		479,581	
	Gasolina	4219	22	45.22	3,165,266		
	GNV	181	12	45.22			225,083
Taxi	Diesel	489	65	114.17		283,440	
	Gasolina	624	50	114.17	520,067		
	GNV	205	13	114.17			594,123
Motos	Gasolina	14264	97	34.56	1,854,967		
Buses	Diesel	744	12	99.0		2,026,154	
	Gasolina		8	99.0	0		
	GNV	56	2	99.0			915,037
Camión	Diesel	1241	10	98.3		4,026,089	
	Gasolina		11	98.3	0		
	GNV		4	98.3			0
Estimado del consumo de combustibles por el sector agroindustrial					395,350	8,878,548	
TOTAL CONSUMO DE COMBUSTIBLE					5,935,651	15,693,813	1,734,243

Fuente: Elaboración Propia.

2.2.6 Comparación de ventas vs. consumo estimado de combustible

De acuerdo con la estimación de consumo de combustibles y las ventas reportadas, **Figura 9**, es apreciable la diferencia entre las ventas de gasolina y la estimación de consumo de gasolina asociado al parque automotor. En el municipio de Yumbo, las ventas reportadas por SICOM son más de 2 veces la estimación del consumo, de acuerdo con la actividad del parque automotor. Así mismo, para el combustible diesel y GNV se observa que Yumbo tiene unas ventas mayores que el consumo estimado para el parque automotor matriculado, en un 37% y 62% más, respectivamente. Esto sugiere que existe una actividad vehicular o

industrial que demandas combustibles que son vendidos en el municipio, pero probablemente se consume en el Departamento o a nivel nacional.

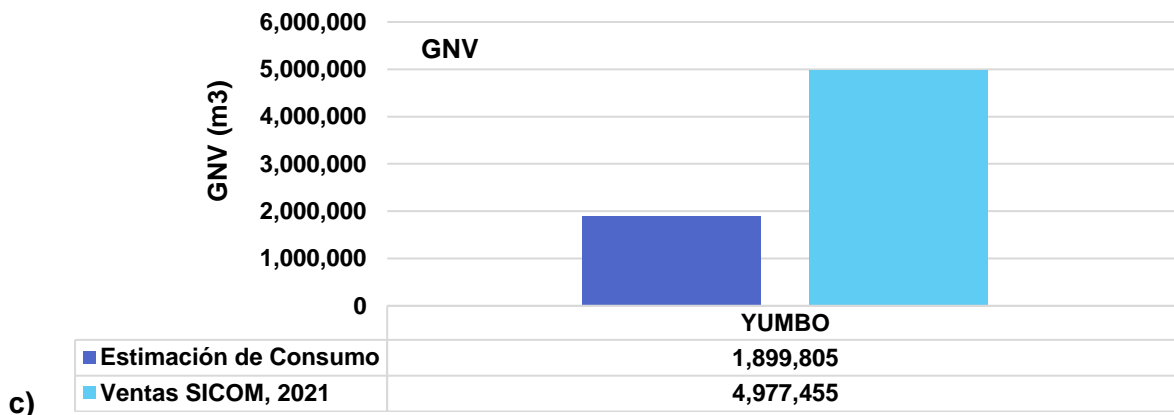
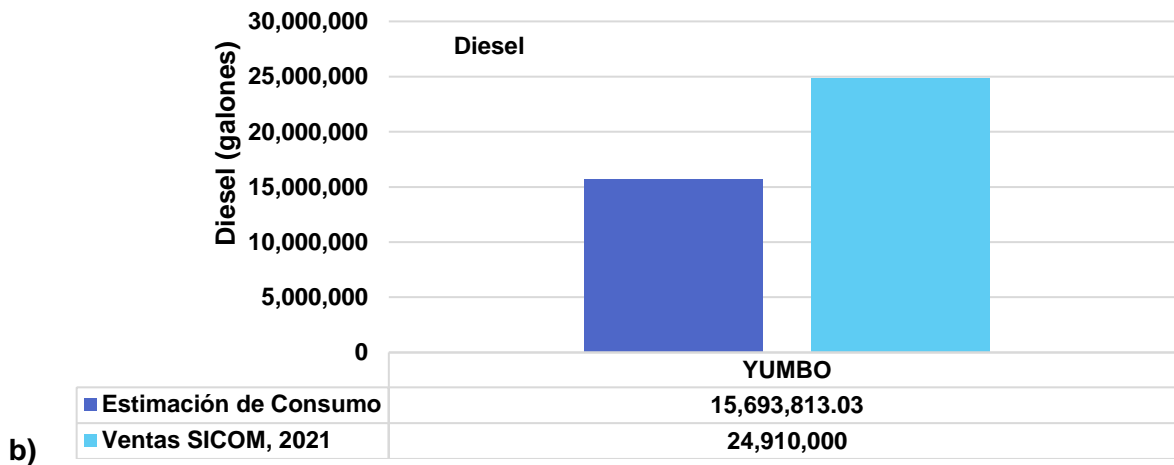
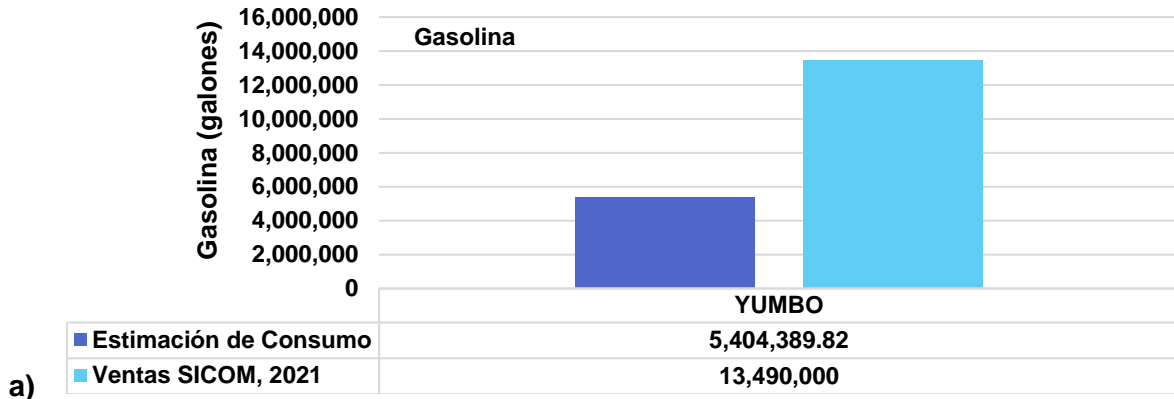


Figura 9. Comparativo entre la estimación de consumo y ventas según SICOM de a) gasolina y b) Diesel y c) GNV.

Fuente: Elaboración Propia.

2.3 ESTIMACIÓN TOP-DOWN DE EMISIONES DE CO₂

La estimación de emisiones vehiculares a través del enfoque Top-Down utiliza información global del municipio, parque automotor, actividad vehicular, y factores de emisión agregado por tipología de vehículos. Esta estimación busca tener una cifra de las emisiones de CO₂, y determinar la coherencia de las emisiones obtenidas por el enfoque Bottom-up. Para esto, se ha estimado las emisiones de CO₂ por el enfoque Top-Down, las cuales serán la referencia para el contraste del inventario por enfoque Bottom-up.

La estimación de emisiones de CO₂ se determinó a partir de la **Ecuación 3**

$$E_{CO_2j} = \sum_k FE_{CO_2k} * FA_{jk} * N_{vehjk} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

E_{CO_2j} sumatoria de emisiones de CO₂ por cada combustible k y cada categoría j (t año⁻¹)

FE_{CO_2k} , factor de emisión del contaminante CO₂ por cada tipo de combustible k (g km⁻¹ veh⁻¹)

FA_{jk} factor de actividad (consumo de combustible) de cada combustible k por cada vehículo j (galones vehiculo⁻¹)

N_{vehjk} número de vehículos existentes en la categoría j que consumen el combustible k

Para el cálculo del Factor de actividad (FA_{jk}) se aplicó la siguiente ecuación:

$$FA_{jk} = (AV_j * 330) * \frac{1}{Rend_{kj}} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde,

FA_{jk} , consumo del combustible k por cada vehículo de la categoría j (galones vehiculo⁻¹)

AV_j , actividad vehicular diaria de cada categoría j (km vehiculo⁻¹ día⁻¹)

$Rend_{kj}$, rendimiento del combustible k para cada categoría j (km gal⁻¹)

330 es el factor de expansión anual de la actividad vehicular

Por otra parte, se utilizó el factor de emisión CO₂ de cada combustible, reportados por la UPME, 2016 (**Tabla 5**)

Tabla 5. Factores de emisión para el inventario de emisiones por fuentes móviles del municipio de Yumbo, de acuerdo con la UPME.

FE [kg CO ₂ /gal]	Gasolina Corriente	Gasolina Extra	ACPM / DIESEL (BIODIESEL)
		8.809	8.809

Fuente: UPME, 2016

Aplicando la **Ecuación 1**, se calcularon las emisiones de CO₂ tanto para el consumo de combustibles estimado (**Tabla 6**), como para las ventas reportadas por el SICOM (**Tabla 7**).

Tabla 6. Emisiones de CO₂ por tipo de combustible de acuerdo con el consumo estimado del parque automotor registrado en Yumbo.

Variable	Gasolina (gal)	Diesel (gal)	Gas natural (m ³)
Consumo	5,003,278	6,815,265	1,293,064
Factor de Emisión (kg CO ₂ /gal, líquidos) y (kgCO ₂ /m ³ st, GNV)	8.809	10.149	2.179
TOTAL CO ₂ (kg)	44,071,372	69,168,124	2,817,458
TOTAL CO ₂ (t año ⁻¹)	116,057		

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 7. Emisiones de CO₂ por tipo de combustible de acuerdo con el consumo reportado por el SICOM en Yumbo.

Variable	Gasolina (gal)	Diesel (gal)	Gas natural (m ³)
Consumo	13,094,650	16,031,452	4,977,455
Factor de Emisión [kg CO ₂ /gal, líquidos] y [kgCO ₂ / m ³ st, GNV]	8.809	10.149	2.179
TOTAL CO ₂ [kg]	115,344,225	162,703,206	10,845,377
TOTAL CO ₂ [t año ⁻¹]	288,893		

Fuente: Elaboración Propia.

De acuerdo con la estimación Top-Down de las emisiones de CO₂ tanto por el consumo estimado de combustibles y las ventas de combustibles reportadas por SICOM, la combustión del Diesel es el mayor emisor de CO₂, seguido de la gasolina y el GNV. No obstante, ambas aproximaciones presentan una diferencia sustancial en las toneladas de CO₂ emitidas a la atmósfera, ya que la aproximación por la estimación de consumo es cerca del 40.2% de la aproximación por las ventas de SICOM.

2.4 ESTIMACIÓN BOTTON-UP

La estimación de emisiones por el enfoque Bottom-Up, permite un análisis detallado de las emisiones vehiculares a partir de datos locales de alta resolución o con mayor nivel de detalle de: los factores de emisión, flujos vehiculares, longitud de la malla vial y/o perfiles de tráfico. Para este inventario se estimaron emisiones por contaminante y categoría vehicular aplicando la ecuación:

$$E_i = FE_{ij} * F_{jk} * L_k \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde,

E_i , es la emisión del contaminante (i)

FE_{ij} , es el factor de emisión del contaminante (i) para la categoría vehicular (j)

F_{jk} , es el flujo vehicular de la categoría vehicular (j) en la vía tipo (k)

L_k , es la longitud de la vía tipo k

2.4.1 Actividad vehicular

2.4.1.1 Velocidad promedio en la malla vial

Uno de los parámetros de entrada (Input) requeridos por el software COPERT 5.5 es la velocidad relacionada a distintos tramos y aspectos de la malla vial. Esta velocidad puede ser solicitada de manera general, por tipología de vía o por hora pico y valle.

Los tramos que fueron seleccionados para la captura de información de velocidades a través de la API Google Maps, son aquellos que pasan por los puntos en donde se realizaron los aforos CVC-UNAL 2021 (**Figura 10**). Puesto que en la definición de estos fueron tenidas en cuenta características como la tipología vial, lo que garantiza representatividad de la malla vial del municipio de Yumbo.

Estas velocidades se capturaron con una frecuencia de 30 minutos en un rango horario comprendido entre las 6:00 am y las 12:00 pm de los días sábado, domingo, lunes y martes. Dicha franja incluye variaciones en el flujo vehicular abarcando así las mencionadas horas pico y horas valle, por otro lado, la captura de información en diferentes días permite obtener datos que incluyan las variaciones en las velocidades generadas por la dinámica semanal del municipio.

Posterior a la recolección de información, se analizaron los datos de manera que se obtuvo el promedio por tramo vial, por punto y por tipología de vía tanto para las horas valle como para las horas pico, tal y como se muestra en la **Tabla 8**.

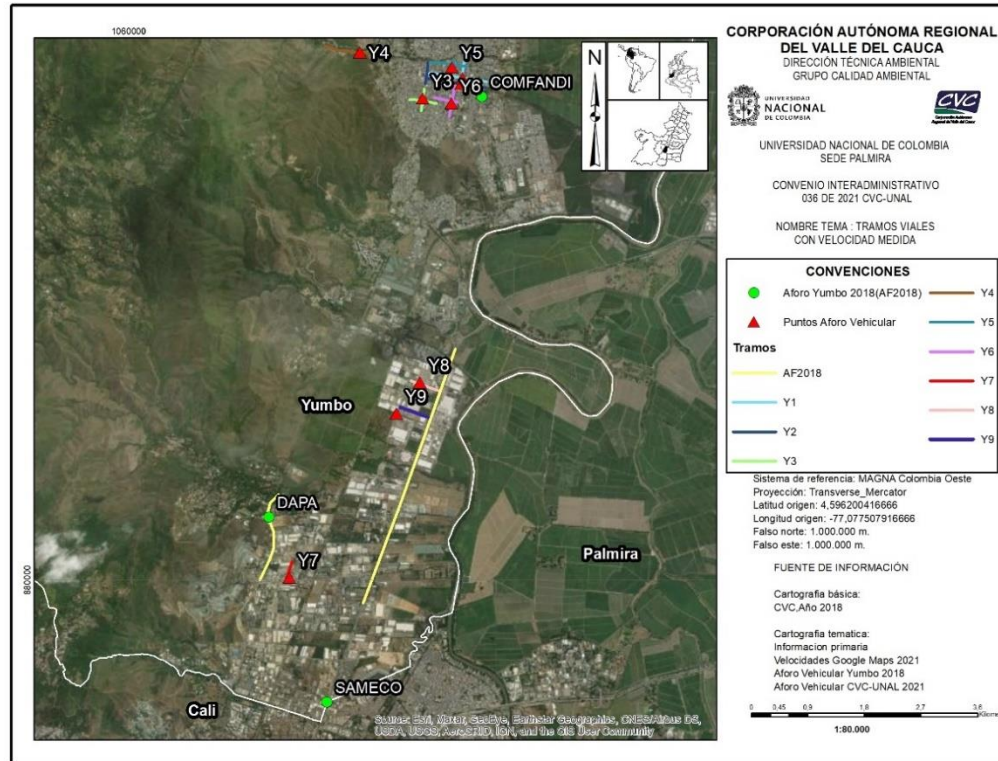


Figura 10. Tramos viales con velocidad promedio medida en el municipio de Yumbo.

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 8. Velocidades promedio de la malla vial del municipio de Yumbo en horas valle.

Vías urbanas velocidad promedio hora valle (km/h)				
Punto de aforo	Tramo	Velocidad (km/h)	Velocidad promedio punto (km/h)	Velocidad promedio por tipo vía (km/h)
Y1	Carrera 4	22	19	21
	Calle 12	16		
Y2	Carrera 5	23	18	
	Calle 6	13		
Y3	Carrera 6	23	25	
	Carrera 9	27		
Y5	Carrera 2	19	18	
	Calle 10	16		
Y6	Calle 11	31	26	
	Carrera 8	22		
Vías rurales velocidad promedio hora valle (km/h)				
Punto de aforo	Tramo	Velocidad (km/h)	Velocidad promedio punto (km/h)	Velocidad promedio por tipo vía (km/h)
Y4	La cumbre-Yumbo	43	44	44
	Yumbo-La Cumbre	45		

Highway velocidad promedio hora valle (km/h)				
Punto de aforo	Tramo	Velocidad (km/h)	Velocidad promedio punto (km/h)	Velocidad promedio por tipo vía (km/h)
Y13	Calle 15 (Entrada nueva yumbo)	60	60	45
Y13	Calle 15 (Salida nueva yumbo)	60		
Y10	Calle 10 (Entrada antigua yumbo)	40	30	
Y10	Calle 10 (Salida antigua yumbo)	40		

Fuente: Elaboración Propia.

2.4.1.2 Afors vehiculares

Los conteos vehiculares realizados para este estudio, ubicados conforme a la **Figura 11**, permitieron realizar la medición del tráfico del municipio de Yumbo durante las 24 horas de 4 días (jueves, viernes, sábado y domingo) para un total de 96 horas de medición por punto de aforo. Adicionalmente se contaba con datos de 4 puntos de aforo vehicular realizados por la secretaria de tránsito y movilidad de Yumbo en el año 2018. Posteriormente estos afors fueron proyectados para el año 2021 para lo cual se emplearon las relaciones de crecimiento del parque automotor del municipio para cada categoría vehicular según la información del RUNT.

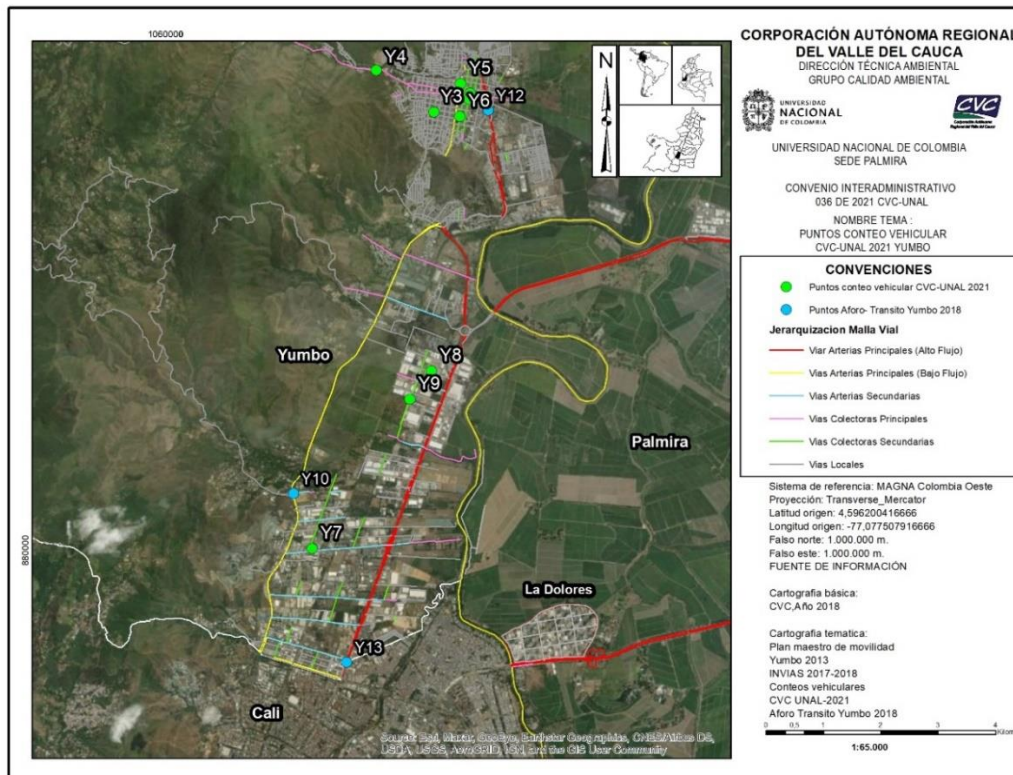


Figura 11. Ubicación de puntos de aforo vehicular 2021 municipio de Yumbo.

Fuente: Elaboración Propia.

Las características asociadas a los puntos de aforo, movimientos registrados, número de carriles de las vías aforadas y clasificación de estas vías según la jerarquía vial se presentan en la **Tabla 9**. Estas características se definen en la sección 2.4.1.4 y son empleadas posteriormente en la distribución del flujo vehicular.

Tabla 9. Características de los puntos aforo vehicular Yumbo

Nombre punto de aforo	Nombre vía	Movimiento	Tipo de vía	Número de carriles
Y1	Carrera 4	3	VCP	2
Y2	Carrera 5	4	VCP	2
Y3	Calle 6	2	VL	1
Y3	Carrera 9	4	VL	1
Y4	Vía La Cumbre	3	VCP	1
Y4	Vía La Cumbre	4	VCP	1
Y5	Calle 10	2	VCS	1
Y5	Carrera 2	3	VL	1
Y6	Calle 11	1	VCS	1
Y6	Carrera 8	3	VL	1
Y7	Carrera 32	3	VAS	1
Y7	Carrera 32	4	VAS	1
Y8	Carrera 24	3	VAS	1
Y8	Carrera 24	4	VAS	1
Y9	Carrera 25	3	VAS	1
Y9	Carrera 25	4	VAS	1
Y10	Vía Dapa	1	VAP	1
Y10	Vía Dapa	2	VAP	1
Y11	Vía Yotoco	1	VAP	1
Y11	Vía Yotoco	2	VAP	1
Y12	Comfandi	1	VAP	2
Y12	Comfandi	2	VAP	2
Y13	Sameco	1	VAP	2
Y13	Sameco	2	VAP	2

Fuente: Elaboración propia.

La recolección de información se realizó por medio de registro filmico con cámaras de video. Dichos videos fueron analizados posteriormente de forma computarizada con Deodata. Estos conteos vehiculares se realizaron para las siguientes categorías vehiculares.

- Livianos
- Motos
- Buses
- Camiones de 2 ejes
- Camiones de 3 y 4 ejes
- Camiones de 5 ejes

- Camiones de 6 ejes

Debido a las características del análisis computarizado, se realizó un conteo unificado de taxis y particulares en la categoría livianos, no obstante, mediante aforos manuales realizados entre las 7:00 y 18:00 en los mismos puntos de aforo computarizado, se logró transformar la categoría de livianos en particulares y taxis. Esta transformación se obtiene por medio de una relación porcentual de vehículos tipo taxi y vehículos particulares tipo automóvil, campero y camioneta, el cual se presenta en la **Tabla 10** donde se puede concluir que el 81.9% de los vehículos livianos de los aforos corresponde a vehículos particulares, y el restante 18.1% corresponde a vehículos tipo Taxi.

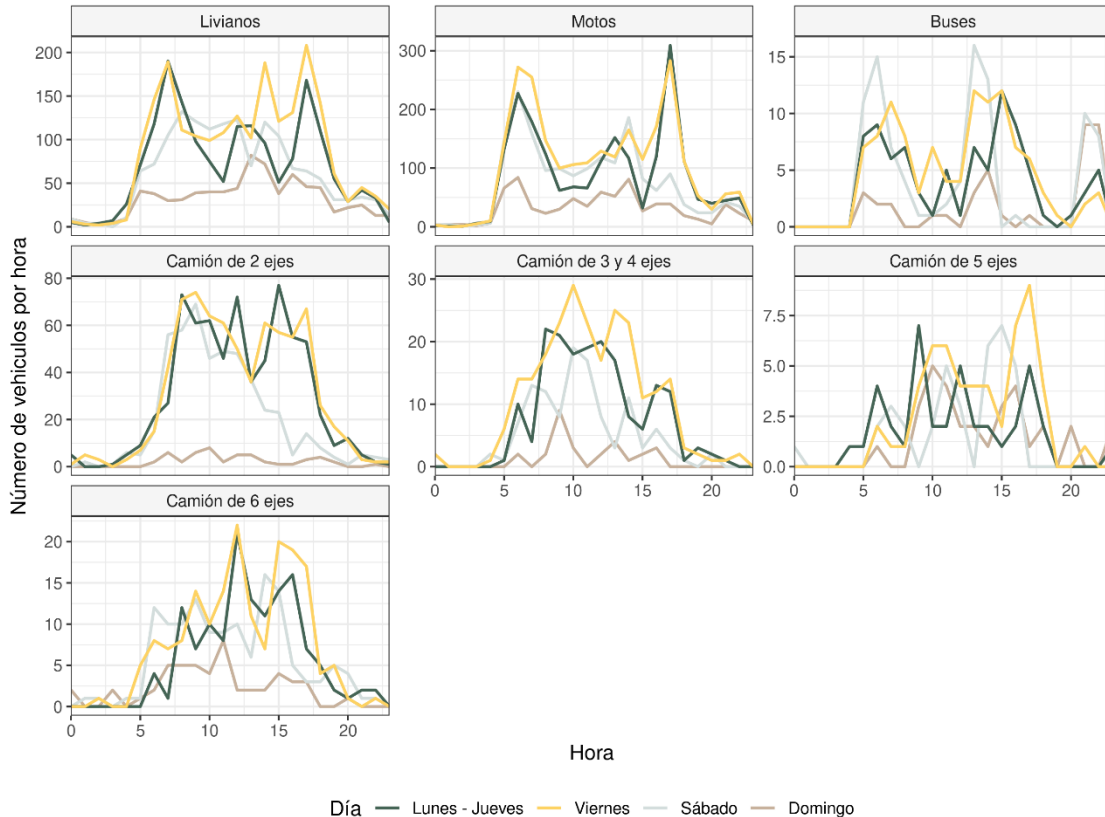
Tabla 10. Relación de vehículos particulares y taxis.

Tipo de vehículo	Número de vehículos aforados	Relación porcentual del aforo de vehículos livianos
Particulares (Automóvil, Camioneta, Campero)	949	81.9%
Taxis	210	18.1%

Fuente: Elaboración propia

2.4.1.3 Características del flujo vehicular

A partir de los datos de conteos quince minútales realizados por medio de la metodología de conteo automático se obtuvieron los perfiles horarios para cada categoría vehicular en los 9 puntos de aforos ubicados en la ciudad de Yumbo. La **Figura 12** es un ejemplo del perfil horario por día para el punto de aforo Y8 ubicado en la Carrera 24 este análisis se realizó para todos los puntos de aforo (Ver Anexo B). Para todas las categorías vehiculares es posible identificar un comportamiento estacional en la magnitud de los conteos para los días lunes a jueves y viernes, es decir, la dinámica vehicular del día viernes se asemeja a las de los días lunes a jueves, sin embargo, para el día sábado vemos que la magnitud de los conteos es semejante a los de los días de la semana, pero su comportamiento temporal se desvía ligeramente. Por último, para el día domingo la magnitud de los conteos disminuyen considerablemente para todas las categorías vehiculares, excepto para la categoría de Camión de 5 ejes donde la magnitud de los conteos es similar con respecto a los demás días de la semana.



Punto de aforo - Y8

Figura 12. Perfiles de conteos vehiculares horarios para el punto de aforo Y8 por categoría vial para los días de la semana.

Fuente: Elaboración Propia.

La **Figura 13** presenta el conteo total de vehículos por punto de aforo y categoría vehicular. El punto de aforo Y13 ubicado en la Vía Panorámica, que conecta los municipios de Yumbo y Cali, presentó el mayor conteo total con alrededor de 60,000 vehículos donde un 40.5% corresponde a la categoría vehicular de Livianos, el 33.3% a la categoría de Motos y el 26.2% corresponde a las categorías de Buses y Camiones. El segundo punto de aforo con mayor volumen vehicular es Y12 ubicado en la Calle 45, en el ingreso al casco urbano del municipio, con cerca 35,000 vehículos, donde el 53.0% corresponde a la categoría de Motos, el 37.8% a la de Livianos y el 9.8% restante a Buses y Camiones. Por último, el tercer punto de aforo con mayor conteo vehicular es Y10 ubicado en la vía Panorama, en la intersección con la vía que conduce a corregimiento de Dapa, con aproximadamente 30,000 vehículos, donde el 51.8% corresponde a la categoría de Livianos, el 33.7% a la categoría de Motos y el 14.5% a la categoría de Buses y Camiones

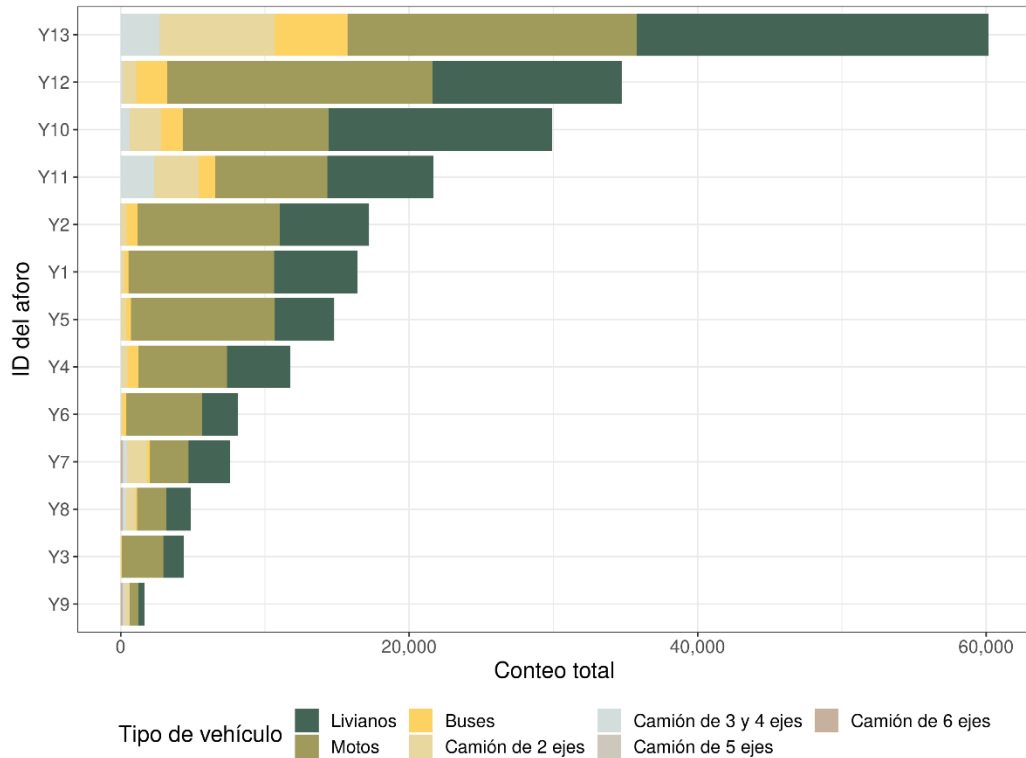


Figura 13. Diagrama de barras para el conteo total de vehículos por punto de aforo y categoría vehicular para el día típico.

Fuente: Elaboración Propia.

La **Figura 14** presenta el diagrama de medias y máximos para el conteo por carril en cada punto de aforo, el punto representa el valor promedio y el extremo de la barra el valor máximo obtenido. Los valores promedio y máximo más altos para los conteos por carril, fueron registrados para la categoría de Livianos en el punto de aforo Y10 ubicado en la vía Panorama con un valor medio de 300 y un máximo de aproximadamente 950 vehículos por carril. También es notable que para los puntos de aforo Y8 y Y9 ubicado en la zona industrial de Arroyohondo donde se obtuvieron los promedios y máximos de conteos por carril más altos para las categorías de Camiones de 5 y 6, en cuanto a la categoría de Camión de 2 ejes se presentan los mayores conteos en el punto Y13 en la Vía Panorámica. El comportamiento de los camiones en las vías nacionales era de esperarse ya que este tipo de vías funcionan como corredores interdepartamentales y conectan a Yumbo con el resto del país que adicional a la vocación industrial del municipio dan pie a un mayor flujo de vehículos de carga. Así mismo, en la categoría de motos se obtuvieron los conteos promedio más altos en los puntos Y5 y Y10 con valor cercano a las 200 motos por carril, siendo Y5 una Vía Colectora Secundaria y Y10 una vía Arteria Principal. Mientras que, los buses obtuvieron los valores más altos en los puntos Y10 y Y13, sobre la vía Panorama y la Vía a Yotoco respectiva, ambas vías nacionales, de conexión intermunicipal.

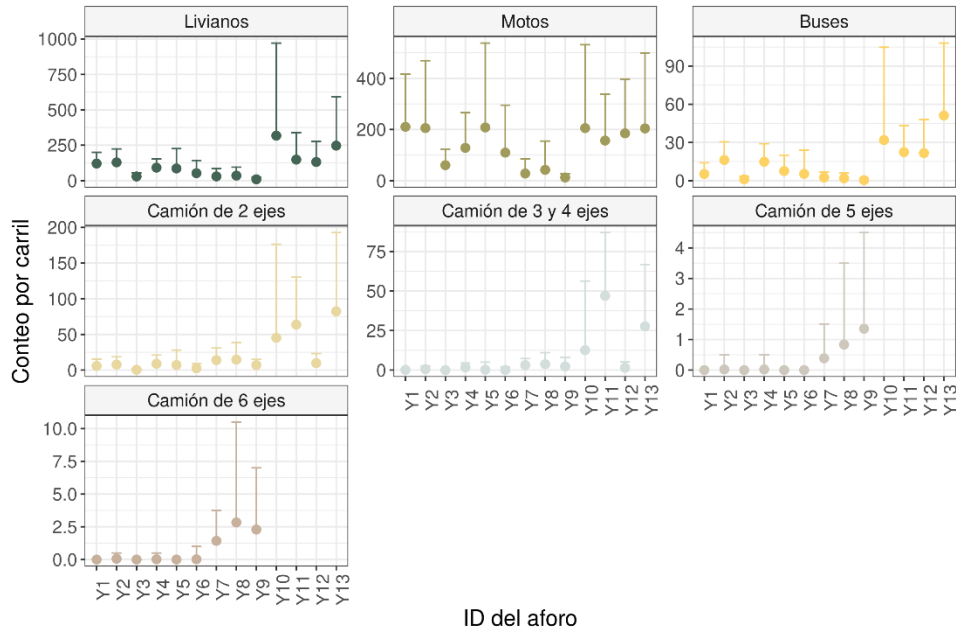


Figura 14. Diagrama el promedio y máximo del conteo por carril de vehículos por punto de aforo y categoría vehicular para el día típico.

Fuente: Elaboración Propia.

Con relación a lo anterior se puede apreciar que la ubicación de los aforos permite analizar la dinámica del tráfico para cada categoría vehicular en específico. Los promedios y máximos de conteos por carril más altos para cada categoría vehicular no se hayan en un solo punto de aforo, sino que se encuentra distribuidos entre los puntos Y5, Y8, Y9, Y10 y Y13. Esto probablemente se debe a las características de las vías y la interacción del tráfico que confluye por las mismas.

Los VKT totales por día es un indicador importante para evaluar las características en una red de transporte. La (**Figura 15**) presenta los diagramas de Pareto de la contribución relativa a los VKT totales por cada punto de aforo para cada día de la semana. Se observa que los puntos de aforos Y3 (vía terciaria), Y5 (vía secundaria), Y10, Y11 y Y12 (vías primarias) contribuyen aproximadamente al 80 % del total de VKT por día. La contribución significativa de estos puntos al indicador de VKT por día, puede estar relacionado con el número y la longitud de las vías que encierra el polígono de Thiessen relacionado a ese punto de aforo, es decir, esos puntos de aforo contienen más vías y posiblemente segmentos de vía de mayor longitud con respecto a los demás.

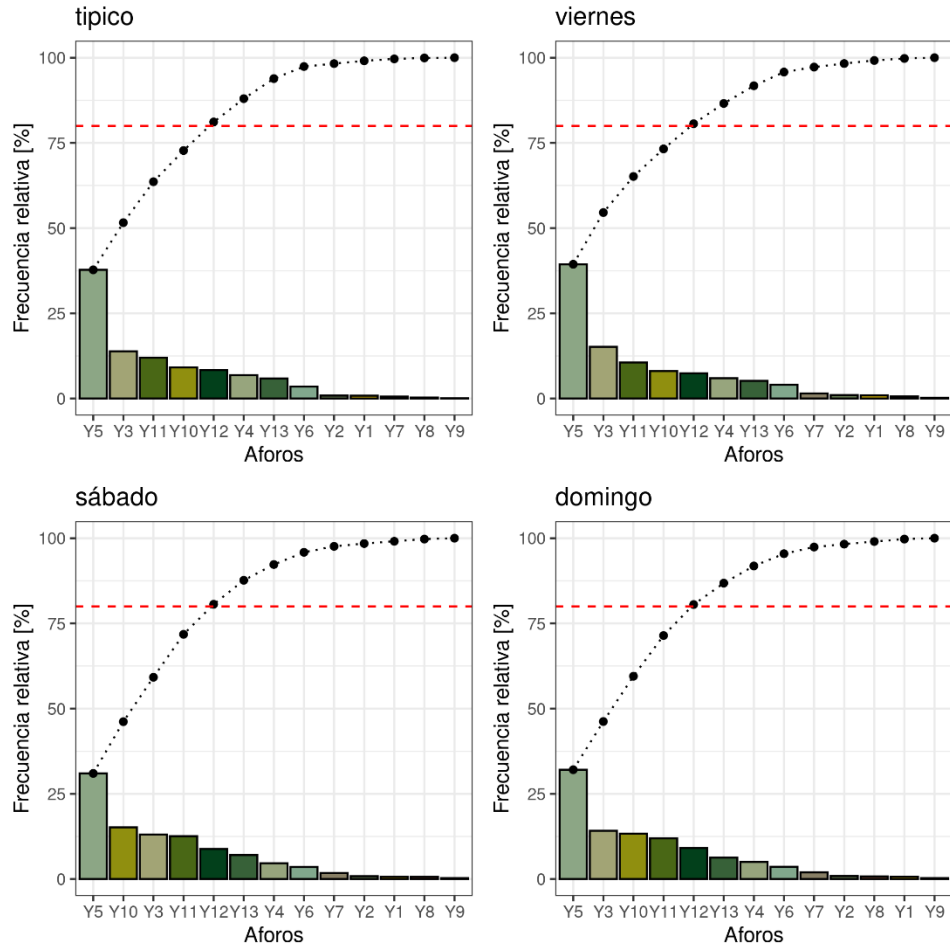


Figura 15. Diagramas de Pareto de la contribución a los VKT totales por día y punto de aforo.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.1.4 Caracterización de la malla vial (L_k)

La información base de jerarquización vial obedece a la dispuesta por el Plan Maestro de Movilidad 2014 del municipio de Yumbo, en cual se divide la malla vial en 4 tipos de vías, las cuales se asignó una clasificación adicional asociada al comportamiento de flujo y su importancia dentro de la red vial, como se muestra en la **Tabla 11**, con el fin realizar el proceso de estimación del tráfico mediante polígonos de Thiessen.

Tabla 11. Jerarquización vial del municipio de Yumbo.

Categoría	Acrónimo	Clasificación para Thiessen
Vías Arterias Principales	VAP	Primaria
Vías Arterias Secundaria	VAS	Secundaria
Vías Colectoras Principales	VCP	Secundaria
Vías Colectoras Secundaria	VCS	Secundaria
Vías Locales	VL	Terciaria

Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el proceso de estimación del flujo vehicular, descrito en el título 2.4.1.5, tiene como insumo de cálculo la malla vial y sus características de tipo de vía, longitud y número de carriles por sentido y número de sentidos de flujo. Se realizó una revisión de estas, ajustando las propiedades de cada objeto espacial y que de esta manera se presenta la mejor representación geográfica. Adicionalmente las vías que presentaban cambio de sección fueron divididas y ajustadas, de forma que cada tramo representara únicamente secciones con igual número de carriles y sentidos.






Otro de los procesos de ajuste que se llevó a cabo, fue la reducción de capacidad vial de acuerdo con las características físicas de las vías, principalmente en vías rurales sin pavimentar y en vías urbanas con poco ancho efectivo y que adicionalmente tienen una función de acceso a predios (**Figura 16**), que, si bien es funcional en ambos sentidos, su ancho efectivo no equivale a un carril por sentido, y por esta razón se le asignan un número de carriles por sentido de 0.5 en 2 sentidos. Puede observarse la jerarquización de la malla vial espacializada en la **Tabla 12** y **Figura 17**.




Figura 16. Ejemplo vía rural y urbana municipio de Yumbo con reducción de capacidad

Fuente: Google Maps.

Tabla 12. Caracterización de la malla vial.

Tipo de vía	Abreviatura	Descripción	Longitud (km)	Ejemplo fotográfico
VIAS ARTERIAS PRINCIPALES (ALTO FLUJO)	VAP(AF)	Se denominan así las vías a través de las cuales se desarrolla la conexión con el sistema vial exterior a la Zona de Estudio, con calzadas separadas para cada flujo direccional y con un flujo mayor en comparación con otras vías arterias principales	141	
VIAS ARTERIAS PRINCIPALES (BAJO FLUJO)	VAP(BF)	Se denominan así las vías a través de las cuales se desarrolla la conexión con el sistema vial exterior a la Zona de Estudio, con calzadas separadas para cada flujo direccional y con un flujo menor en comparación con otras vías arterias principales	75	
VIAS ARTERIAS SECUNDARIAS	VAS	Corresponden a las vías a través de las cuales se desarrolla la conexión entre Vías Arterias Principales, con calzadas separadas para cada flujo direccional	17	
VIAS COLECTORAS PRINCIPALES	VCP	Se denominan así las vías a través de las cuales se desarrolla la conexión entre Vías Arterias Secundarias, con una sola calzada para circulación bidireccional	22	
VIAS COLECTORAS SECUNDARIAS	VCS	Se denominan así las vías a través de las cuales se desarrolla la conexión entre vías Colectoras Principales, con una sola calzada para circulación bidireccional	25	

Tipo de vía	Abreviatura	Descripción	Longitud (km)	Ejemplo fotográfico
VIAS LOCALES	VL	Todas las demás no incluidas en las clasificaciones anteriores, con funcionamiento bidireccional.	256	

Fuente: Elaboración Propia

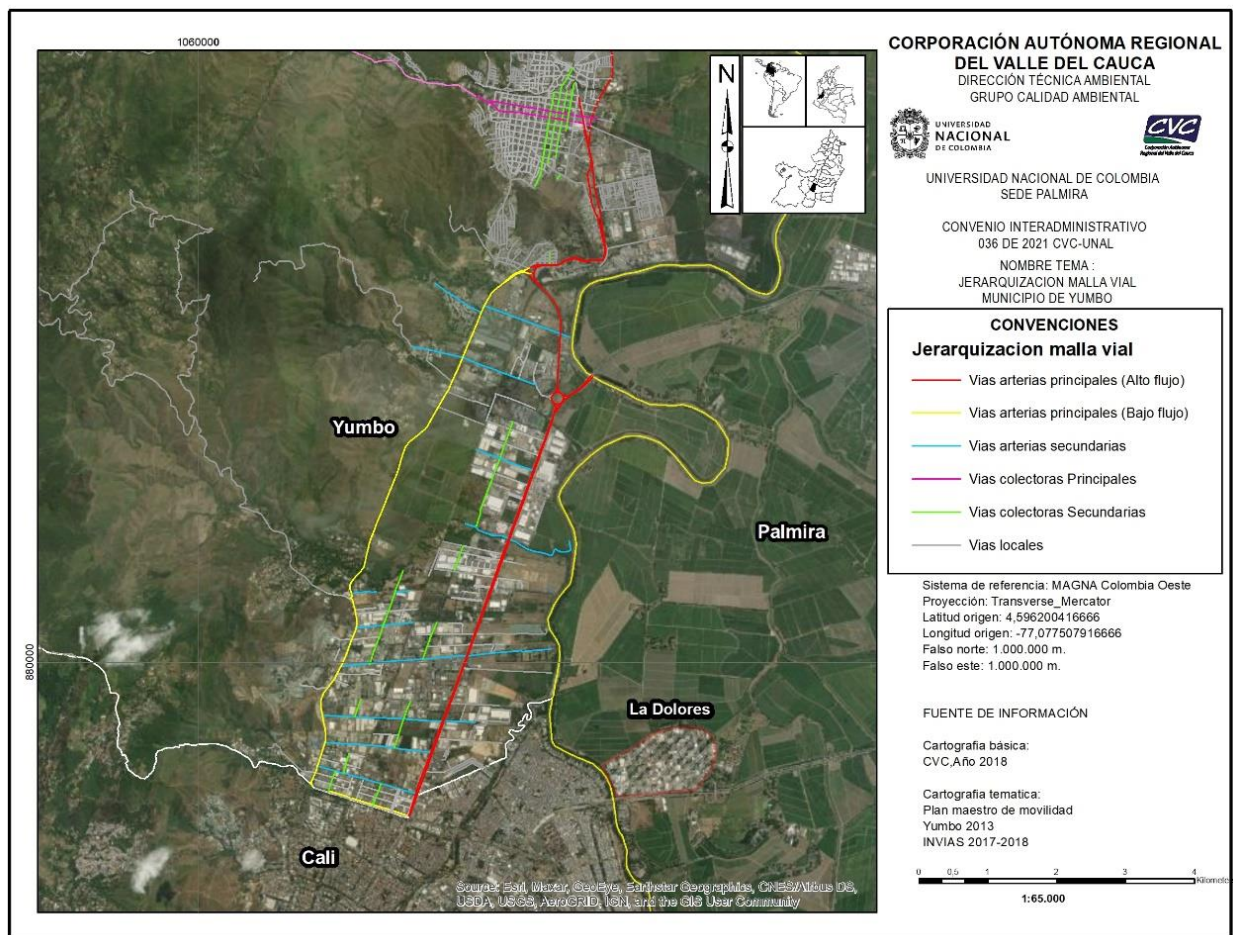


Figura 17. Jerarquización de la malla vial municipio de Yumbo

Fuente: Elaboración Propia

Para finalizar este proceso se realizaron dos etapas de depuración, en la primera se realizó la eliminación de la malla vial en predios privados, ya que estas no presentan el comportamiento de la malla vial general. También se realizó la verificación y eliminación de las vías duplicadas para evitar sobre estimaciones.

2.4.1.5 Distribución del flujo vehicular (F_{jk})

El método para la estimación del flujo vehicular fue basado en polígonos de Thiessen, el cual permite estimar un área de influencia donde se asumen características propias del punto de medición que lo genera. La metodología de generación de los polígonos de Thiessen traza los límites de los polígonos de forma tal que la distancia euclidiana desde cualquier lado de los polígonos sea igual a cualquiera de los puntos más cercanos, esto garantiza que cualquier ubicación dentro de un polígono tiene una distancia menor al punto de medición que lo genera que a cualquier otro punto del sistema analizado.

La metodología de polígonos de Thiessen se ha empleado en la hidrología, con el fin de determinar la distribución de propiedades hidrológicas de una zona de estudio, en materia Transporte se han empleado para determinar áreas de influencia de aeropuerto e incluso se han empleado en la determinación de cobertura de centros médicos Cuza et al. (2020).

Los Polígonos de Thiessen empleados en el para la distribución del flujo del municipio de Yumbo, que se pueden ver en la **Figura 18**, fueron estimados a partir de los puntos de aforo vehículos y divididos en tres clasificaciones viales, Primarias, Secundarias y Terciarias, conforme a la tipología de las vías que se muestran en la **Tabla 13**. Dando como resultado el número de vehículos circulado por cada tipología vehicular en cada segmento de la malla, ejemplo en la **Figura 19**.

Tabla 13. Agrupación de puntos de aforo para definición de polígonos de Thiessen

Nombre punto de aforo	Tipo de vía	Clasificación para Thiessen
Y1	VCP	Secundaria
Y2	VCP	Secundaria
Y3	VL	Terciaria
Y4	VCP	Terciaria
Y5	VCS	Secundaria
Y5	VL	Terciaria
Y6	VCS	Secundaria
Y6	VL	Terciaria
Y7	VAS	Secundaria
Y8	VAS	Secundaria
Y9	VAS	Secundaria
Y10	VAP	Primaria
Y11	VAP	Primaria

Nombre punto de aforo	Tipo de vía	Clasificación para Thiessen
Y12	VAP	Primaria
Y13	VAP	Primaria

Fuente: Elaboración propia

Esta agrupación permite la estimación de flujo vehicular por segmento vial de según su clasificación a partir de la **Ecuación 6**:

$$FV_{n,c,h,d,t} = FN_{t,h,d} * C_n \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$FV_{n,c,h,d,t}$ Flujo vehicular en el segmento vial “n”, para la tipología vehicular “m”, en la hora “h” del día “d” en el polígono de Thiessen “t”

$FN_{t,h,d}$ Flujo vehicular normalizado por carril del nodo “t”, para la hora “h” del día “d”

C_n Número de carriles del segmento vial “n”

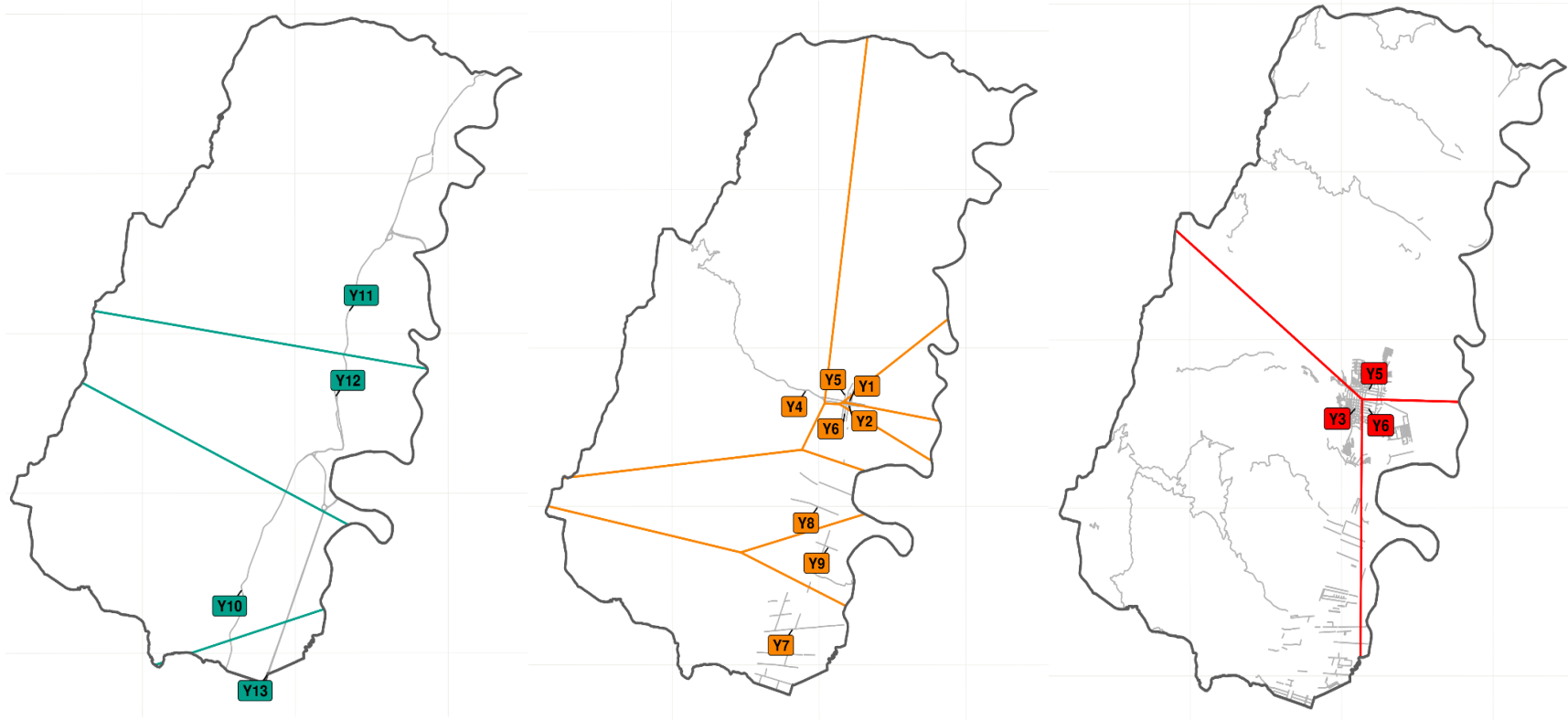


Figura 18. Polígonos de Thiessen por categoría vial a) vías primarias, b) vías secundarias, c) vías terciarias.

Fuente: Elaboración propia.

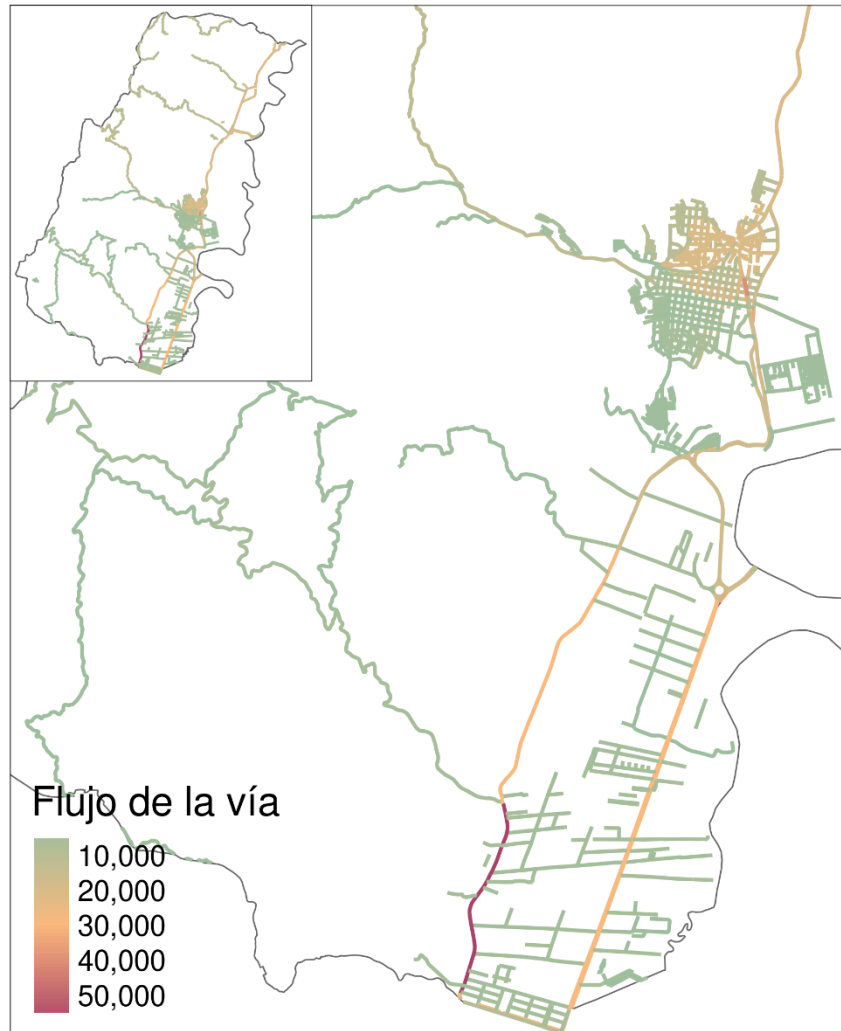


Figura 19. Mapa de flujo vehicular día típico 24 horas

Fuente: Elaboración propia.

2.4.1.6 Factor de actividad

Una vez se realiza la distribución del flujo vehiculares, y con el fin de obtener el factor de actividad vehicular definitivo, se estiman los kilómetros recorridos por cada tipología vehicular por medio de la **Ecuación 7**.

$$KR_{m,h,d} = \sum FV_{n,c,h,d,t} * L_n \quad \text{Ecuación 7}$$

$KR_{m,h,d}$ Kilómetros recorridos de la tipología vehicular “m”, en la hora “h” del día “d”

L_n Longitud en kilómetros del segmento vial “n”

En la **Tabla 14** se presenta el resumen de los kilómetros recorridos diarios por cada tipología vehicular, y en la **Figura 20** se presenta la distribución geográfica de los kilómetros recorridos para todos los vehículos agrupados para el día típico, la desagregación horaria y por tipo de vía podrá ser consultada en el Anexo C.

Tabla 14. Kilómetros recorridos por día y tipo de vehículos en los días evaluados

Tipo Vehículo	Domingo		Sábado		Viernes		Día típico		Total
	km recorridos	Porcentaje	km recorridos	Porcentaje	km recorridos	Porcentaje	km recorridos	Porcentaje	km recorridos
Particulares	833,293	34%	924,772	33%	909,570	30%	899,995	30%	3,567,629
Taxis	150,826	6%	167,384	6%	164,632	5%	162,899	5%	645,741
Motos	1,376,967	55%	1,561,802	55%	1,624,725	53%	1,614,851	53%	6,178,345
Buses	68,373	3%	78,530	3%	116,241	4%	118,562	4%	381,706
Camión de 2 ejes	33,133	1%	58,063	2%	162,778	5%	168,035	6%	422,008
Camión de 3 y 4 ejes	18,599	1%	21,147	1%	60,572	2%	66,415	2%	166,733
Camión de 5 ejes	365	0%	749	0%	829	0%	758	0%	2,701
Camión de 6 ejes	575	0%	1,764	0%	2,176	0%	2,091	0%	6,606
Total	2,482,130	100%	2,814,209	100%	3,041,523	100%	3,033,606	100%	11,371,468

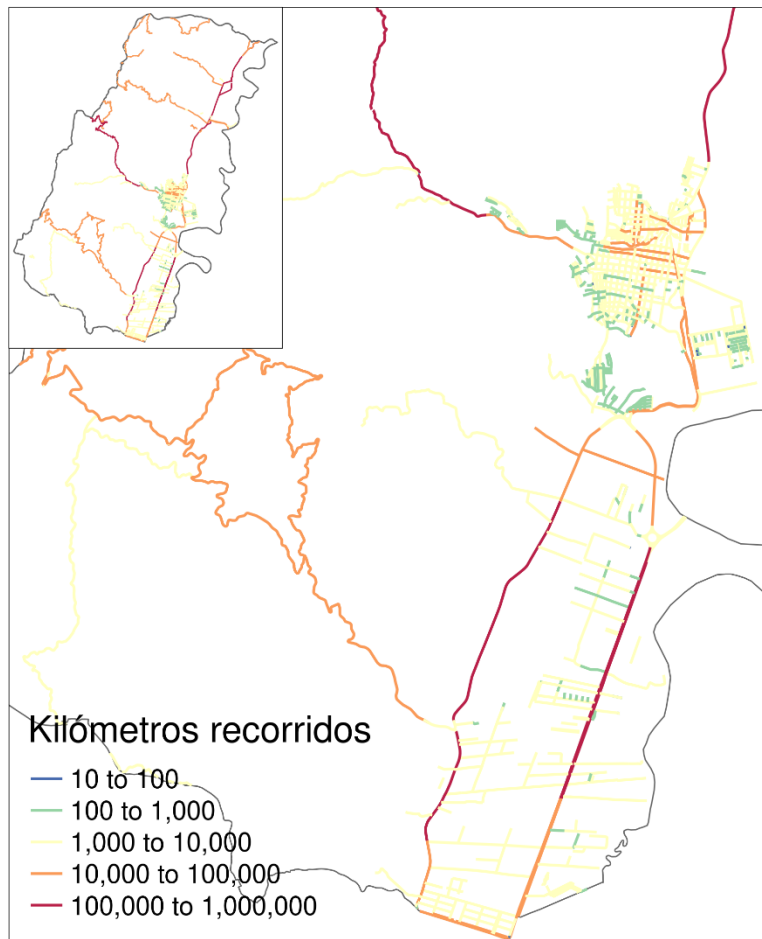


Figura 20. Kilómetros recorridos de todas las categorías vehiculares para el día típico por tramo vial

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2 Factores de emisión (FE_{ij})

Para este estudio se determinaron factores de emisión para las fuentes móviles en ruta a partir del modelo COPERT, que es un modelo desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente, para el cálculo de emisiones vehiculares en carretera a nivel local y nacional. Estima emisiones y factores de emisión de los contaminantes criterio, GEI, COV, COVM y metales (Emisia SA, 2021).

El modelo COPERT puede ser aplicado a través del software libre que dispone (<https://www.emisia.com/utilities/copert/download/>). En este inventario se utilizó la última versión disponible, COPERT 5.5. Además, el software permite estimar los factores y las emisiones de acuerdo con la disponibilidad de información en nivel 2 o nivel 3. Para Yumbo se utilizó el nivel 3, el cual es el nivel más detallado tanto en datos de entrada como en el

cálculo interno del software de los factores de emisión y las emisiones. Los datos de entrada que requiere el software se pueden observar en la **Figura 21**.

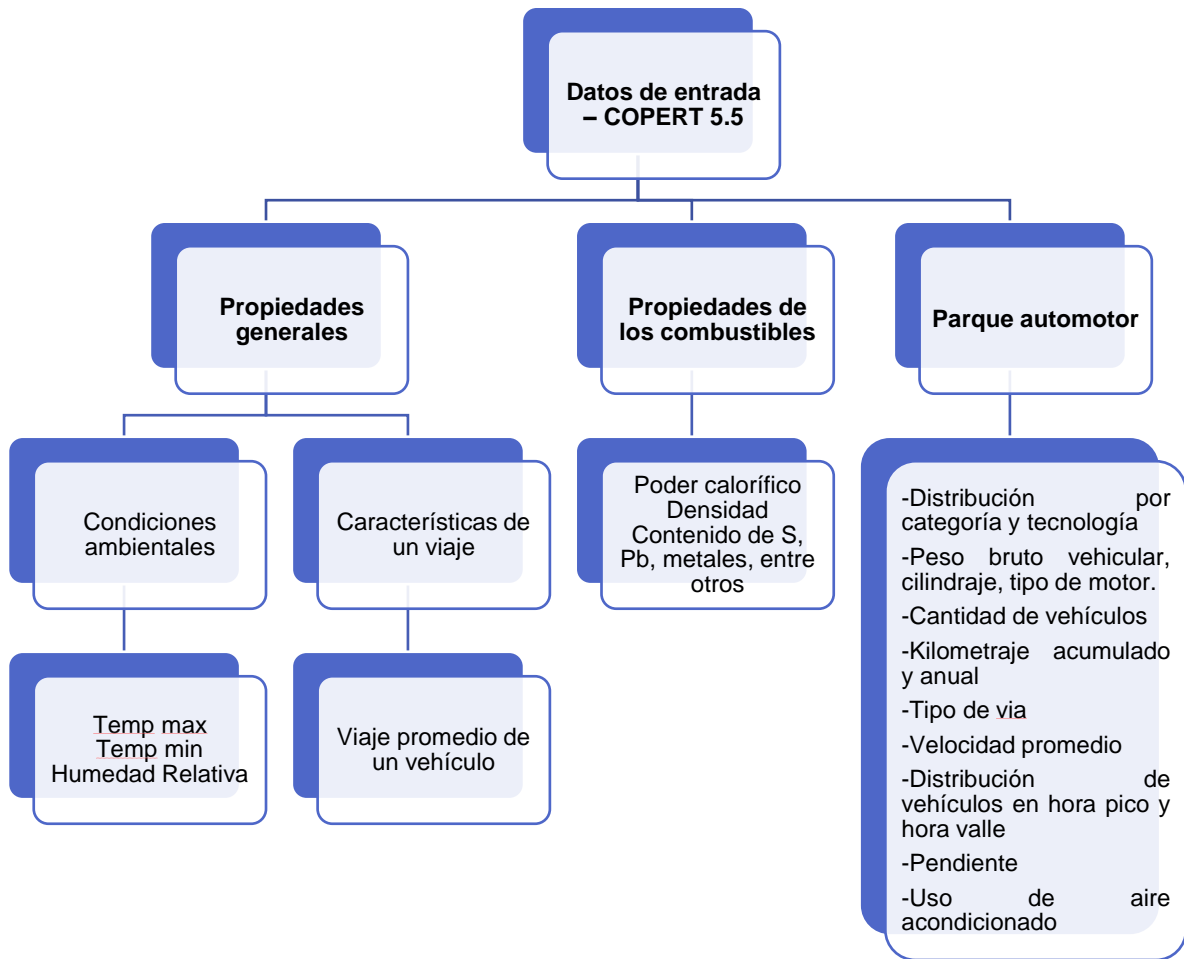


Figura 21. Esquema metodológico para la estimación de factores de emisión vehicular mediante el modelo COPERT 5.5.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2.1 Propiedades generales

Las propiedades generales de entrada para el modelo COPERT corresponden a información ambiental de las temperaturas máximas y mínimas y la humedad relativa de cada mes del año del estudio, y a las características de un viaje típico, es decir, longitud que se recorre típicamente por el parque automotor cada vez que se enciende y el tiempo que se demora la flota en recorrer ese trayecto.

Para Yumbo se tomó información meteorológica de la estación meteorológica ACOPI (ACO) y se asumió un viaje típico de 20 km con una duración de 0.66 hora, de acuerdo con la información de la velocidad promedio de la ciudad (sección 2.2.1.3) y los kilómetros diarios recorridos según la actividad reportada por CDA (sección 2.1.2) (ver Anexo D y Anexo E).

2.4.2.2 Propiedades de los combustibles

Las características de los combustibles consumidos durante el periodo del inventario que requiere el modelo COPERT son determinantes para la estimación y composición de las emisiones. Para este estudio se tomó la información reportada en el 2016 por la UPME, y en las variables de las que no se encontró información se asumió los datos que trae COPERT por defecto (Anexo D y Anexo E).

2.4.2.3 Caracterización del parque automotor

La caracterización y distribución del parque automotor es importante para la determinación de los factores de emisión, ya que estos dependen de la tecnología de cada vehículo, el combustible que usa, la actividad vehicular, entre otras. Para determinar las características de la flota vehicular se utilizó información disponible y se asumieron algunas variables, como se describe a continuación.

2.4.2.4 Estándar euro

El estándar EURO indica el nivel de las tecnologías que puede tener un vehículo, en términos de control de emisiones. Para cada vehículo del parque automotor de Yumbo se definió a partir del calendario de introducción de las tecnologías vehiculares al país, como se muestra en la **Tabla 15**.

Tabla 15. Calendario de introducción de tecnologías a Colombia.

CATEGORIA	COMBUSTIBLE	1990 y antes	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
		AUTOMOVILES Y TAXIS	DIESEL - PRIVADO	CONVENTIONAL																		EURO 2		EURO 4									
DIESEL - PUBLICO	CONVENTIONAL																		EURO 2		EURO 4												
GASOLINA	ECE 15/04						EURO 1												EURO 3			EURO 4											
GN - GLP - PRIVADO	EURO 4																																
GN - GLP - PUBLICO	EURO 4																																
GASOLINA - ELECTRICO	EURO 6																																
CAMIONES	DIESEL - PRIVADO	CONVENTIONAL																		EURO 2		EURO 4			EURO 5								
	DIESEL - PUBLICO	CONVENTIONAL																		EURO 2		EURO 4			EURO 5								
	GASOLINA	CONVENTIONAL						EURO 1												EURO 3													
	GAS - DIESEL (DUAL)	CONVENTIONAL						EURO 3			EURO 4			EURO 5			EURO 6																
	GN - GLP - PRIVADO	NO HAY EQUIVALENCIA EN MODELO COPERT																															
	GN - GLP - PUBLICO	NO HAY EQUIVALENCIA EN MODELO COPERT																															
AUTOBUSES	DIESEL - PRIVADO	CONVENTIONAL																		EURO 2		EURO 4			EURO 5								
	DIESEL - PUBLICO	CONVENTIONAL																		EURO 2		EURO 4			EURO 5								
	GASOLINA	CONVENTIONAL						EURO 1												EURO 2	EURO 3												
	GN - GLP - PRIVADO	CONVENTIONAL																		EURO 2			EURO 4										
	GN - GLP - PUBLICO	CONVENTIONAL																		EURO 4													
MOTOS	GASOLINA	CONVENTIONAL																		EURO 2													

Adaptado de: Trejos, 2021

2.4.2.5 Segmento

Una vez definido el estándar EURO para cada vehículo, se determinó el segmento y la categoría a la cual pertenecía cada vehículo de acuerdo con las reglas de clasificación de la guía de COPERT. En la **Tabla 17** se puede observar las categorías, segmentos, reglas de clasificación que se utilizaron y la base de datos de RUNT utilizada.

Para la asignación del segmento fue necesario conocer el cilindraje en los autos particulares y taxis, peso vehicular (PBV) en vehículos pasados y buses, y el tipo de motor y cilindraje de las motos.

El cilindraje del parque automotor se obtuvo de la base de datos del RUNT, y aquellos vehículos que no tenían esta información o tenían datos errados como 0 o cilindrajes muy bajos se les asignó un cilindraje de 1201cc, de tal forma que el segmento asignado fuese “Small” y se pudiera asociar a un standard Euro más apropiado.

El PBV de los vehículos pesados fue asignado de acuerdo con la tabla de estandarización de PBV del Ministerio de Transporte¹ y de la base de datos de la caracterización vehicular del parque automotor de Manizales (Trejos, 2021), este proceso permitió asignar el PBV al 59% de los vehículos pesados registrados en el municipio posteriormente, para realizar la asignación de los faltantes, se estableció una relación entre el cilindraje (reportados en el RUNT) y el PBV y de esta manera establecer una relación, ver **Tabla 16**, que permitiera clasificar los vehículos faltantes.

Tabla 16. Relación Peso bruto vehicular de los vehículos pesados según el cilindraje.

PBV	CC min	CC max
<=7500	2200	4900
<=12000	4901	6500
<=14000	6501	7500
<=20000	7501	8500
<=28000	8501	

Fuente: Elaboración Propia.

Por otro lado, el tipo de motor de las motocicletas fue asignado asumiendo que todas las motocicletas con modelos superiores a 2009 son motocicletas de 4 tiempos, Manizales (Trejos, 2021), Mientras que para las motocicletas con modelos iguales o inferiores a 2009 se asignó el tipo de motor de acuerdo con las fichas técnicas.

Para la asignación del segmento de los buses se asumió el segmento “Urban Buses Midi <=15 t” para todos los buses, ya que el parque automotor únicamente cuenta con buses de menos de 15 toneladas de acuerdo con las línea y modelo existentes en Yumbo.

De acuerdo con las características asignadas a toda la flota vehicular, se seleccionó en la interfaz de “Stock Configuration” del software las casillas que hacían referencia a la tipología del parque automotor del municipio. (ver Anexo D y E).

¹ Ministerio de Transporte Colombia, <https://www.mintransporte.gov.co/documentos/3/documentos-del-ministerio/genPag=7&genPagDocs=5> (consultada el 29 de noviembre de 2021).

Tabla 17. Reglas para la asignación del segmento y categoría al parque automotor.

CATEGORIA	SEGMENTO	DESCRIPCIÓN	CLASIFICACIÓN	BASE DEL RUNT
Passenger Cars	Mini	Vehículos utilizados para el transporte de pasajeros y que comprendan no más de 8 sillar además del asiento del conductor.	$\leq 1200 \text{ cm}^3$	Autos, Camioneta, Campero. Vehículos de servicio público se tomaron como Taxis
	Small		$\leq 1600 \text{ cm}^3$	
	Medium		$\leq 2000 \text{ cm}^3$	
	Large-SUV-Executive		$> 2000 \text{ cm}^3$	
Heavy Duty Vehicles	Rigid $\leq 7,5 \text{ t}$	Vehículos utilizados para el transporte mercancías y con un peso máximo superior a 3.5 toneladas, pero sin exceder las 12 toneladas.	N2 - Rigid (3.5 - 7.5 t)	Camiones - Volquetas
	Rigid 7,5 - 12 t		N2 - Rigid (7.5 - 12 t)	Camiones - Volquetas
	Rigid 12 - 14 t	Vehículos utilizados para el transporte mercancías y con un peso máximo superior a 12 toneladas.	N3 - Rigid (12 - 14 t)	Camiones - Volquetas
	Rigid 14 - 20 t		N3 - Rigid (14 - 20 t)	Camiones - Volquetas
	Rigid 20 - 26 t		N3 - Rigid (20 - 26 t)	Camiones - Volquetas
	Rigid 26 - 28 t		N3 - Rigid (26 - 28 t)	Camiones - Volquetas
	Articulated 28 - 34 t	Vehículos articulados utilizados para el transporte mercancías y con un peso máximo superior a 12 toneladas.	N3 - Articulated (28 - 34 t)	Tractocamion
	Articulated 50 - 60 t		N3 - Articulated ($> 50 \text{ t}$)	Tractocamión
L-Category	Mopeds 2-stroke $< 50 \text{ cm}^3$	Vehículos de dos ruedas de motor térmico.	L1 y L2 ($\leq 50 \text{ cm}^3$ & 2T)	Motos
	Mopeds 4-stroke $< 50 \text{ cm}^3$		L1 y L2 ($\leq 50 \text{ cm}^3$ & 4T)	Motos
	Motorcycles 2-stroke $> 50 \text{ cm}^3$		L3, L4 y L5 ($> 50 \text{ cm}^3$ & 2T)	Motos
	Motorcycles 4-stroke $< 250 \text{ cm}^3$		L3, L4 y L5 ($50 \text{ cm}^3 - 250 \text{ cm}^3$ & 4T)	Motos
	Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm^3		L3, L4 y L5 ($250 \text{ cm}^3 - 750 \text{ cm}^3$ & 4T)	Motos
	Motorcycles 4-stroke $> 750 \text{ cm}^3$		L3, L4 y L5 ($> 750 \text{ cm}^3$ & 4T)	Motos
	Quad & ATVs			Cuatrimotos
Buses	Urban Buses Midi $\leq 15 \text{ t}$	Categorías M2 y M3	M2 Y M3 ($< 15 \text{ t}$)	Bus, Buseta y Microbús

Adaptado de: Ntziachristos & Samaras, 2021.

2.4.2.6 Kilometraje del parque automotor

El kilometraje acumulado de cada tecnología vehicular se estimó a partir de la información obtenida de los CDA. Donde se tomó el promedio por tecnología, combustible y categoría vehicular de la lectura del odómetro registrada (**Tabla 18**). Para las tecnologías vehiculares que no se encuentran reportadas en los CDA, correspondientes a vehículos que aún no requieren revisión técnico-mecánica, se realizó la estimación del kilometraje acumulado a partir del año medio de la introducción de la tecnología y el kilometraje medio anual según la tipología vehicular.

Tabla 18. Actividad acumulada por categoría vehicular, estándar Euro y tipo de combustible, según los datos de CDA.

Categoría	Estándar Euro	Combustible	Kilometraje acumulado promedio (km)
AUTOS	CONVENTIONAL	Diesel	399,935
	ECE 15/04	Gasolina	442,434
	EURO1	Gasolina	259,536
	EURO2	Diesel	220,442
	EURO3	Gasolina	135,261
	EURO4	Diesel	145,343
	EURO4	GNV	393,147
	EURO4	Gasolina	16,505
	EURO4	GLP	16,505
PESADOS	CONVENTIONAL	Diesel	955,675
	CONVENTIONAL	Gasolina	1,248,820
	EURO1	Gasolina	692,974
	EURO2	Diesel	382,344
	EURO3	Gasolina	254,148
	EURO4	Diesel	268,274
	EURO5	Diesel	35,883
	BUSES	CONVENTIONAL	Diesel
	EURO1	GNV	831,357
	EURO2	Diesel	360,795
	EURO3	GNV	433,751
	EURO4	Diesel	314,931
	EURO5	Diesel	36,146
MOTOS	CONVENTIONAL	Gasolina	199,459
	EURO2	Gasolina	105,669
	EURO1	Gasolina	199,458
TAXIS	CONVENTIONAL	Diesel	618,387
	ECE 15/04	Gasolina	645,397
	EURO1	Gasolina	419,685
	EURO2	Diesel	250,032
	EURO3	Gasolina	252,132

Categoría	Estándar Euro	Combustible	Kilometraje acumulado promedio (km)
	EURO4	Gasolina	41,672
	EURO4	Diesel	116,510
	EURO4	GNV	494,520

Fuente: Elaboración propia.

La actividad media anual para cada tipología vehicular se asignó de acuerdo con la actividad media anual estimada en la **sección 1.2.3**, para cada categoría vehicular. Y el número de vehículos (stock) para cada tipo de vehículo se determinó a partir de la base de datos del RUNT (Anexo D y E).

2.4.2.7 Condiciones de manejo

Las condiciones de manejo o “Driving Conditions” obedecen al porcentaje de carga promedio, con respecto a la capacidad, de cada tecnología, de vehículos de carga y buses. Para este parámetro se emplearon los valores predeterminados del software COPERT 5.5, que corresponde a una constante equivalente al 50% (ver Anexo D).

2.4.2.8 Aire acondicionado

El uso del aire acondicionado al momento de la circulación de un vehículo es un factor que contribuye a un mayor consumo de combustible y por ende mayores emisiones, en este sentido, basados en la metodología IVE para la estimación del usos del aire acondicionado, y entendiendo que la temperatura media del municipio esta sobre los 25 °C se realiza la estimación del porcentaje de vehículos que teniendo aire acondicionado los usan, bajo la suposición que a 15°C ningún vehículo emplea el aire acondicionado y a 32°C el 100% de los vehículos con aire acondicionado lo emplean. Haciendo la relación y teniendo en cuenta que la temperatura media anual de 2021 es 28.82°C, se estimó que el 51.9% de vehículos emplean el aire acondicionado (ver Anexo D y E).

La definición del porcentaje de vehículos que tienen aire acondicionada fue establecida por defecto, basados en datos asociados a la tecnología vehicular dispuestos por *COPERT 5.5*.

2.4.2.9 Factores de emisión del parque automotor

Una vez ingresados los parámetros propios del municipio de Yumbo al software *COPERT 5.5*.se corre el modelo de cálculo y se obtienen los factores de emisión para cada categoría y tecnología vehicular según el combustible de cada contaminante. Los factores segregados se encuentran disponibles en el Anexo F.

Para el proceso de análisis se estimaron los factores de emisión de cada categoría vehicular realizando un promedio ponderación según el número de vehículos por tecnología, segmento y combustible de las categorías vehiculares evaluadas, ver **Tabla 19**.

Por otro parte, para realizar la estimación de emisión de contaminantes por tipo de combustible, apoyados en los resultados del Anexo F, y realizando proceso se ponderación de los factores de emisión por tipo de combustible y el número de vehículos de parque automotor, se definieron los porcentajes de aporte de cada categoría vial según el combustible. **Tabla 20**.

Tabla 19. Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular.

Tipología vehicular	Factores de emisión por contaminante (g/km)											
	BC	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	VOC	VOCNM
Particulares	0.024	0.055	5.988	226.927	0.013	0.048	0.907	0.056	0.069	0.006	0.836	0.785
Taxis	0.035	0.025	1.767	231.331	0.010	0.069	0.532	0.073	0.086	0.004	0.247	0.223
Motos	0.007	0.163	14.433	93.404	0.002	0.008	0.204	0.068	0.074	0.003	4.124	3.961
Buses	0.366	0.353	4.816	923.158	0.017	1.056	9.915	0.773	0.826	0.005	2.854	2.501
Camiones de 2 ejes	0.172	0.057	2.353	547.396	0.024	0.677	6.078	0.387	0.440	0.003	1.207	1.150
Camiones de 3 y 4 ejes	0.224	0.094	2.716	1167.309	0.023	1.375	12.047	0.483	0.539	0.007	0.766	0.673
Camión de 5 ejes	0.246	0.109	2.816	1177.627	0.024	1.479	13.209	0.529	0.590	0.007	0.763	0.654
Camión de 6 ejes	0.371	0.104	4.289	1829.098	0.027	2.293	20.396	0.785	0.848	0.011	1.032	0.928

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 20. Factores de emisión por tipo de contaminante agrupado por tipología vehicular y combustible.

Tipo de vehículo	Combustible	Factores de emisión por contaminante (g/km)											
		BC	CH ₄	CO	CO ₂	N ₂ O	NO ₂	NO _x	PM _{2.5}	PM ₁₀	SO ₂	COV	COVNM
Particulares	Gasolina	0.0013	0.0638	7.3860	225.0284	0.0165	0.0391	0.9792	0.0150	0.0279	0.0069	1.0075	0.9483
	Diesel	0.1316	0.0182	0.7919	236.5943	0.0006	0.0967	0.7440	0.2495	0.2623	0.0014	0.2111	0.1968
	GNV	0.0013	0.0404	0.1831	221.4352	0.0022	0.0023	0.0779	0.0152	0.0280	0.0000	0.0486	0.0083
Taxis	Gasolina	0.0013	0.0289	3.2291	222.0082	0.0180	0.0185	0.4682	0.0150	0.0279	0.0068	0.3860	0.3595
	Diesel	0.0931	0.0123	0.5881	249.9466	0.0029	0.1616	0.8135	0.1714	0.1843	0.0015	0.1552	0.1439
	GNV	0.0013	0.0455	0.1831	215.8339	0.0018	0.0022	0.0710	0.0152	0.0281	0.0000	0.0471	0.0040
Motos	Gasolina	0.0074	0.1632	14.4333	93.4037	0.0020	0.0082	0.2039	0.0680	0.0738	0.0028	4.1238	3.9606
Buses	Diesel	0.3799	0.1244	4.7065	900.9014	0.0175	1.0721	9.6849	0.8011	0.8538	0.0053	2.7154	2.5910
	GNV	0.0033	6.2290	7.6345	1494.1606	0.0000	0.6331	15.8276	0.0583	0.1110	0.0000	6.4103	0.1814
Camiones	Diesel	0.1913	0.0627	2.5312	683.8372	0.0245	0.8463	7.5669	0.4253	0.4790	0.0040	1.1706	1.1079

Fuente: Elaboración propia.

2.4.3 Emisiones vehiculares (E_i)

Conforme a lo establecido en la **Ecuación 5**, se estimó las emisiones vehiculares de los contaminantes criterio y GEI para los días en los que fueron realizados aforos vehiculares jueves (día típico), viernes, sábado y Domingo (**Tabla 21**).

Tabla 21. Emisiones diarias de contaminantes para los días evaluados

Contaminante	Domingo (t)	Sábado (t)	Viernes (t)	Típico (t)
BC	0.07	0.09	0.13	0.13
CH ₄	0.30	0.34	0.38	0.38
CO	25.65	29.02	30.37	30.21
CO ₂	464.76	536.08	676.74	684.76
NO _x	2.25	2.70	4.19	4.30
N ₂ O	0.02	0.02	0.02	0.02
NO ₂	0.19	0.23	0.39	0.41
PM ₁₀	0.26	0.30	0.40	0.41
PM _{2,5}	0.23	0.27	0.36	0.37
SO ₂	0.01	0.01	0.01	0.01
COV	6.67	7.58	8.09	8.06
COVNM	6.37	7.24	7.71	7.68

Fuente: Elaboración propia.

Por otra parte, realizando una segregación por hora de la estimación de emisiones de contaminante, se presenta los perfiles de emisión diaria para cada contaminante evaluado. (ver **Figura 22**), en el cual se puede observar el comportamiento a la largo del día de cada contaminante, evidenciando inicialmente mayores picos de emisión el día típico y el viernes, y una menor emisión el día domingo.

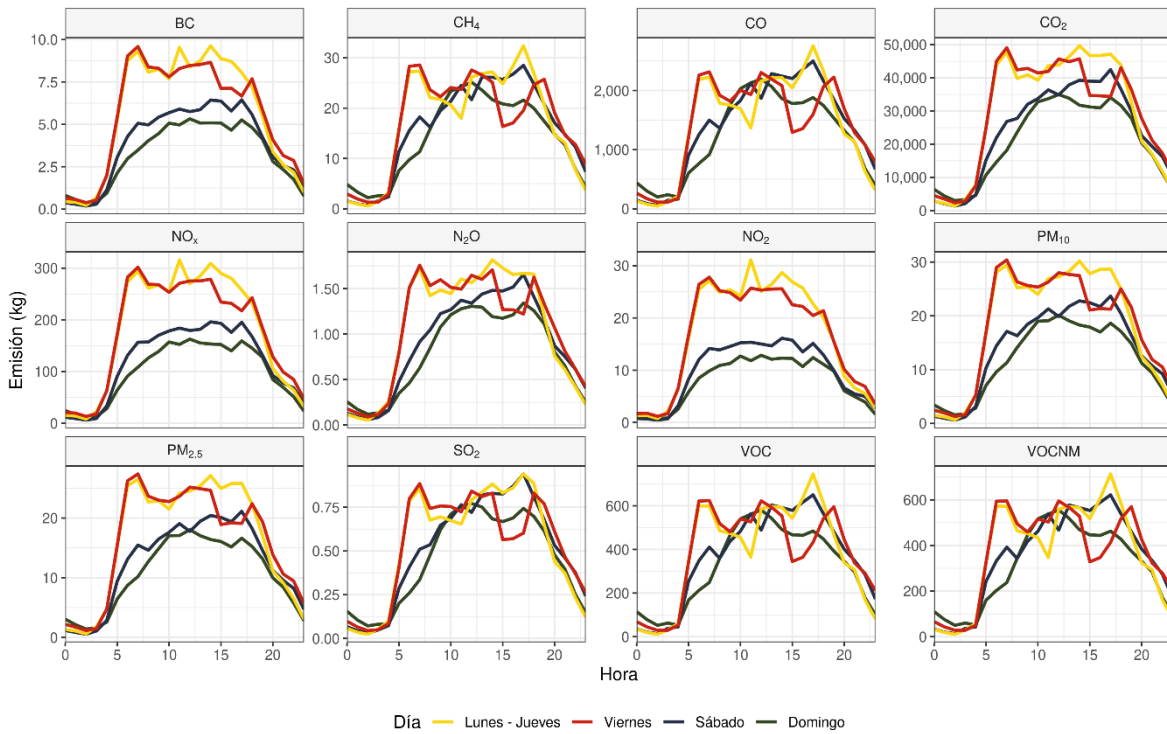


Figura 22. Perfil horario de emisiones por contaminante para los días evaluados.

Fuente: Elaboración propia

Adicional a los perfiles diarios se extrajeron los mapas de emisión, relacionando los resultados con cada tramo vial del municipio. Se presentan las emisiones diarias de CO₂ en la **Figura 23**, en el cual se puede evidenciar una mayor emisión sobre las vías que conectan con la ciudad de Cali. Es importante aclarar que gráficamente en la vía de mayor tráfico vehicular, Vía Panorámica, no representa su emisión real, debido a que esta vía está distribuida en dos calzadas, las cuales se sobre ponen, es decir que su representación equivale únicamente a la mitad de su emisión real. Esta condición no afecta la estimación de emisiones y es un efecto netamente gráfico.

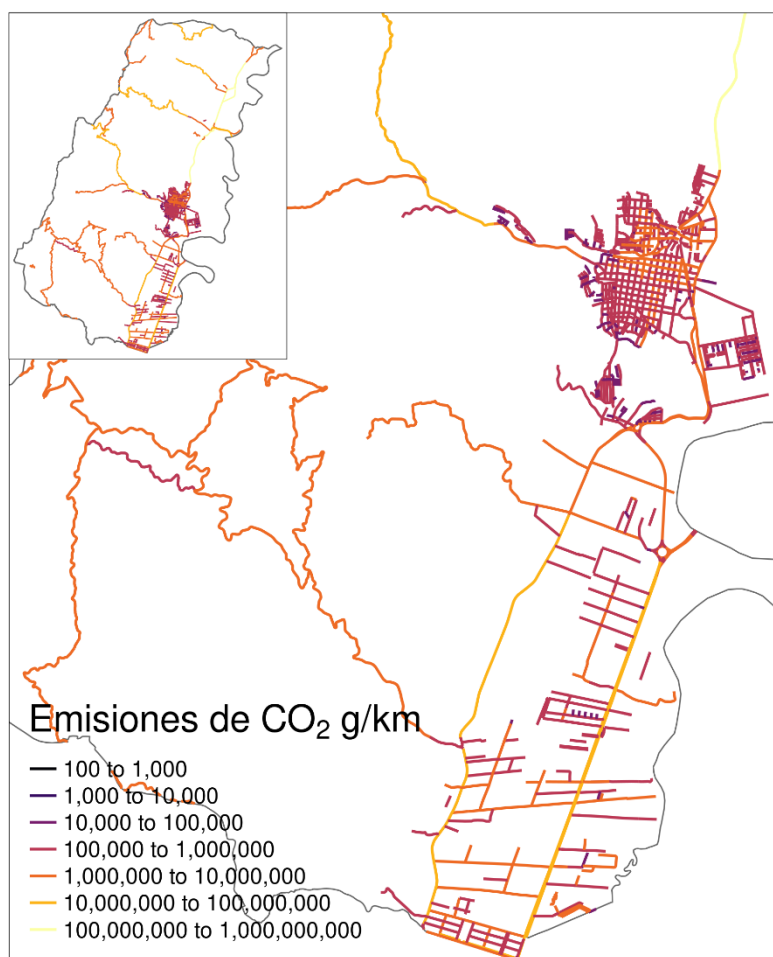


Figura 23. Emisiones de CO₂ en un día típico por tramo vial.

Fuente: Elaboración propia

Para el cálculo de las emisiones totales durante el año base 2021, se realizó una expansión de los días aforados al mes de noviembre, conforme a la cantidad de días de cada tipo según la **Tabla 22**.

Tabla 22. Relación de expansión de emisiones para el mes de noviembre

Tipo de día	Representado por	Número de días en noviembre
Domingos y Festivos	Domingo	6
Lunes	Típico	16
Martes		
Miércoles		
Jueves		
Viernes	Viernes	4
Sábado	Sábado	4

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, a partir de la variabilidad del consumo de combustible mes a mes con relación al noviembre, se determinó el factor de expansión de los demás meses del año, y se realizó la estimación de emisiones totales de la **Tabla 23** de acuerdo con la **Ecuación 8**.

$$E_i = \sum_{m=1}^{12} E_{i,N} * \frac{C_m}{C_N} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde,

E_i , Emisión del contaminante i en el año 2021

$E_{i,N}$, Emisión del contaminante i en el mes de noviembre

C_m , Total del consumo de combustibles líquidos en el mes m del 2018

C_N , Total del consumo de combustibles líquidos en el mes de noviembre del 2018

Tabla 23. Emisiones atmosféricas totales por fuentes móviles en Yumbo.

Contaminante	Emisiones (t/año)
BC	38
CH ₄	124
CO	10,086
CO ₂	214,413
NO _x	1,267
N ₂ O	8
NO ₂	116
PM ₁₀	125
PM 2.5	112
SO ₂	4
COV	2,670
COVNM	2,548

Fuente: Elaboración propia.

Emisiones vehiculares por tipo de vehículo

En la **Figura 24** es posible apreciar la contribución que tienen las motocicletas en las emisiones de contaminantes como el CH₄, CO, COV y COVNM, en donde este tipo de vehículos aportan entre el 71-84% de las emisiones de los contaminantes mencionados, es probable que esto se deba al alto número de motocicletas que hacen parte del parque automotor del municipio. Por otro lado, los vehículos particulares, tienen participación en la gran mayoría de los contaminantes especialmente en N₂O, SO₂ y CO₂ esto relacionado a los kilómetros recorridos totales de este tipo de vehículos con cerca del 30% de los VKT totales, solo superados por las motocicletas. Las emisiones de contaminantes como el BC son asociadas en un 64% a los camiones y buses, en donde los buses aportan la mayoría

de las emisiones (34%), seguidos de los camiones de 2 ejes (19%) y los de 3-4 ejes (10%). Los resultados desagregados de emisiones se encuentran disponibles en el Anexo G.

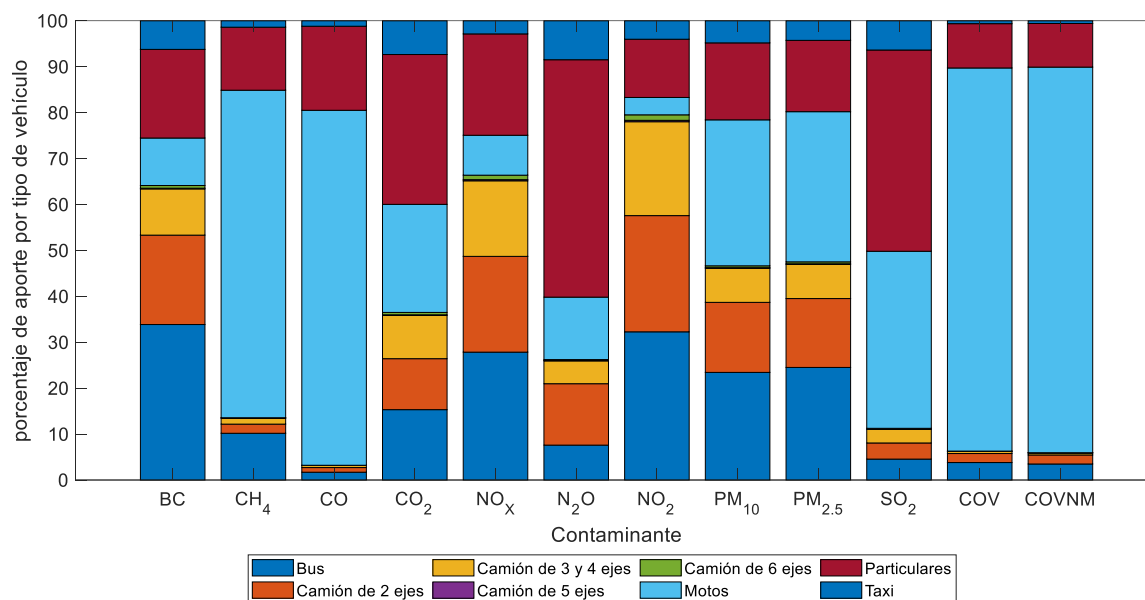


Figura 24. Emisiones vehiculares por tipo de vehículo y contaminante.

Fuente: Elaboración propia.

Emisiones por tipo de combustible

La **Figura 25** muestra la contribución porcentual de cada tipo de combustible a las emisiones totales de cada contaminante. Se puede apreciar que los vehículos que consumen Diesel, en su mayoría buses y vehículos pesados, tienen un aporte relevante de BC (89%), NO_x (70%), PM₁₀ (64%), PM_{2.5} (61%), NO₂ (87%) y menos del 15% para los contaminante CH₄, CO, SO₂, COV y COVNM. En contraste, la combustión de la gasolina aporta en mayor proporción CO (96%), SO₂(86%), COV (93%), COVNM (94%), CH₄ (85%), CO₂ (52%), N₂O (72%), y para el resto de los contaminantes un aporte <40%. Respecto al GNV sus aportes porcentuales a la emisión de cada contaminante son inferiores al 2%, exceptuando CH₄ y CO₂ con 7,5% y 3.1% respectivamente.

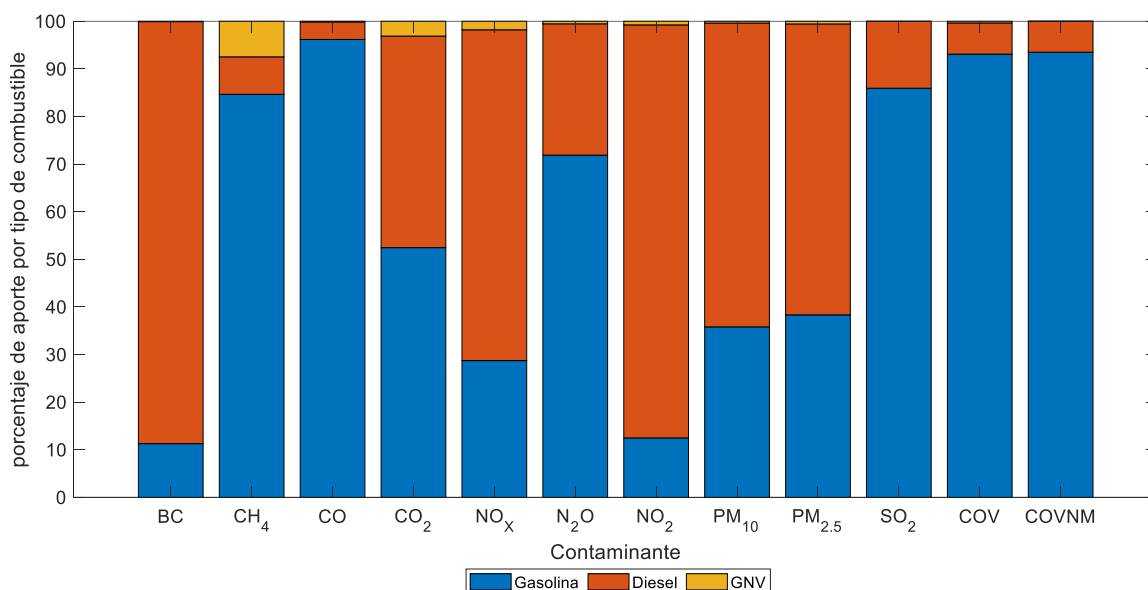


Figura 25. Emisiones de contaminantes por tipo de combustible consumido.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez obtenidos los resultados de estimación de las emisiones anuales de CO₂ por los diferentes métodos de cálculo (**Figura 26**) se pudo observar que las emisiones por Top-Down basada en la actividad vehicular por CDA, presenta una estimación inferior a la metodología Bottom-Up y la estimación Top-Dow SICOM en un 46% y 60%, respectivamente. Mientras que la estimación por Bottom-up es el 74% de lo estimado por la metodología Top-Down SICOM.

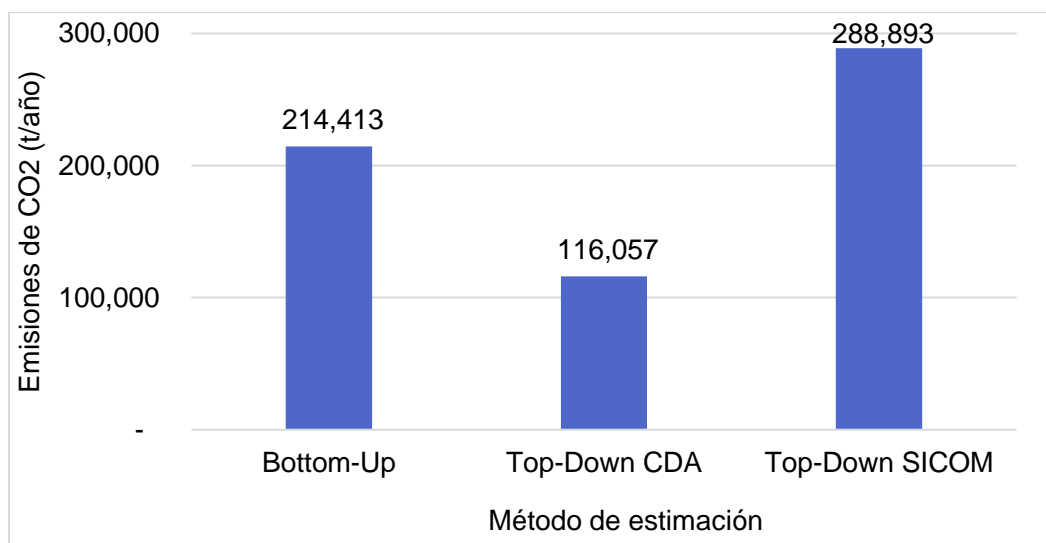


Figura 26. Comparativo de estimación emisiones por enfoques empleados

Fuente: Elaboración propia.

3. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Este estudio abordó la estimación de emisiones por fuentes móviles del municipio de Yumbo a partir de una aproximación Top-Down, basada en la actividad vehicular agregada por tipología vehicular, obtenida a partir de los datos de los CDA y utilizando factores de rendimiento y emisiones agregados de la UPME; así mismo, se utilizó una aproximación Bottom-Up que estima la actividad vehicular a partir de la distribución en la malla vial de los aforos del flujo vehicular, y factores de emisión obtenidos para las condiciones locales del municipio, usando el modelo COPERT. La aproximación Bottom-Up nos permitió obtener las emisiones de 12 contaminantes incluidas las de CO₂ que son las estimadas de la aproximación Top-Down.

Cada método de estimación de emisiones tiene sus ventajas y desventajas, frente al propósito de conocer con algún grado de certeza las emisiones por fuentes móviles en el municipio. Por un lado, las emisiones estimadas a partir de la actividad vehicular obtenida del procesamiento de la base de datos los CDA, asume que la muestra de vehículos que hacen la revisión técnico-mecánica en los CDA del municipio es representativa de la flota vehicular que circula. Esto no es completamente cierto, ya que existe un alto grado de evasión en la revisión técnico-mecánica en motocicletas, y además esto se les exige únicamente a los vehículos particulares que tienen 6 años o más. De igual forma, la estimación Top-Down asume que la flota que circula en el municipio es aquella que está registrada en la autoridad de tránsito del municipio. Este supuesto es común en la aproximación Top-Down (usado en la estimación de la actividad vehicular total) y Bottom-Up (para la estimación de los factores de emisión). Sin embargo, reconocemos que, por dinámicas metropolitanas y regionales, es muy común encontrar en Yumbo, vehículos registrados en Cali u otros municipios de la región. Es por esto que, la actividad vehicular total de los vehículos en la aproximación Top-Down, que considera únicamente la flota vehicular registrada puede resultar en una subestimación de las emisiones. En este sentido, la actividad vehicular estimada a partir de los aforos del flujo vehicular es una aproximación más certera.

En la misma línea de análisis, también tenemos incertidumbre en la obtención de los factores de emisión utilizando la herramienta COPERT, que ha sido desarrollada para los países europeos, que, aunque permite la personalización de la mayoría de los parámetros usados, puede en ocasiones no reflejar condiciones de conducción, mantenimiento de flota vehicular e infraestructura propia de ciudades latinoamericanas. No obstante, el modelo COPERT ha sido utilizado de manera extensa en esta región.

Ahora bien, frente a las estimaciones reportamos que la estimación de emisiones de CO₂ a partir del enfoque Top-Down basado en las ventas de combustibles reportadas en el SICOM, fue cerca de 1.3 veces más alta que la estimación a partir del enfoque Bottom-Up y 2.5 veces mayor que la estimación Top-Down basada en la actividad vehicular obtenidas en los CDA. Esto puede estar relacionado con varios motivos, por un lado, las ventas de combustible de la planta de distribución mayorista de combustible ubicada en el municipio, otra hipótesis puede estar relacionada con las ventas a

vehículos de carga que realizan sus rutas hacia el Puerto de Buenaventura, y por último una mayor venta de la estimada destinada a la agroindustria, no solo del municipio si no de algunos más cercanos.

La diferencia entre las estimaciones emisiones de CO₂ mediante enfoque Bottom-Up y Top-Down basado en CDA, se pueden deber a un subregistro del parque automotor del municipio, donde posiblemente sólo 2 de 5 de los vehículos que circulan en el municipio están registrados en este.

Las emisiones asociadas a los vehículos particulares (automóviles, camionetas, camperos y motos) representan en algunos contaminantes como CH₄, CO, SO₂, COV y COVNM más del 80% de las emisiones totales, lo que está directamente relacionado con el consumo de gasolina, ya que este combustible presenta una contribución similar a la emisión de estos contaminantes.

En cuanto a los contaminantes generados por los vehículos de carga y buses, se tienen que alrededor del 64% del BC es aportado por estos, el 66% de NO_x, el 80% de NO₂, y el 47% y 48% del PM₁₀ y el PM_{2.5} respectivamente, vehículos que usan en su mayoría diesel como combustible.

Por su parte los vehículos tipo “taxi”, no presentan una mayor participación en la emisión de contaminantes, teniendo su mayor aporte en las emisiones de SO₂, CO₂ y N₂O, con aportes alrededor del 7% de cada uno de estos.

Revisando el perfil diario de emisiones de cada contaminante, se puede evidenciar magnitudes de emisión similar entre el día viernes y el jueves (día típico), estos dos días presentan un comportamiento similar en la mañana, sin embargo, en las horas de la tarde el día típico presenta una mayor emisión que el día viernes. Para los días Sábado y Domingo, de manera general se presenta una reducción de emisiones, sin embargo en aquellos contaminantes que presentan su mayor emisión en vehículos a gasolina, no presentan una reducción tan significativa, comparada con la reducción de los contaminantes que están asociados a los vehículos que emplean diesel.

4. BIBLIOGRAFIA

- AMVA, & UPB. (2019). *Actualización inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá - Año 2018*.
- Cuza-Sorolla, A., Hernández-Aguilar, M. L. and Barrera-Rojas, M. Á.: Aplicación de polígonos de Thiessen para definición y análisis de zonas de influencia del sistema de salud en ciudades costeras del estado de Quintana Roo, *Rev. Estud. Territ.*, 23, 49–71
https://www.redalyc.org/journal/401/40167332003/html/#redalyc_40167332003_ref1, 2021.
- DANE-Departamento Administrativo de Estadística. 2020. Evidencias del desarrollo socioeconómico del Valle de Cauca. Disponible en el URL: <https://cutt.ly/tv5QQGE>
- Emisia SA. Conscious of Transport's Impact. (2021). COPERT Versions | Emisia SA. Disponible en: <https://www.emisia.com/utilities/copert/versions/> Ghorbani, H.: Mahalanobis Distance and Its Application for Detecting Multivariate Outliers, *Facta Univ. Ser. Math. Informatics*, 583, <https://doi.org/10.22190/fumi1903583g>, 2019.
- Yumbo cómo vamos: Informe de calidad de vida - 2021, Yumbo. <http://www.yumbocomovamos.org/>, last access: 25 February 2022, 2021.
- Calculadora FECOC 2016 (Factores de Emisión de los combustibles colombianos): http://www.upme.gov.co/calculadora_emisiones/aplicacion/calculadora.html
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY [EPA] (1998). Emissions Factors & AP-42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors#5thed>
- EPA, U. S. (2008). *Transportation and Marketing of Petroleum Liquids*. Washington D.C.: United States Environmental Protection Agency.
- Kawashima, A.B., de Morais, M.V.B., Martins, L.D., Urbina, V., Rafee, S.A.A., Capucim, M.N. and Martins, J.A. (2015) Estimates and Spatial Distribution of Emissions from Sugar Cane Bagasse Fired Thermal Power Plants in Brazil. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 3, 72-76. <http://dx.doi.org/10.4236/gep.2015.36012>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Guía para la Elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas. Recuperado el 30 de agosto de 2021 de: http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf

5. ANEXOS

ANEXO A. ANALISIS ESTADISTICO DE LOS CDA

ANEXO B. PERFIL HORARIO POR DÍA PARA CADA PUNTO DE AFORO

ANEXO C. DESAGREGACIÓN HORARIA Y POR TIPO DE VÍA DE LOS KILÓMETROS RECORRIDOS POR TIPO DE VEHÍCULO

ANEXO D. DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO COPERT DE LA FLOTA VEHICULAR EN YUMBO, SIN TAXIS

ANEXO E. DATOS DE ENTRADA PARA EL MODELO COPERT DE LA FLOTA DE TAXIS EN YUMBO

ANEXO F. FACTORES DE EMISIÓN PARA LA FLOTA VEHICULAR DE YUMBO

ANEXO G: DESAGREGACIÓN HORARIA DE EMISIONES POR TIPO DE VEHÍCULO.