

**Asistencia técnica para modelo de inventario de emisiones atmosféricas de fuentes móviles
año base 2016 en el Área Metropolitana de Bucaramanga**

Laura Andrea Joya Vargas

ID. 000284092

Universidad Pontificia Bolivariana

Facultad Ingeniería Ambiental

Bucaramanga

2018

**Asistencia técnica para modelo de inventario de emisiones atmosféricas de fuentes móviles
año base 2016 en el Área Metropolitana de Bucaramanga**

Laura Andrea Joya Vargas

ID. 000284092

Director Académico

Kento Taro Magara Gómez

Profesor Asociado

Facultad Ingeniería Ambiental

Director Empresarial

Jaiverth Leandro López Gonzales

Ingeniero Ambiental

Universidad Pontificia Bolivariana

Facultad Ingeniería Ambiental

Bucaramanga

2018

Dedicatoria

A mi madre, quien fue ejemplo de honestidad, dedicación y sacrificio, y sin cuyo apoyo y esfuerzo esta meta no habría sido posible. A mi familia, quienes me brindaron su aliento en los momentos más difíciles de mi carrera. A todos ustedes, este reconocimiento por su aporte en esta meta que he logrado alcanzar.

Agradecimientos

A Dios, quien me ha puesto en este camino, y me ha dado la fortaleza y la sabiduría para seguir adelante ante los retos que se presentaron en este camino.

A mi adorada madre Herminia Vargas Díaz por su sacrificio y esfuerzo, por regalarme la mejor herencia que puede dar un padre, por brindarme su comprensión, cariño y amor día tras día.

A mi adorada abuelita Haydee Valero Díaz por haberme aportado muchas cosas desde pequeña y quien con sus palabras de aliento no me dejó decaer, me animo a seguir adelante con perseverancia tras mis ideales.

A todos mis familiares mi tía Luz Marina Vargas Díaz, mi tío Víctor Hugo Rueda Valero, primos y primas, gracias por haber contribuido positivamente a este logro.

A todos los profesores que me asesoraron en el transcurso de la carrera; porque cada uno, con sus valiosas aportaciones, me ayudaron a crecer como persona y como futura profesional.

Al equipo de trabajo en la práctica, primeramente, al profesor Kento Taro Magara Gómez y los ingenieros a cargo Daniela Camacho y Leandro López, gracias por su apoyo incondicional y por esta gran oportunidad de preparación académica.

A mis compañeros y amigos presentes y pasados, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas. Y a todas aquellas personas que estuvieron a mi lado apoyándome y lograron que este sueño se haga realidad.

Contenido

	Pág.
Introducción	2
1. Objetivos	5
1.1 Objetivo general	5
1.2 Objetivos específicos	5
2. Generalidades de la empresa.....	6
2.1 Presentación de la universidad.....	6
2.2 Identidad bolivariana	6
2.3 Presentación del centro de investigación e innovación (CIDI).....	6
2.4 Presentación del grupo de investigaciones ambientales sede Medellín.....	7
2.5 Presentación del grupo de investigaciones en ingeniería ambiental y sanitaria sede Bucaramanga (GINSA).....	9
3. Alcance	11
4. Cronograma de actividades.....	12
5. Marco teórico	13
5.1 Modelo LEAP	13
5.1.1 Estructura del modelo LEAP	13
5.1.2 Variables de entrada del modelo LEAP.....	14
5.1.3 Variables de salida del modelo LEAP	16
5.2 Modelo de tránsito terrestre “Eggleston”	19

5.3 Determinación del tránsito vehicular	21
5.3.1 Selección de la red vial de tránsito	21
6. Metodología	24
6.1 Datos de entrada requeridos por el modelo LEAP.....	24
6.1.1 Existencia y ventas de vehículos.....	25
6.1.2 Perfil de antigüedad de los vehículos.....	30
6.1.3 Kilometraje	32
6.1.4 Rendimiento de combustible.....	35
6.1.5 Factores de emisión.....	36
7. Resultados y discusión	41
7.1 Parque automotor	41
7.2 Demanda de energía.....	45
7.3 Emisiones de contaminantes criterio	48
7.4 Emisiones de gases efecto invernadero.....	55
7.5 Aforos vehiculares	62
8. Conclusiones y recomendaciones	64
Referencias bibliográficas.....	66
Apéndices.....	67

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Datos generales del modelo LEAP	14
<i>Figura 2.</i> Metodología para la desagregación y simulación de emisiones vehiculares.....	20
<i>Figura 3.</i> Red vial ilustrativa.....	22
<i>Figura 4.</i> Balance para el cálculo de flujo vehicular	22
<i>Figura 5.</i> Estructura metodológica del parque automotor del AMB en LEAP	25
<i>Figura 6.</i> Perfiles de antigüedad vehicular	31
<i>Figura 7.</i> Distancia anual recorrida en el primer año del vehículo (VKT ₀)	33
<i>Figura 8.</i> Perfiles de degradación del kilometraje anual	34
<i>Figura 9.</i> Rendimiento promedio del combustible	36
<i>Figura 10.</i> Vehículos registrados en las secretarías de movilidad.....	41
<i>Figura 11.</i> Composición del parque automotor	42
<i>Figura 12.</i> Edad del parque automotor	45
<i>Figura 13.</i> Demanda de gasolina y diésel en el área metropolitana de Bucaramanga	46
<i>Figura 14.</i> Demanda de energía real (UPME) y estimada (LEAP).....	47
<i>Figura 15.</i> Demanda energética por categoría vehicular	48
<i>Figura 16.</i> Distribución de emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular	50
<i>Figura 17.</i> Distribución de contaminantes criterio por tipo de combustible	51
<i>Figura 18.</i> Distribución de emisiones de GEI por categoría vehicular	57
<i>Figura 19.</i> Distribución de emisiones de GEI por tipo de combustible	58

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Cronograma de actividades</i>	12
Tabla 2. <i>Clasificación de vehículos</i>	26
Tabla 3. <i>Existencias y ventas de vehículos en el AMB, año base 2016</i>	27
Tabla 4. <i>Distribución de vehículos por cilindraje</i>	28
Tabla 5. <i>Condiciones para los factores de emisión base</i>	38
Tabla 6. <i>Factores de corrección disponibles para los factores de emisión base</i>	38
Tabla 7. <i>Factores de emisión de CO₂ y SO₂</i>	39
Tabla 8. <i>Parque automotor por tamaño y categoría</i>	43
Tabla 9. <i>Emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular</i>	49
Tabla 10. <i>Emisiones de contaminantes criterio per cápita por categoría vehicular</i>	49
Tabla 11. <i>Emisiones de contaminantes criterio por tipo de combustible, año 2016</i>	51
Tabla 12. <i>Emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular, tamaño y tipo de combustible</i>	52
Tabla 13. <i>Emisiones de gases de efecto invernadero por categoría vehicular</i>	55
Tabla 14. <i>Emisiones de gases de efecto invernadero per cápita por categoría vehicular</i>	56
Tabla 15. <i>Emisiones de gases de efecto invernadero por tipo de combustible</i>	58
Tabla 16. <i>Emisiones de GEI por categoría vehicular, tamaño y tipo de combustible</i>	59
Tabla 17. <i>Puntos de aforos vehiculares</i>	62

Lista de apéndices

	Pág.
Apéndice A. Solicitud de información del parque automotor registrado en el municipio	67
Apéndice B. Registro de los trece aforos vehiculares realizados y registro fotográfico de los aforos realizados	74

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: Asistencia técnica para modelo de inventario de emisiones atmosféricas de fuentes móviles año base 2016 en el Área Metropolitana de Bucaramanga.

AUTOR(ES): Laura Andrea Joya Vargas

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR(A): Kento Taro Mágara Gómez

RESUMEN

La práctica empresarial se desarrolló en el marco del Convenio de Asociación No 000195 de 2017 entre el Área Metropolitana de Bucaramanga y la Universidad Pontificia Bolivariana; tuvo como principal objetivo apoyar la construcción de la línea base para realizar la elaboración del inventario de emisiones atmosféricas provenientes de las fuentes móviles en el Área Metropolitana de Bucaramanga año base 2016, caracterizando el parque automotor teniendo en cuenta variables como el tipo de vehículo, cilindraje, modelo y tipo de combustible. Durante la práctica también se estimó la demanda de energía y la emisión de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero, a través de el "Sistema de Planteamiento de Alternativas Energéticas a Largo Plazo" (LEAP - Long-range Energy Alternatives Planning System). Como parte de los resultados se encontró que en el Área Metropolitana de Bucaramanga circulan aproximadamente 521.000 vehículos, especialmente motocicletas con un 65%. Desde el análisis de los contaminantes criterio se encontró que los autos particulares contribuyen significativamente a las emisiones de CO y SOX, con aportes del 65% y 56%, respectivamente; así mismo con emisiones de NOX y VOC alrededor del 20%. La flota vehicular del Área Metropolitana de Bucaramanga tiene un aporte de gases invernadero de 1.005.422 toneladas de CO₂-eq en el año base 2016. A partir de los resultados se formularon lineamientos para lograr una mejor gestión del recurso aire.

PALABRAS CLAVE:

Emisiones atmosféricas, parque automotor, fuentes móviles, contaminantes criterio, modelo LEAP.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: Technical assistance for inventory model atmospheric emissions of mobile sources base year 2016 in the Metropolitan Area of Bucaramanga.

AUTHOR(S): Laura Andrea Joya Vargas

FACULTY: Facultad de Ingeniería Ambiental

DIRECTOR: Kento Taro Mágara Gómez

ABSTRACT

The development of the business practice was carried out in agreeance with the 2017 Association Agreement No. 000195 between the Metropolitan Area of Bucaramanga and the Pontificia Bolivariana university. Its main purpose was to support the creation of the linear base for the development of the 2016 atmospheric, automotive emission inventory, which characterized the auto motor park by keeping in mind a variety of variables such as the type of vehicle, cylinder capacity, model and fuel type. Estimates were made during the procedure measuring the energy demand, emission of criteria pollutants and greenhouse gases utilizing the (LEAP - Long-range Energy Alternatives Planning System) model. As part of the results, it was found that approximately 521.000 vehicles circulate the metropolitan area of Bucaramanga, especially motorcycles which make up 65% of all vehicles in the city. The analysis of criteria pollutants revealed that private cars contribute significantly to the CO and SOX emissions by 65% and 56%, which also happens with the NOX and VOC emissions, by approximately 20%. The vehicle fleet in Bucaramanga and its metropolitan area's greenhouse gas emission is of 1.005.422 tons of CO₂-eq in the base year of 2016. Guidelines for better air quality management were created based on the results.

KEYWORDS:

Atmospheric emissions, vehicle fleet, mobile sources, criteria pollutants, LEAP model.

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

Introducción

El presente documento constituye el informe final de la práctica empresarial “ASISTENCIA TÉCNICA PARA MODELO DE INVENTARIO DE EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE FUENTES MÓVILES AÑO BASE 2016 EN EL ÁREA METROPOLITANA DE BUCARAMANGA”, y contiene el consolidado de las actividades desarrolladas en el transcurso de los cuatro meses como estudiante practicante.

El Área Metropolitana de Bucaramanga está conformada por los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta. Cuenta con 1'107.546 habitantes aproximadamente y tiene una extensión de 1165,86 Km² entre suelo rural y suelo urbano. En la actualidad presenta un fuerte crecimiento poblacional lo que se evidencia en la alta tasa de licencias de construcción.

En este informe se presentan los resultados del inventario de emisiones atmosféricas de fuentes móviles año base 2016, el cual consistió básicamente en la clasificación del parque automotor de los cuatro municipios pertenecientes al área de la siguiente manera: clase de vehículo (automóvil, bus, camión, etc.), servicio (particular, público, oficial y diplomático), modelo (año-modelo del vehículo), cilindraje (valor relativo al tamaño del motor), combustible (gasolina, diésel, GNV, gas-gasolina) y estado (activo, inactivo, robado, etc.). Mediante la información recogida se estimaron las emisiones de contaminantes criterio y gases de efecto invernadero. Adicionalmente, se calculó la demanda energética del parque automotor del área metropolitana de Bucaramanga.

El inventario de emisiones contaminantes atmosféricas resulta importante ya que brinda información reciente sobre estudios al respecto, permite formular y desarrollar proyectos ambientales y definir políticas de prevención y control de la calidad del aire por parte de la

autoridad ambiental del Área Metropolitana de Bucaramanga. Así mismo, contribuye en el mantenimiento de convenios y alianzas entre la universidad, la empresa y el estado, como el establecido entre el Área Metropolitana de Bucaramanga y la Universidad Pontificia Bolivariana. Por su parte los grupos de investigación GIA y GINSA les permiten trascender sus propuestas y contribuir en el mejoramiento de las políticas ambientales.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Apoyar la construcción de la línea base con la información requerida para realizar el inventario de emisiones de contaminantes de criterio generados por fuentes móviles en el área metropolitana de Bucaramanga.

1.2 Objetivos específicos

- Construir la base de datos con información de los inventarios de gases criterio de fuentes móviles del 2016.
- Determinar los factores de emisión del parque automotor por medio del modelo energético de largo tiempo (LEAP por sus siglas en ingles).
- Evaluar el aporte de gases y partículas liberadas por las fuentes móviles.
- Identificar las zonas de mayor impacto de las emisiones atmosféricas de fuentes móviles en el área metropolitana.

2. Generalidades de la empresa

2.1 Presentación de la universidad

La universidad Pontificia Bolivariana fue fundada el 15 de septiembre de 1936 con el nombre de universidad Católica Bolivariana; posteriormente accedió al nombre de Pontificia Bolivariana el 16 agosto de 1945 por decreto firmado en Roma. Cuenta con personería jurídica N° 48 del 22 de febrero de 1937, expedida por el Ministerio de Gobierno.

2.2 Identidad bolivariana

Es misión de la universidad la formación integral de todas las personas que la conforman, propiciando el desarrollo de sus potencialidades humanas: pensamiento, creatividad, lenguaje, criticidad, libertad, solidaridad, responsabilidad y sociabilidad, con base en los valores del humanismo cristiano.

Por consiguiente, la universidad Pontificia Bolivariana promueve el desarrollo integral del hombre como ser pensante, social, ético, religioso, artístico, político y dador de sentimiento humanista a su entorno a través de un proceso de continuo mejoramiento.

2.3 Presentación del centro de investigación e innovación (CIDI)

La universidad Pontificia Bolivariana, consciente de su misión transformadora del ser humano y de la sociedad, ha dado, desde hace 40 años, un lugar prioritario a la investigación como un

macroproceso de valor que propicia la profundización del conocimiento y su transferencia, y contribuye al desarrollo del entorno social y empresarial a partir del fortalecimiento de las alianzas con los sectores productivos, la empresa y el Estado.

La investigación y la innovación son argumentos fundamentales en el proceso de desarrollo de la universidad. Con esta intencionalidad cada grupo logra su crecimiento y desarrollo estratégico a partir de una orientación de las líneas de investigación, en consonancia con los planes regionales y nacionales de ciencia y tecnología, y con los programas internacionales de cooperación para la investigación. Adicionalmente la universidad Pontificia Bolivariana incentiva los programas estratégicos de transferencia (PET), los cuales buscan fomentar la interdisciplinariedad entre los grupos de investigación con el diseño y la ejecución de proyectos que involucran el saber de las distintas disciplinas que intervienen en ellos.

La garantía y sello de calidad se otorga a partir del cumplimiento de la norma ISO 9001:2000 a la gestión de proyectos de investigación y transferencia de conocimiento, certificación que a 2013 ha sido renovada en cuatro oportunidades, garantizando el mejoramiento continuo enmarcado en la cultura de la calidad.

Es un compromiso de presente y futuro, ser una institución destacada en el medio universitario por realizar investigación aplicada desde los principios del humanismo cristiano, aportando a la transformación social y humana.

2.4 Presentación del grupo de investigaciones ambientales sede Medellín

El grupo de investigaciones ambientales – GIA – de la universidad Pontificia Bolivariana es una de las 35 unidades de trabajo con las que cuenta el Centro de Investigación para el

Desarrollo y la Innovación (CIDI). Tiene su origen en el año 1974 con la creación del laboratorio de medición ambiental y el surgimiento de los posgrados en ciencias del ambiente en la década de los 80's. En la década de los 90's se consolida como grupo de investigaciones ambientales (GIA), teniendo como objetivo principal la contribución al desarrollo regional y la protección del medio ambiente. Durante este recorrido, el GIA ha fortalecido su desempeño con una intensa labor de investigación, formación académica, asesoría y servicios, planteando y aportando alternativas en el diagnóstico y solución de problemas ambientales, lo que le ha valido un reconocido prestigio en el ámbito nacional.

Líneas de investigación

- Línea de estudios atmosféricos
- Línea de valorización y gestión de residuos
- Línea de reúso y uso eficiente del agua
- Línea de gestión ambiental

Laboratorio ambiental: con más de 110 parámetros en las diferentes matrices ambientales acreditado por el IDEAM.

El GIA es reconocido además por COLCIENCIAS y por el sistema de calificación de grupos de la universidad como A1, ya que es un grupo consolidado que encamina sus acciones a la excelencia.

2.5 Presentación del grupo de investigaciones en ingeniería ambiental y sanitaria sede Bucaramanga (GINSA)

El GINSA tiene por misión el desarrollo de investigaciones sanitarias y ambientales, que conlleven a prevenir, solucionar y mitigar problemas a través de propuestas estratégicas, metodologías y tecnológicas que conduzcan al desarrollo social, ambiental, económico y político de la región, bajo los principios ético humanísticos que orientan la universidad Pontificia Bolivariana.

Objetivos

Optimizar los mecanismos de evaluación y seguimiento de las actividades científicas y tecnológicas que se desarrollan dentro del núcleo.

Generar recursos económicos que garantice la auto sostenibilidad del GINSA. Fomentar la capacitación de talento humano en el área ambiental.

Realizar investigaciones enmarcadas dentro de las políticas ambientales regionales.

Incentivar en el estudiante de Ingeniería Sanitaria y Ambiental el espíritu investigativo a través de su participación el semillero de investigación.

Establecer alianzas interinstitucionales para el desarrollo y financiación de la investigación.

Divulgar los resultados de las investigaciones ante la comunidad científica e industrial regional y nacional.

El GINSA está reconocido por COLCIENCIAS en categoría B, como grupo consolidado que encamina sus acciones a la excelencia.

Líneas de investigación

- Aire.
- Biodiversidad.
- Educación ambiental.
- Manejo y conservación del recurso hídrico.
- Suelos.

3. Alcance

Realizar el inventario de emisiones atmosféricas de fuentes móviles para los cuatro municipios pertenecientes al área metropolitana de Bucaramanga (Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta), para contaminantes criterios (CO, NO_x, SO_x, y material particulado) tomando como año base el 2016, empleando el modelo energético para estimar las emisiones de fuentes móviles (LEAP).

4. Cronograma de actividades

Tabla 1. Cronograma de actividades

Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
Recopilar información para caracterizar el parque automotor del área metropolitana Bucaramanga: la información incluye aforos de vehículos en peajes y principales vías del área metropolitana de Bucaramanga, venta de vehículos (concesionarias) y centro de diagnóstico automotriz (CDA).				
Realizar conteo o aforo de vehículos con base en videos de vigilancia y cámaras de foto multas en el área de Bucaramanga				
Capacitarse en el uso del software MYSQL server como sistema de gestión de bases de datos				
Capacitarse en el modelo LEAP (long-range energy alternatives planning systemy).				
Aplicar la metodología Top Down utilizando el modelo LEAP (long-range energy alternatives planning systemy). Segregar la información del parque automotor en tres niveles: sector, sub-sector y uso final				

Fuente: Autor

5. Marco teórico

5.1 Modelo LEAP

El “Sistema de Planteamiento de Alternativas Energéticas a Largo Plazo” (LEAP - *Long-range Energy Alternatives Planning System*), es un modelo de simulación de tipo *bottom-up* que permite el desarrollo de estudios de planeamiento energético integral y de mitigación de gases de efecto invernadero y otros contaminantes del aire. Fue desarrollado por el *Stockholm Environment Institute* (SEI) y ha sido adoptado por cientos de organizaciones en más de 150 países, cuyos usuarios incluyen agencias gubernamentales, academias, organizaciones no gubernamentales y compañías consultoras. Este software es de uso libre para instituciones académicas y gubernamentales ubicadas en países en vía de desarrollo (Heaps, 2012).

5.1.1 Estructura del modelo LEAP

El modelo LEAP se desagrega en un árbol jerárquico de cuatro niveles: sector, sub-sector, uso final y dispositivos. En el caso del sector transporte, el análisis se centra en el uso final, donde la demanda de energía puede ser calculada como el producto del nivel de actividad y la intensidad energética. El nivel de actividad depende de factores como el número de vehículos y el kilometraje recorrido, mientras la intensidad energética depende de la eficiencia energética del vehículo. Las emisiones del vehículo pueden ser calculadas como el producto de la demanda de energía o los kilómetros recorridos por factores de emisión, los que a su vez dependen de la tecnología del vehículo y el tipo de combustible (AMVA-UPB, 2013). En la figura 1 Se presenta un esquema de datos generales de entrada y salida del modelo LEAP.

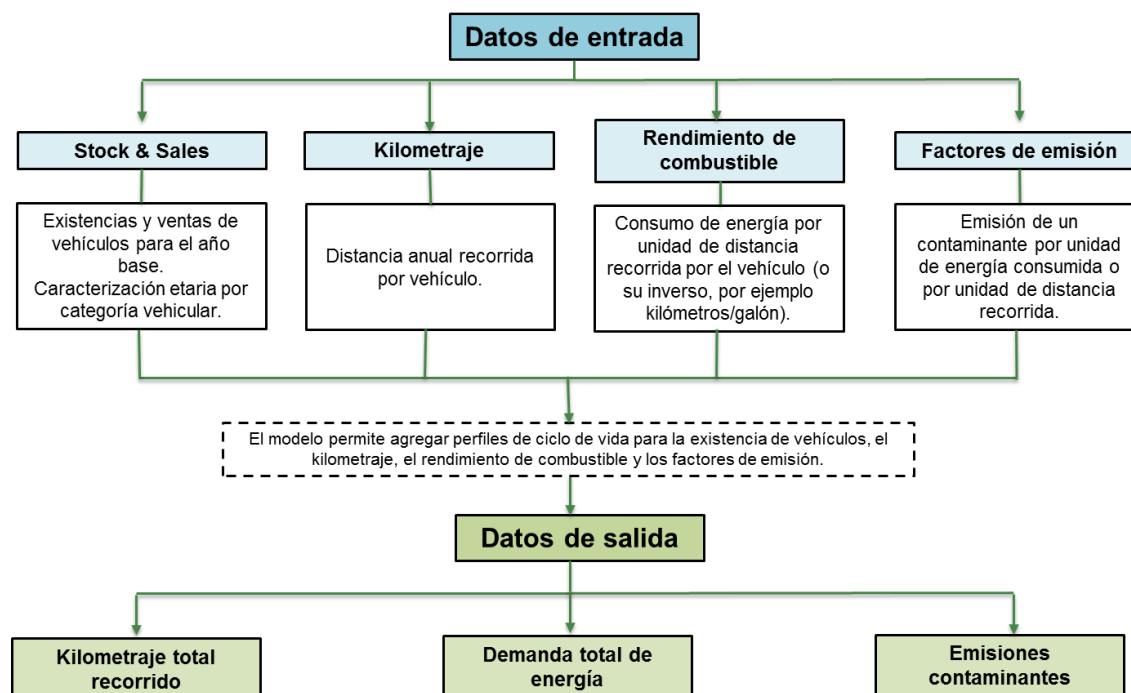


Figura 1. Datos generales del modelo LEAP

Fuente: AMVA-UPB. (2013)

5.1.2 Variables de entrada del modelo LEAP

Principales variables del modelo LEAP para el análisis del transporte automotor (Heaps, 2012) (AMVA-UPB, 2013).

- **Existencias (STOCK) y ventas (SALES)**

Cuando se llevan a cabo Análisis de Transporte o Análisis de Existencias en el modelo LEAP, es necesario especificar información acerca de las existencias (*stock*) y ventas (*sales*) de vehículos. Esta información es útil cuando se quiere modelar el costo de una nueva tecnología o en situaciones en que se quiere modelar como una nueva eficiencia energética, rendimiento de combustible o estándar de emisión se trasladará a una mejora gradual en el parque automotor.

De este modo, para el escenario base (*Current account*) se especifican las existencias de vehículos en el año base y un perfil de ciclo de vida describiendo la distribución de esos vehículos, junto con las ventas de vehículos en el año base.

- **Kilometraje (Mileage)**

El kilometraje se define como la distancia anual recorrida por un vehículo. El modelo permite seleccionar entre varias unidades de longitud estándar y especificar un perfil de ciclo de vida describiendo cómo cambia el kilometraje y cuándo el vehículo envejece. Sin embargo, si no se tiene información, el perfil se deja como un valor constante por defecto.

Cuando se introduce la información sobre el kilometraje, es importante especificar los valores históricos para que el modelo calcule adecuadamente el valor promedio para las existencias en el año base, pues si se introduce un solo valor el modelo asume que el mismo valor se aplica a todos los vehículos vendidos en los años previos.

- **Rendimiento de combustible (Fuel Economy)**

El rendimiento de combustible se define como el consumo de energía por unidad de distancia recorrida por el vehículo (o su inverso, por ejemplo, kilómetros/galón). En el escenario base se puede seleccionar varias unidades estándar que incluyen millas/galón, litros/kilómetro, MJ/km, entre otras.

Adicionalmente se puede especificar un perfil de ciclo de vida que describa cómo el rendimiento de combustible disminuye a medida que el vehículo envejece. Aquí se debe tener cuidado, pues en el caso de un rendimiento en unidades de distancia/volumen de combustible, el perfil de ciclo de vida debe ser constante o disminuir, y en el caso de datos especificados en

unidades de volumen de combustible/distancia, el perfil debe ser constante o aumentar. En caso de no tener información sobre cómo el rendimiento de combustible varía con el tiempo, el perfil de ciclo de vida se deja como un valor constante por defecto.

- **Factores de emisión (Emission Factor)**

Las cargas ambientales originadas por el consumo de combustible del parque automotor se especifican como un efecto (emisión de un contaminante) por unidad de energía consumida o por unidad de distancia recorrida. Durante el cálculo, el software multiplica la carga ambiental por la cantidad total de energía consumida o el kilometraje total recorrido por todos los vehículos.

5.1.3 Variables de salida del modelo LEAP

A continuación, se presentan las variables de salida y las ecuaciones de cálculo del modelo LEAP en el análisis del parque automotor y su emisión de contaminantes (Heaps, 2012).

- **Rotación de la existencia de vehículos**

$$Stock_{t,y,v} = Sales_{t,v} \times Survival_{t,y-v}$$

Donde:

- ✓ t es el tipo de vehículo.
- ✓ v es el modelo del vehículo.
- ✓ y es el año calendario.

✓ *Sales* es el número de vehículos que entran al parque automotor en un año en particular, puede calcularse con información sobre las ventas históricas.

✓ *Stock* es el número de vehículos existentes en un año en particular.

✓ *Survival* es la fracción de vehículos que sobreviven después de un determinado número de años.

- **Rendimiento del combustible**

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

Donde:

✓ *FuelEconomy* es el combustible utilizado por unidad de distancia recorrida por el vehículo.

✓ *FeDegradation* es un factor que representa el cambio en el rendimiento de combustible a medida que el vehículo envejece. Es igual a 1 cuando $y=v$

- **Kilometraje**

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

Donde:

✓ *Mileage* es la distancia anual recorrida por el vehículo.

✓ ***MiDegradation*** es un factor que representa el cambio en el kilometraje a medida que el vehículo envejece. Es igual a 1 cuando $y=v$.

- **Consumo de energía**

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

- **Emisión de contaminantes basada en la distancia (e.g contaminantes criterio)**

$$\begin{aligned} Emission_{t,y,v,p} \\ &= Stock_{t,y,v} \times Mileage_{t,y,v} \times EmissionFactor_{t,v,p} \\ &\quad \times EmDegradation_{t,y-v,p} \end{aligned}$$

Donde:

✓ ***p*** es cualquier contaminante criterio.

✓ ***EmissionFactor*** es la emisión de contaminante *p* (e.g. gramos/kilómetro) de un vehículo nuevo de modelo *v*.

✓ ***EmDegradation*** es un factor que representa el cambio en el factor de emisión del contaminante *p* a medida que el vehículo envejece. Es igual a 1 cuando $y=v$.

- **Emisión de contaminantes basada en la energía (e.g. CO₂ y otros gases de efecto invernadero)**

$$\begin{aligned}
 & \mathbf{Emission}_{t,y,v,p} \\
 &= \mathbf{EnergyConsumption}_{t,y,v} \times \mathbf{EmissionFactor}_{t,v,p} \\
 & \times \mathbf{EmDegradation}_{t,y-v,p}
 \end{aligned}$$

5.2 Modelo de tránsito terrestre “Eggleston”

Consiste en calcular las emisiones relativas de las categorías vehiculares definidas y sus aportes a la emisión total, y requiere datos secundarios como el flujo vehicular, la distribución del parque automotor de acuerdo al modelo y tipo de combustible y la caracterización de las vías (Figura 2).

Los resultados permiten ver la distribución horaria de las emisiones en las principales vías del municipio.

Los factores de emisión son tomados del modelo International Vehicle Emissions, IVE (Davis, Lents, Osses, Nikkila, & Bart, 2005), el cual posee factores de emisión para aproximadamente 450 tecnologías vehiculares clasificadas de acuerdo al tipo de vehículo (p. ej. auto, bus/camión, motores pequeños), tipo de combustible (p. ej. gasolina, diésel, gas natural), peso (liviano, mediano, pesado), tipo de dispositivo para la mezcla aire/combustible (p. ej. carburador, inyección directa, inyección de combustible multipunto), control de emisiones por el tubo de escape (p. ej. catalizador, 3-vías/EGR—exhaust gas recirculation, Euro II) y tipo de control de las emisiones evaporativas (PCV, positive crankcase ventilation). Además para cada

una de las tecnologías hay un factor de emisión de acuerdo a la edad del vehículo, que se da en términos del kilometraje.



Figura 2. Metodología para la desagregación y simulación de emisiones vehiculares.

Fuente Toro, 2001

5.3 Determinación del tránsito vehicular

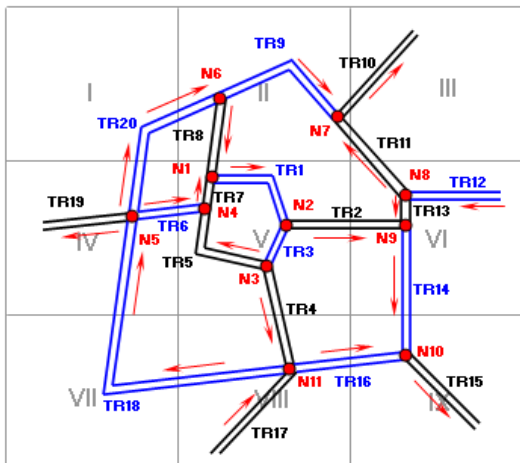
Esta categoría tiene en cuenta la selección de la red vial de tránsito, la distribución de la flota vehicular, la intensidad del tránsito horario calculada a partir de aforos y los balances de flujo vehicular.

5.3.1 Selección de la red vial de tránsito

Para conformar la red vial se deben tener en cuenta los siguientes ítems:

- Las vías con flujo vehicular desconocido deben conectar cruces que tengan al menos un tramo con el valor de la intensidad vehicular horaria medida.
- Se debe conservar un sistema lineal, es decir que el número de nodos (cruces) sea igual al número de tramos de vía no determinados o sin información en la red de aforos.

La Figura 3 representa un ejemplo de la red vial con información recolectada en el área Metropolitana del Valle de Aburrá, en la que se tiene en cuenta el levantamiento de las vías realizado en el estudio de movilidad y el posterior análisis de los aforos vehiculares. Esto permite definir los tramos conocidos y desconocidos para elaborar una matriz que es la base del modelo de cálculo.





DESCRIPCIÓN	NÚMERO	CÓDIGO
CELDAS	9	CE
TRAMOS	20	TR
NODOS	11	N
 Tramos con intensidad horaria conocida		
 Tramos con intensidad horaria desconocida		

Figura 3. Red vial ilustrativa.

Fuente: AMVA-UPB. (2013)

5.3.2 Balance de flujo vehicular

Se basa en el procedimiento empleado en sistemas eléctricos, método de corrientes o mallas, o en el método de Hardy-Cross en redes hidráulicas.

En la Figura 4 se ejemplifica el método donde se aprecia el balance simple en el nodo N, debido a la convergencia de los flujos A y B.

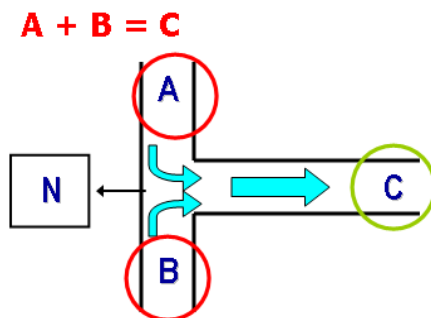


Figura 4. Balance para el cálculo de flujo vehicular

Fuente: AMVA-UPB. (2013)

Resolviendo el procedimiento se tiene un sistema de ecuaciones lineales de tamaño $m \times n$, donde “m” representa el número de nodos de la malla vial y “n” el número de tramos a los que se le debe determinar la intensidad de tránsito horaria. Para resolver el sistema, la matriz debe ser cuadrada, por lo tanto, el valor de m debe ser igual a “n” ($m = n$).

El cálculo de las emisiones se realiza siguiendo la ecuación 2.2 conocida como la ecuación de Eggleston.

Ecuación 0.1. Cálculo de emisiones de acuerdo al modelo de tránsito terrestre de Eggleston

$$E_T = \sum_{m=1}^{m=n} \left\{ f_m \left\{ \sum_{k=1}^{k=p} \left\{ f_k \left\{ \sum_{v=1}^{v=3} (L_r \times N_{k,r,v,h} \cdot FE_{v,k,m,j}) \right\} \right\} \right\} \right\} \text{ (Patiño, 2006)}$$

Donde:

ET = Emisión del contaminante; g/h

m = Modelo del vehículo; adimensional

k = Categoría vehicular; adimensional

n,p: número de clasificaciones para el modelo del vehículo y la categoría vehicular respectiva.

v = Tipo de vía; adimensional

r = Tramo de vía; adimensional

L_r = Longitud del tramo de vía específico en la celda j; km

N_{k,r,v,h} = Número de vehículos de categoría k que transitan en el tramo de vía r de tipo v a una hora determinada h, por la celda j; h-1

FE = Factor de emisión correspondiente al tipo de vía, categoría vehicular, modelo del vehículo, g/km recorrido.

6. Metodología

6.1 Datos de entrada requeridos por el modelo LEAP

El parque automotor es desagregado en varios niveles de actividad: sector (tipo de vehículo), sub-sector (tamaño) y uso final (tipo de combustible), y a cada uno de estos niveles se asocian las existencias y ventas de vehículos, la distancia anual recorrida en el primer año del vehículo (VKT0), el rendimiento de combustible y los factores de emisión. Además, a estas variables se asocian perfiles de ciclo de vida como el perfil de antigüedad vehicular, el perfil de degradación del VKT0 (a medida que el vehículo envejece se usa menos y por ende disminuyen los kilómetros recorridos año a año), y el perfil de degradación del factor de emisión (a medida que el vehículo envejece aumenta sus emisiones).

En relación al perfil de supervivencia de los vehículos, este no es requerido en este estudio, pues no se realizarán proyecciones del parque automotor. La Figura 5 presenta los datos de entrada requeridos por el modelo LEAP en el caso de aplicación para la estimación de emisiones de fuentes móviles con año base 2016 en el área metropolitana de Bucaramanga (AMB) así:

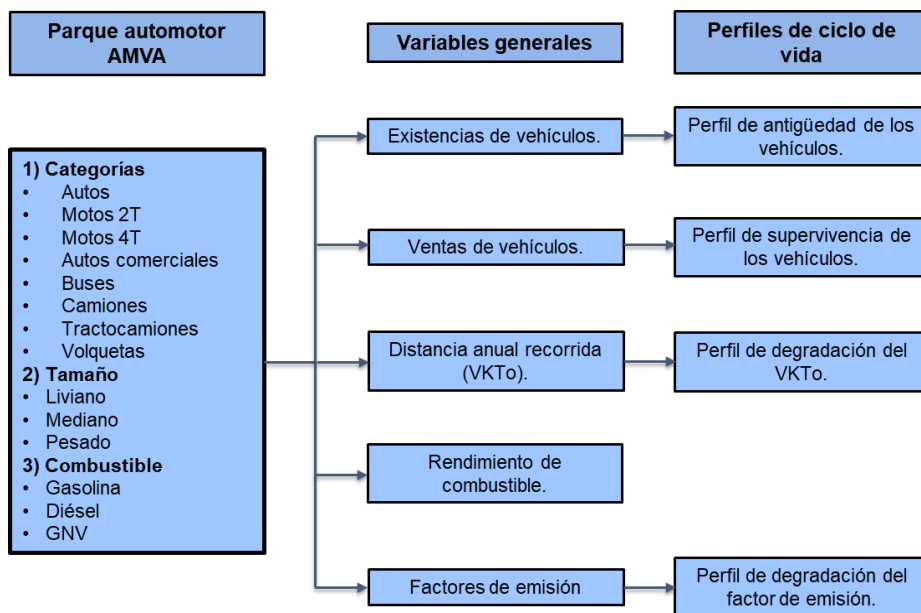


Figura 5. Estructura metodológica del parque automotor del AMB en LEAP

Fuente: AMVA-UPB. (2013)

6.1.1 Existencia y ventas de vehículos.

La información sobre el número de vehículos existentes (stock) y las ventas de vehículos (sales) para el año 2016 en el área metropolitana de Bucaramanga, se obtuvo a través de las secretarías de movilidad de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta, a las cuales se solicitó el parque automotor registrado en bases de datos con los siguientes campos: clase de vehículo (automóvil, bus, camión, etc.), servicio (particular, público, oficial y diplomático), modelo (año-modelo del vehículo), cilindraje (valor relativo al tamaño del motor), combustible (gasolina, diésel, GNV, gas-gasolina) y estado (activo, inactivo, robado, etc.).

En el Anexo A se adjuntan los oficios enviados a las secretarías de tránsito y movilidad solicitando las bases de datos de los vehículos registrados en los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta.

En cuanto se recolectaron las bases de datos, la información fue depurada y clasificada de acuerdo a las categorías definidas en el modelo LEAP.

Las categorías presentadas en la Tabla 2 son las fuentes móviles en ruta (on-road), las cuales son el objeto de este estudio.

Tabla 2. Clasificación de vehículos.

Categoría LEAP	Clase	Servicio	Tamaño
Autos particulares	Automóvil, camioneta, campero.	Particular	Ligeros (≤ 1500 cc)
			Medianos ($1500 < \text{cc} < 3000$)
			Pesados ($\text{cc} \geq 3000$)
Autos comerciales	Automóvil, camioneta, campero.	Público, oficial, diplomático	Ligeros (≤ 1500 cc)
			Medianos ($1500 < \text{cc} < 3000$)
			Pesados ($\text{cc} \geq 3000$)
Buses	Bus, buseta, microbús	Particular, público, oficial, diplomático	Ligeros (≤ 3000 cc)
			Medianos ($3000 < \text{cc} < 6000$)
			Pesados ($\text{cc} \geq 6000$)
Camiones	Camión	Particular, público, oficial, diplomático	Ligeros (≤ 3000 cc)
			Medianos ($3000 < \text{cc} < 6000$)
			Pesados ($\text{cc} \geq 6000$)
Motocicletas	Motocicleta, motocarro, cuatrimoto, motociclo.	Particular, público, oficial, diplomático	Ligeros (≤ 150 cc)
			Medianos ($150 < \text{cc} < 300$)
			Pesados ($\text{cc} \geq 300$)
Tractocamiones	Tractocamión	Particular, público, oficial, diplomático	Pesados ($\text{cc} \geq 6000$)
Volquetas	volqueta	Particular, público, oficial, diplomático	Medianos ($3000 < \text{cc} < 6000$)
			Pesados ($\text{cc} \geq 6000$)

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017)

En la Tabla 3 se presentan las existencias y ventas de vehículos en el AMB para el año 2016.

Tabla 3. Existencias y ventas de vehículos en el AMB, año base 2016

Categoría vehicular	Existencias	Ventas	Total
Autos particulares	132.100	9.062	141.162
Autos comerciales	14.985	848	15.833
Buses	5.581	133	5.714
Camiones	11.702	404	12.106
Motocicletas	309.243	30.451	339.694
Tractocamión	4.611	1	4.612
Volqueta	2.178	19	2.197
Total	480.400	40.918	521.318

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017)

La información de vehículos registrados en las secretarías de movilidad fue complementada con la información de verificación de emisiones realizadas en los Centros de Diagnóstico Automotor (CDAs), la cual permite ajustar la caracterización del parque automotor, pues tiene un diagnóstico más acertado de los vehículos que realmente circulan en el AMB. La información se procesó en diecisiete (17) CDAs para un total de 132.612 vehículos verificados, lo que representa una muestra del 25% del parque automotor.

La Tabla 4 presenta la distribución por rangos de cilindraje y tipo de combustible que fue introducida al modelo LEAP para la estimación de emisiones con año 2016.

Tabla 4. Distribución de vehículos por cilindraje

	Existencias	Ventas
Autos Particulares		
Livianos (cc ≤ 1500)	39%	35%
Gasolina	88,0%	99,8%
Diésel	0,3%	0,0%
GNV	11,7%	0,2%
Medianos (1500 < cc ≤ 3000)	56%	63%
Gasolina	88,0%	96,0%
Diésel	6,3%	0,0%
GNV	5,7%	4,0%
Pesados (cc > 3000)	5%	2%
Gasolina	88,0%	97,7%
Diésel	4,5%	2,3%
GNV	7,5%	0,0%
Autos Comerciales		
Livianos (cc ≤ 1500)	58%	51%
Gasolina	88,0%	100,0%
Diésel	1,4	95,1
GNV	10,6%	0,0%
Medianos (1500 < cc ≤ 3000)	39%	4,9%
Gasolina	46,9%	40,2%
Diésel	50,0%	59,5%
GNV	3,1%	0,3%
Pesados (cc > 3000)	3%	4%
Gasolina	8,0%	9,1%
Diésel	89,1%	90,9%

	Existencias	Ventas
GNV	2,9%	0,0%
Buses		
Livianos (cc ≤ 3000)	38%	40%
Gasolina	8,0%	5,9%
Diésel	87,0%	94,1%
GNV	5,0%	0,0%
Medianos (3000 < cc ≤ 6000)	45%	34%
Gasolina	2,0%	7,0%
Diésel	93,07%	93,0%
GNV	5,0%	0,0%
Pesados (cc > 6000)	17%	26%
Gasolina	0,0%	0,0%
Diésel	97,0%	100,0%
GNV	3,0%	0,0%
Camiones		
Livianos (cc ≤ 3000)	14%	25%
Gasolina	0,6%	8,9%
Diésel	99,1%	91,1%
GNV	0,3%	0,0%
Medianos (3000 < cc ≤ 6000)	58%	64%
Gasolina	1,3%	0,0%
Diésel	96,9%	100,0%
GNV	1,8%	0,0%
Pesados (cc > 6000)	28%	11%
Gasolina	0,8%	0,0%
Diésel	99,0%	100,0%

	Existencias	Ventas
GNV	0,2%	0,0%
Motos 2T		
Livianos (cc ≤ 150)	100%	-
Gasolina	100,0%	-
Motos 4T		
Livianos (cc ≤ 150)	23%	7%
Gasolina	100,0%	100,0%
Medianos (150 < cc ≤ 300)	76%	92%
Gasolina	100,0%	100,0%
Pesados (cc > 300)	1%	1,0%
Gasolina	100,0%	100,0%
Tractocamiones		
Pesados (cc > 6000)	100%	100%
Diésel	100,0%	100,0%
Volquetas		
Medianos (3000 < cc ≤ 6000)	21%	0%
Gasolina	1,0%	0,0%
Diésel	99,0%	100,0%
Pesados (cc > 6000)	79%	100%
Diésel	100,0%	100,0%

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

6.1.2 Perfil de antigüedad de los vehículos

El perfil de antigüedad de los vehículos existentes es un perfil de ciclo de vida que describe la distribución etaria de la flota. Este perfil debe ser asociado a cada uno de los niveles de actividad del parque automotor existente. Para el presente estudio se crearon 44 perfiles de antigüedad.

En la Figura 6 se presentan los perfiles de las categorías más representativas del parque automotor.

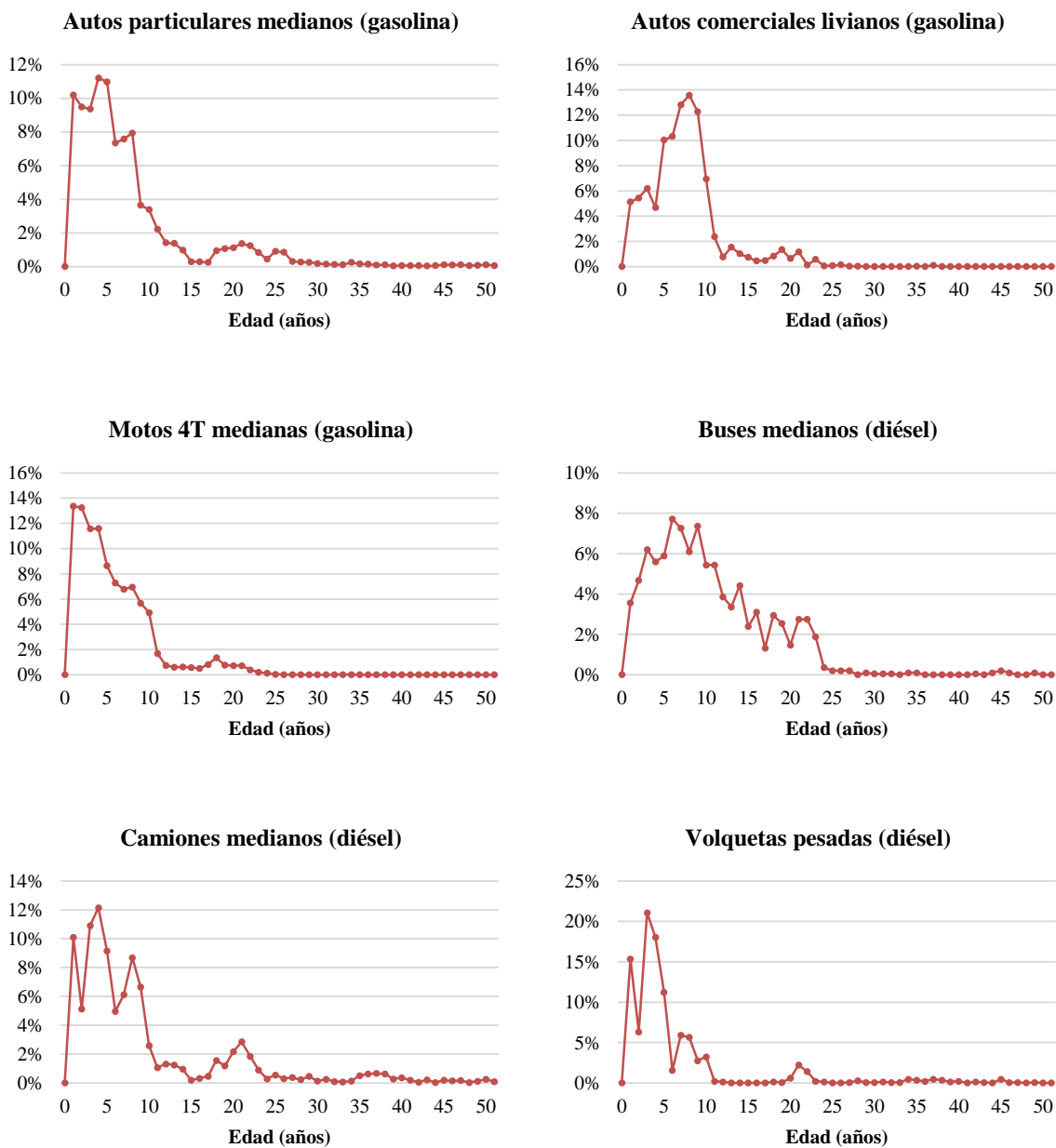


Figura 6. Perfiles de antigüedad vehicular

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

En los perfiles de antigüedad presentados anteriormente se puede apreciar que los autos comerciales livianos a gasolina, las motos 4T medianas a gasolina y las volquetas pesadas diésel son las categorías menos antiguas del parque automotor, pues cerca del 90% tienen menos de 10 años de edad, mientras que aproximadamente el 80% de los autos medianos a gasolina tiene menos de 10 años de edad. En relación a los buses y camiones medianos diésel, el 60% y 76% respectivamente, tienen menos de 10 años de antigüedad.

6.1.3 Kilometraje

La distancia anual recorrida por vehículo (también conocido como VKT, Vehicle Kilometer Travelled) fue estimada a través de las ventas de vehículos en los cuatro municipios que conforman el área metropolitana de Bucaramanga, información disponible en la página web tucarro.com, la cual cuenta con datos sobre el tipo vehículo, modelo, cilindraje, combustible y kilometraje total.

Los valores de VKT determinados inicialmente son ajustados cuando se calibra el modelo, a través de la demanda de energía real y la estimada por el modelo LEAP. Los valores de VKT0 finales se presentan en la Figura 7.

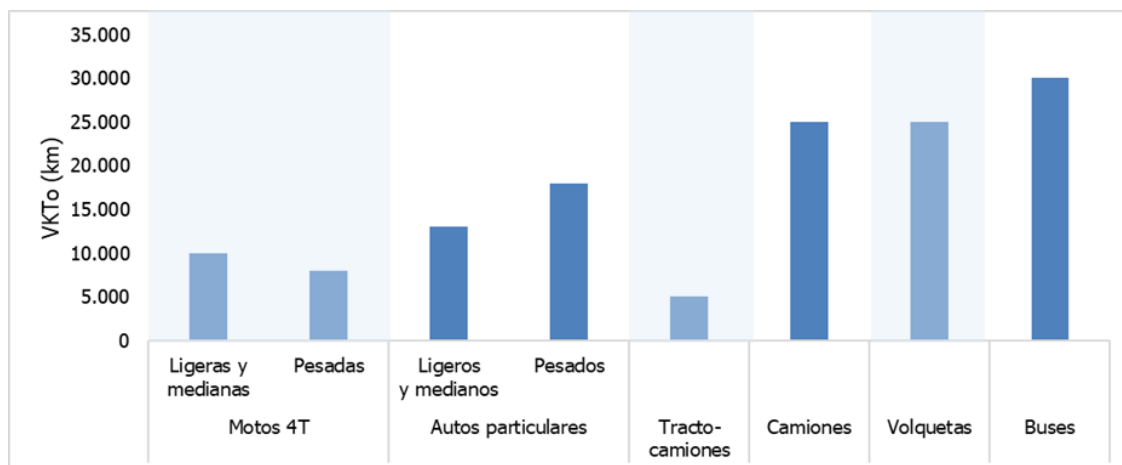


Figura 7. Distancia anual recorrida en el primer año del vehículo (VKT₀)

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

Finalmente, es importante determinar el perfil de degradación del kilometraje anual, el cual describe el modo en que decrece la distancia anual recorrida a medida que el vehículo envejece. Para ello se representa el perfil de degradación por medio de una función exponencial como la siguiente (Heaps, 2012):

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

Donde:

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

De esta manera, después de ajustar los datos encontrados a través de la venta de vehículos a la función exponencial presentada en la ecuación anterior, se determinaron los perfiles que se presentan en la Figura 8.

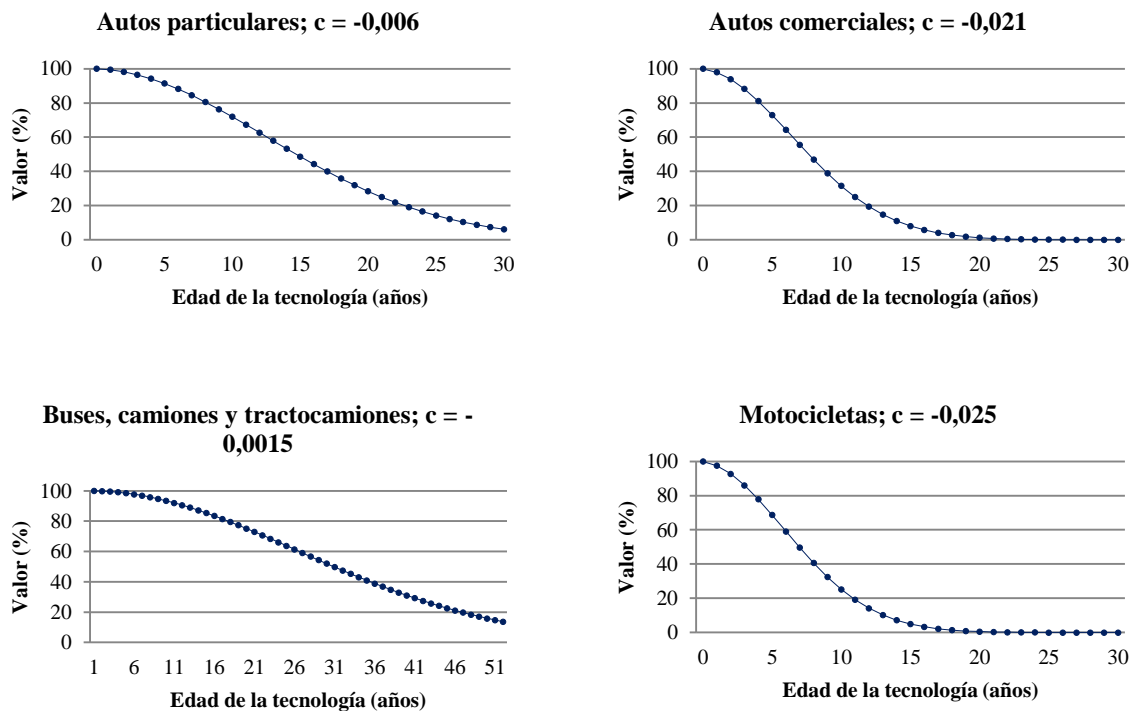


Figura 8. Perfiles de degradación del kilometraje anual

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

Los autos comerciales y las motocicletas son los vehículos cuyo kilometraje se degrada más rápidamente pues cuando tienen cerca de 10 años de antigüedad, el kilometraje es alrededor del 20% de la distancia anual que recorría en el primer año de vida. En lo relacionado con autos, buses y camiones se encuentra que la degradación del kilometraje es mucho más lenta pues cuando tienen 10 años de antigüedad los autos tienen un kilometraje anual cercano al 70% del kilometraje en el primer año de vida, y los buses y camiones, un kilometraje anual cercano al 90% del kilometraje inicial.

6.1.4 Rendimiento de combustible

La información relacionada con el consumo de combustible fue obtenida del modelo *International Vehicle Emissions*, IVE, el cual fue desarrollado por el International Sustainable Systems Research Center (Davis, Lents, Osses, Nikkila, & Bart, 2005).

Este modelo calcula la emisión de dióxido de carbono (CO₂) a partir del consumo de combustible, pues considera que el carbono presente en el combustible se convierte en CO₂ a excepción de una fracción que se convierte en monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (VOC) y material particulado (PM), tal y como lo expresa la siguiente ecuación:

$$CO_2 = \left\{ \left[\frac{1}{FE \times 1,6} \times 3,785 \times 740 \times 0,82 \right] - CO \times \frac{12}{28} - VOC \times \frac{12}{14} - 0,9 \times PM \right\} \times \frac{44}{12}$$

Donde:

CO₂, *CO*, *VOC* y *PM* son los factores de emisión en g/km.

FE es el rendimiento del combustible en millas/galón de gasolina equivalente (galón de gasolina equivalente hace referencia a la cantidad de combustible alternativo necesario para igualar un galón de gasolina líquida).

Así, al despejar la variable *FE* en la ecuación es posible conocer el rendimiento teórico del combustible de las diferentes tecnologías vehiculares pues se tienen los factores de emisión de CO₂, CO, VOC y PM para cada una de las respectivas categorías. Finalmente, los valores calculados son introducidos en el modelo LEAP con el fin de estimar la demanda energética del parque automotor del Área Metropolitana de Bucaramanga.

En la Figura 9 se presentan los rendimientos de combustible ponderados de acuerdo a la categoría vehicular y al tipo de combustible.

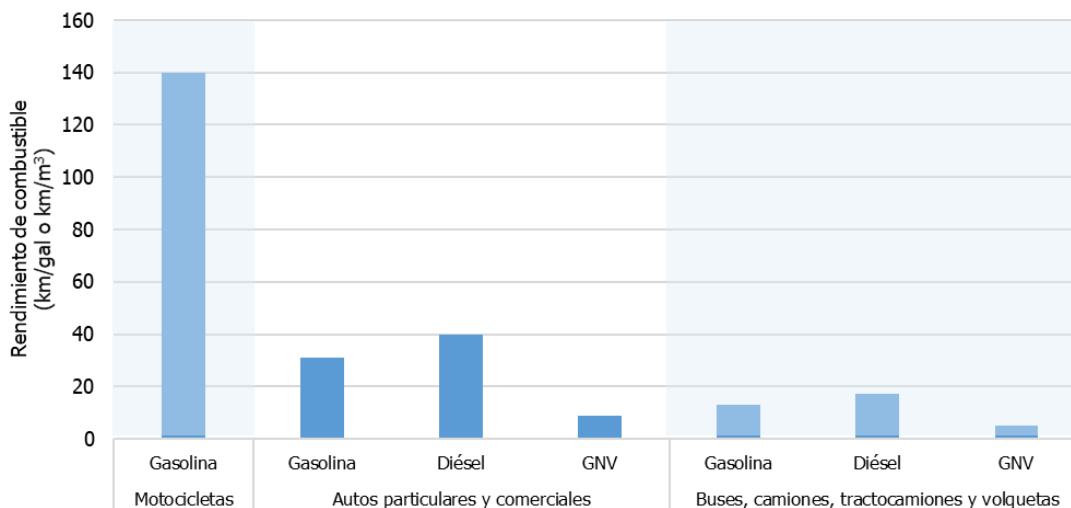


Figura 9. Rendimiento promedio del combustible

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

El vehículo con la mayor eficiencia energética es la motocicleta que recorre cerca de 140 km/gal; los autos particulares y comerciales a gasolina y diésel recorren alrededor de 35 km/gal, los buses y camiones a gasolina y diésel alrededor de 15 km por galón. Los autos particulares y comerciales a gas natural vehicular (GNV) recorren cerca de 10 km/m³, y los buses y camiones alrededor de 5 km/m³ de GNV.

6.1.5 Factores de emisión

En cuanto a los factores de emisión usados por el modelo LEAP para la estimación de emisiones de fuentes móviles en el área metropolitana de Bucaramanga, es importante anotar que el usuario del modelo LEAP es libre de introducir los factores de emisión que desee; en el caso

de las aplicaciones locales del modelo LEAP siempre se han usado los factores de emisión del modelo *International Vehicle Emissions*, IVE (Davis, Lents, Osses, Nikkila, & Bart, 2005), el cual posee factores de emisión para aproximadamente 450 tecnologías vehiculares clasificadas de acuerdo al tipo de vehículo (p. ej. auto, bus/camión, motores pequeños), tipo de combustible (p. ej. gasolina, diésel, gas natural), peso (liviano, mediano, pesado), tipo de dispositivo para la mezcla aire/combustible (p. ej. carburador, inyección directa, inyección de combustible multipunto), control de emisiones por el tubo de escape (p. ej. catalizador, 3-vías/EGR–*exhaust gas recirculation*, Euro II) y tipo de control de las emisiones evaporativas (PCV, *positive crankcase ventilation*).

Además, para cada una de las tecnologías hay un factor de emisión de acuerdo a la edad del vehículo, que se da en términos del kilometraje, así: <79.000 km, 80.000-161.000 km y >161.000 km (AMVA-UPB, 2013).

De esta manera, para estimar las emisiones vehiculares con los factores de emisión IVE, se aplica un factor de emisión base (B) con una serie de factores de corrección (K) para estimar la cantidad de contaminante (Q) de una variedad de tipos de vehículo, con Q en unidades de masa sobre tiempo o distancia.

$$Q_{[T]} = B_{[T]} \times K_{(1)[T]} \times K_{(2)[T]} \times \dots K_{(x)[T]}$$

Los factores de corrección para los factores de emisión pueden ser clasificados en varias categorías, de acuerdo a las variables locales y la calidad del combustible.

Dichos factores fueron desarrollados usando datos de modelos de emisiones vehiculares existentes y se calcularon como la relación entre las emisiones del parámetro modelado indicado y la emisión base para cada tecnología. En la Tabla 5 se presentan las condiciones a las que están dados los factores de emisión base (BER, *Base Emission Rate*) y en la Tabla 6 los factores de corrección disponibles.

Tabla 5. Condiciones para los factores de emisión base

VARIABLES LOCALES	VARIABLES DE CALIDAD DEL COMBUSTIBLE
-Temperatura ambiente = 25°C	-Gasolina = moderada/premezclada, motor de 2 tiempos
-Humedad del ambiente = 50%	-Azufre en la gasolina = moderado, 300 ppm
-Altura = 950 msnm	-Plomo en la gasolina = no
-Programas de inspección y mantenimiento (I/M) = no	-Benceno en la gasolina = moderado, 1,5%
	-Gasolina oxigenada = 0%
	-Diésel = moderado
	-Azufre en el diésel= moderado, 500 ppm

Fuente: AMVA-UPB, 2013

Tabla 6. Factores de corrección disponibles para los factores de emisión base.

VARIABLES LOCALES	VARIABLES DE CALIDAD DEL COMBUSTIBLE
Temperatura ambiente	Gasolina
Humedad del ambiente	Azufre en la gasolina
Altura	Plomo en la gasolina
Programas de inspección y mantenimiento (I/M)	Benceno en la gasolina
	Gasolina oxigenada
	Diésel
	Azufre en el diésel

Fuente: AMVA-UPB, 2013.

De este modo los factores de emisión fueron corregidos de acuerdo a las condiciones del área metropolitana de Bucaramanga: humedad del 83%, altura de 959 msnm, contenido de azufre en la gasolina de 300 ppm, contenido de azufre en el diésel de 50 ppm y contenido de etanol en la gasolina de 8% V/V (aunque el diésel también se encuentra mezclado con aceite de palma (10% V/V), no se hace corrección de los correspondientes factores de emisión debido a que el modelo IVE no dispone de factores de corrección para este tipo de mezcla).

Así, del modelo IVE se obtienen los factores de emisión para los contaminantes VOC, CO, NO_x, PM, NH₃, N₂O y CH₄. Es importante resaltar que las emisiones de partículas por los tubos de escape vehiculares se ubican principalmente en el rango de tamaño del PM_{2,5}. Por lo tanto, todos los factores de emisión de PM corresponden a PM_{2,5}.

En cuanto a los factores de emisión de CO₂ y SO₂, se calculan por balance de masa asumiendo que todo el carbono y el azufre en el combustible se convierten en CO₂ y SO₂, suposición válida, pues aunque se generan otros contaminantes derivados del carbono y el azufre, las cantidades son mínimas si se comparan con el CO₂ y SO₂ producido (ver Tabla 7).

Tabla 7. Factores de emisión de CO₂ y SO₂.

Combustible	PCI (MJ/kg) ¹	Contenido de C (%) ¹	Contenido de S (ppm) ²	Factor de emisión (kg/TJ)	
				CO ₂	SO ₂
Gasolina	45,02	86,5	300	70.450,4	13,33
Diésel	43,98	86,4	50	72.034,0	2,27
Gas natural vehicular	47,12	73,0	0,1	56.804,4	0,00424

Fuente: AMVA-UPB, 2015

Por último, es necesario definir el perfil de degradación de los factores de emisión, pues a medida que el vehículo envejece emite mayor cantidad de contaminantes. Dichos perfiles se obtienen a partir de los factores de emisión que define el IVE para cada tecnología a tres diferentes edades y la ecuación:

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

Donde:

t es la edad del vehículo en años.

V es el valor de la variable que se degrada, en este caso el factor de emisión.

Constant (c) es un valor constante que se ajusta de acuerdo a los datos del modelo IVE.

7. Resultados y discusión

7.1 Parque automotor

En la Figura 10 se presenta la distribución de vehículos registrados por municipio, la cual indica que el 47% está registrado en Girón, el 29% en Floridablanca, el 21% en Bucaramanga y el 3% en Piedecuesta. Cabe anotar que estos valores no son equivalentes a los vehículos que circulan en cada municipio, pues el volumen de control es el área metropolitana de Bucaramanga y los viajes tienen origen y destino en todos los municipios, principalmente en Bucaramanga como municipio central. El mayor número de vehículos registrados en las secretarías de movilidad de Girón y Floridablanca puede originarse en la eficiencia de las dependencias para realizar trámites, lo que resulta más llamativo para los propietarios de los vehículos, los concesionarios, etc.

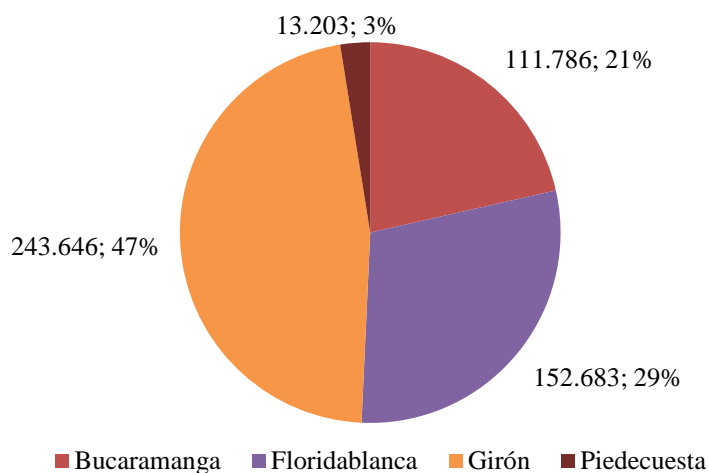


Figura 10. Vehículos registrados en las secretarías de movilidad

Fuente: Autor

En las bases de datos también se encontró información sobre maquinaria agrícola, industrial, de construcción, remolques y semirremolques (7.261 vehículos en total), los cuales son considerados fuentes móviles fuera de ruta (off-road), por lo que no fueron tenidas en cuenta en el presente estudio.

El análisis del parque automotor registrado en las secretarías de movilidad de los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta mostró que el 65% del parque automotor que circula en la región metropolitana corresponde a motocicletas, el 27% a autos particulares, el 3% a autos comerciales y el 5% restante a camiones, buses, tractocamiones y volquetas, tal y como se observa en la Figura 11.

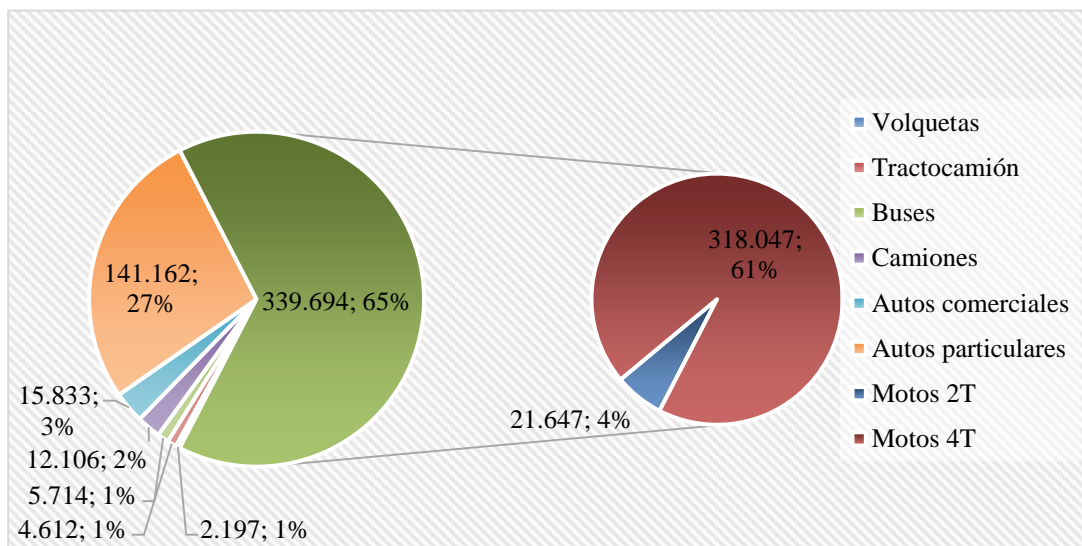


Figura 11. Composición del parque automotor

Fuente: Autor

Estos resultados muestran que el área metropolitana de Bucaramanga no es ajena al grave fenómeno de motorización por motocicletas que se presenta en el país, región que llega incluso a superar la tasa de motorización por cada 1000 habitantes del área metropolitana del Valle de

Aburrá, la cual es de 179 motocicletas/1000 hab., mientras la del área metropolitana de Bucaramanga es de 199 motocicletas/1000 hab. Este fenómeno tiene asociados una alta accidentalidad y mortalidad, congestión y contaminación por los precarios sistemas de control de emisiones que tienen este tipo de vehículos.

En relación a la cantidad de vehículos que circulan en el área metropolitana, con el análisis de la información se encontró que la flota vehicular está compuesta por 521.318 vehículos (

Tabla 8. *Parque automotor por tamaño y categoría*

Tabla 8. Parque automotor por tamaño y categoría

Categoría/Tamaño	Cantidad
Autos	141.162
Ligeros (≤ 1500 cc)	54.691
Medianos ($1500 < \text{cc} < 3000$)	79.685
Pesados ($\text{cc} \geq 3000$)	6.786
Autos comerciales	15.833
Ligeros (≤ 1500 cc)	9.124
Medianos ($1500 < \text{cc} < 3000$)	6.226
Pesados ($\text{cc} \geq 3000$)	483
Buses	5.714
Ligeros (≤ 3000 cc)	2.174
Medianos ($3000 < \text{cc} < 6000$)	2.557
Pesados ($\text{cc} \geq 6000$)	983
Camiones	12.106
Ligeros (≤ 3000 cc)	1.739
Medianos ($3000 < \text{cc} < 6000$)	7.046
Pesados ($\text{cc} \geq 6000$)	3.321
Motos 2T	21.647

Categoría/Tamaño	Cantidad
Ligeras (≤ 150 cc)	21.647
Motos 4T	318.047
Ligeras (≤ 150 cc)	68.279
Medianas ($150 < \text{cc} < 300$)	246.588
Pesadas ($\text{cc} \geq 300$)	3.180
Tractocamiones	4.612
Pesados ($\text{cc} \geq 6000$)	4.612
Volquetas	2.197
Medianas ($3000 < \text{cc} < 6000$)	457
Pesadas ($\text{cc} \geq 6000$)	1.740
Total	521.318

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

El análisis de la edad del parque automotor mostró que el 70% de la flota vehicular tienen menos de 10 años de antigüedad y aproximadamente el 10% tiene más de 20 años. Además, sobresale la edad del transporte de carga, debido a que el 10% de los camiones y el 20% de las volquetas tienen más de 30 años de antigüedad (ver Figura 12).

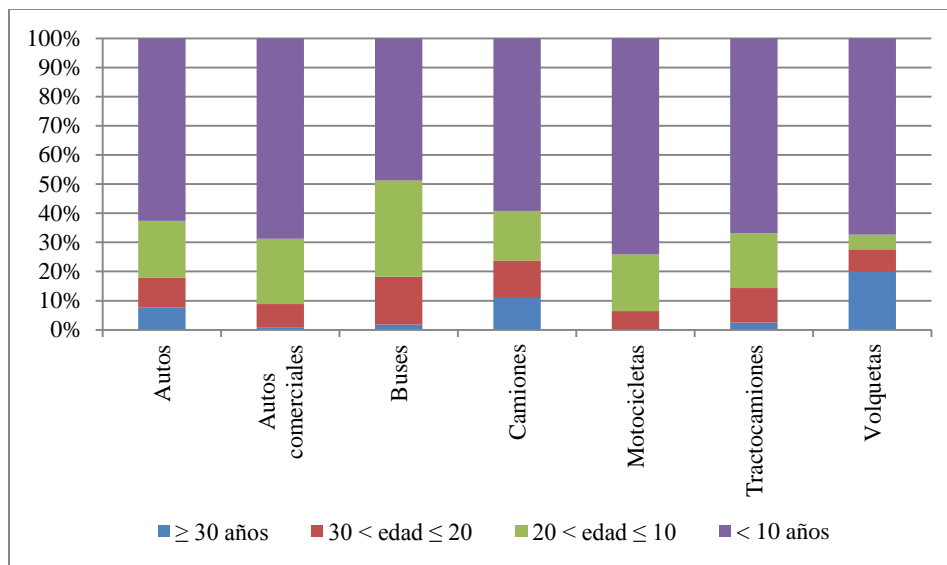


Figura 12. Edad del parque automotor

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

7.2 Demanda de energía

La demanda real de gasolina y diésel en los municipios de Bucaramanga, Floridablanca, Girón y Piedecuesta fue proporcionada por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (ver Figura 13). Sin embargo, no fue posible obtener el consumo de gas natural vehicular (GNV) pues la información no estaba desagregada para los cuatro municipios.

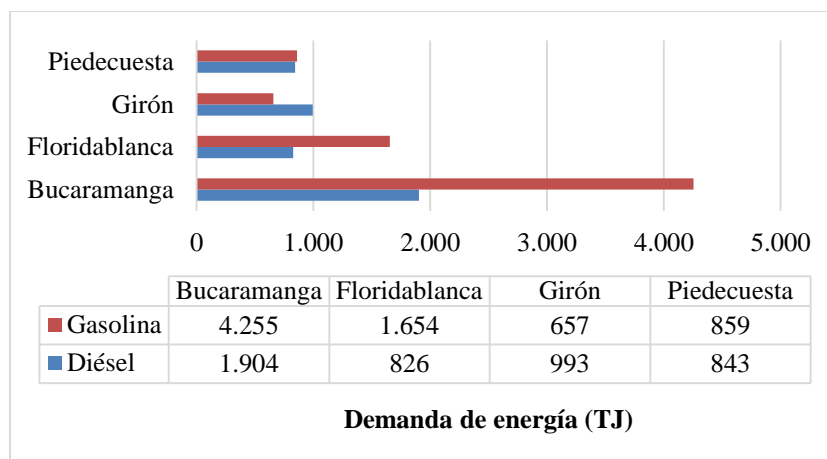


Figura13. Demanda de gasolina y diésel en el área metropolitana de Bucaramanga

Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética (UPME)

La demanda de energía real y estimada permite calibrar el modelo a través del ajuste del VKT0. El modelo LEAP fue ejecutado numerosas veces, de modo tal que el ajuste del VKT0 hiciera mínima la diferencia entre la demanda energética real (UPME) y la estimada (LEAP), siempre y cuando los valores de VKT0 no se salieron de los rangos normales que se encontraron para el área metropolitana a través de la venta de vehículos en páginas web. De este modo se calibró el modelo con un error de $\pm 7\%$, como puede apreciarse en la Figura 14.

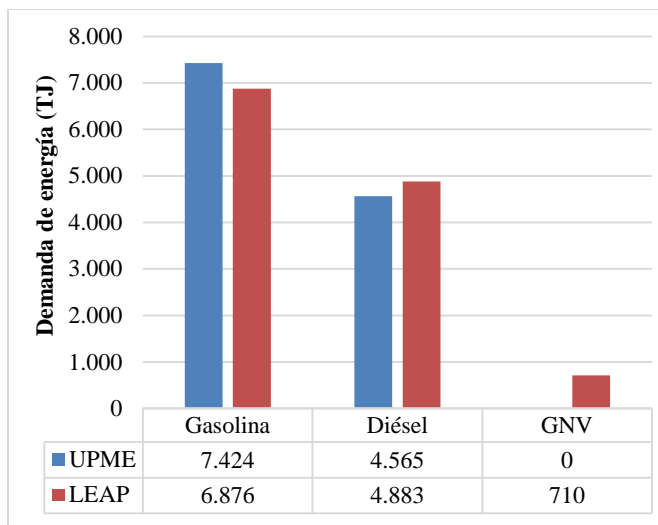


Figura 14. Demanda de energía real (UPME) y estimada (LEAP)

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

En relación a la demanda energética por GNV, el análisis de los datos de verificación de emisiones realizados en CDAs permitió establecer que aproximadamente el 3% del parque automotor opera con GNV. Teniendo este valor como base se ajustó el parque automotor a gasolina y GNV en el modelo LEAP, procurando mantener la diferencia entre la demanda energética real y estimada de gasolina en el valor mínimo, con lo que se obtuvo una demanda energética de 710 TJ por GNV, para un total de 12.506 vehículos a GNV, lo que equivale al 2,4% del parque automotor.

De acuerdo a los resultados arrojados por el modelo LEAP, en el área metropolitana de Bucaramanga los autos particulares y los camiones son las categorías vehiculares con la mayor demanda energética, pues para el año 2016 consumieron respectivamente el 40,5% y el 19,6% del total de energía; después de éstas categorías se ubican las motos 4T, los buses y autos comerciales, que consumen el 14,8%, 10,1% y 8,5%, respectivamente, de la energía total (ver Figura 15).

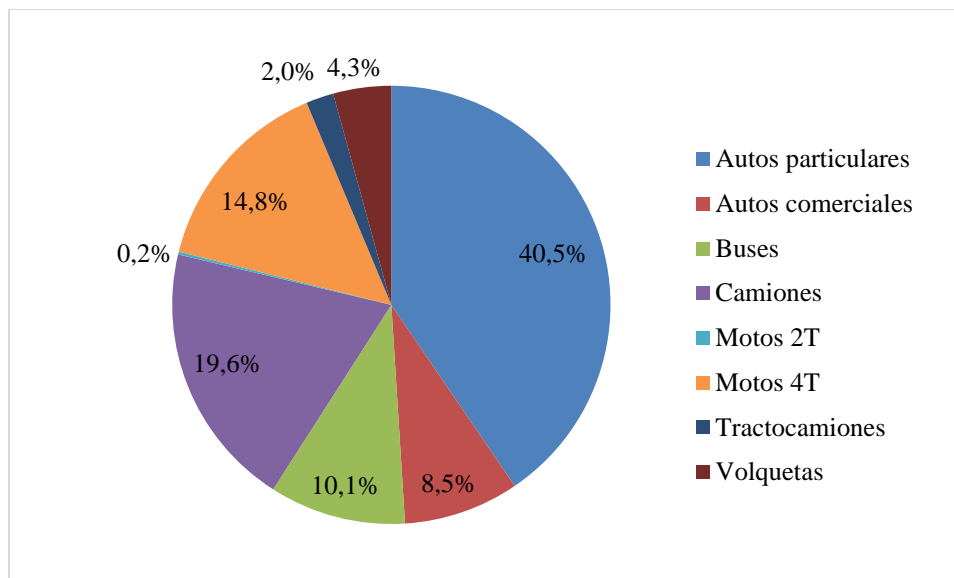


Figura 15. Demanda energética por categoría vehicular

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

7.3 Emisiones de contaminantes criterio

En la Tabla 9 se presentan las emisiones estimadas de contaminantes criterio y en la Figura 16 la distribución de esas emisiones por categoría vehicular. Los resultados muestran que los autos particulares hacen una importante contribución a las emisiones de CO y SO_x, aportando respectivamente el 65% y el 56% de estos contaminantes, y un poco más del 20% de las emisiones de NO_x y VOC. Así, aunque aportan cerca del 6% del PM_{2,5} primario, deben hacer una contribución importante al PM_{2,5} secundario, el cual tiene como precursores a los SO_x, NO_x y VOC.

También se puede identificar a los camiones como una categoría representativa en el aporte de emisiones de PM_{2,5} y NO_x, pues aporta el 47% y el 38% de dichos contaminantes.

Finalmente, es importante resaltar el aporte del 14% a las emisiones de PM_{2,5} y el 8% a las emisiones de NO_x de las volquetas, pues estos vehículos representan tan solo el 0,4% del parque

automotor. En la tabla 10 se presentan las emisiones de contaminantes criterio per cápita por categoría vehicular.

Tabla 9. Emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular

Categoría vehicular	ton/año				
	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM _{2,5}
Autos particulares	21.355	834	58	495	17
Autos comerciales	422	139	9	26	7
Buses	1.738	809	3	138	26
Camiones	4.715	1.485	6	276	134
Motos 2T	592	1	0	271	7
Motos 4T	3.560	152	25	739	49
Tractocamiones	98	162	1	20	5
Volquetas	577	313	1	47	41
Total	33.056	3.895	103	2.012	285

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

Tabla 10. Emisiones de contaminantes criterio per cápita por categoría vehicular

Categoría Vehicular	ton/año				
	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM _{2,5}
Auto particular	0,1513	0,0059	0,0004	0,0035	0,0001
Auto comercial	0,0267	0,0088	0,0006	0,0016	0,0004
Bus	0,3042	0,1416	0,0005	0,0242	0,0046
Camión	0,3895	0,1227	0,0005	0,0228	0,0111
Moto 2T	0,0273	-	-	0,0125	0,0003
Moto 4T	0,0112	0,0005	0,0001	0,0023	0,0002
Tractocamión	0,0212	0,0351	0,0002	0,0043	0,0011

Categoría Vehicular	ton/año				
	CO	NOX	SOX	VOC	PM2,5
Volqueta	0,2626	0,1425	0,0005	0,0214	0,0187

Fuente: Autor

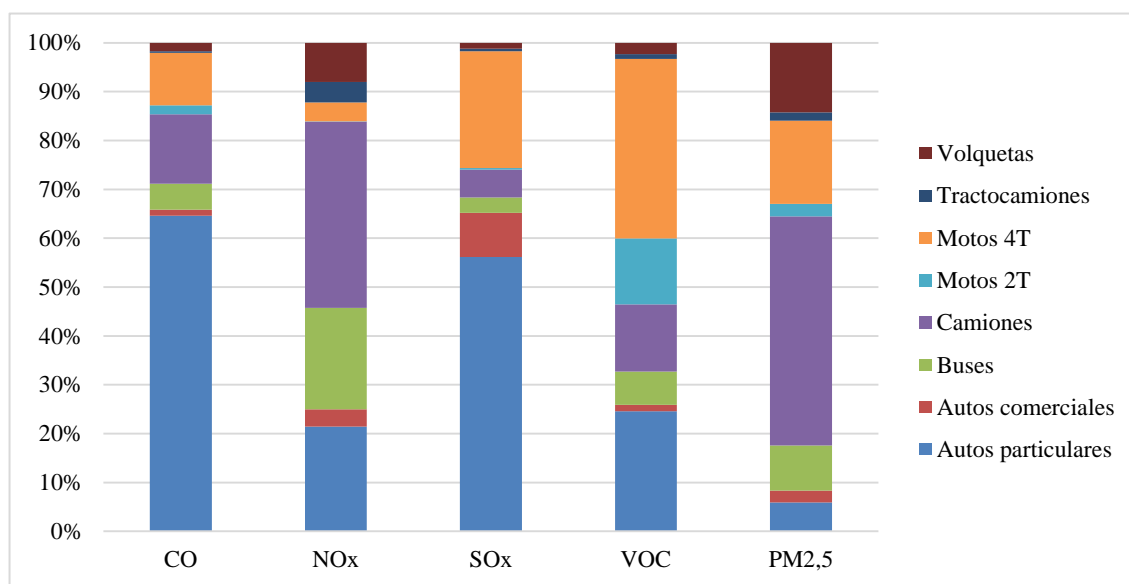


Figura 16. Distribución de emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular

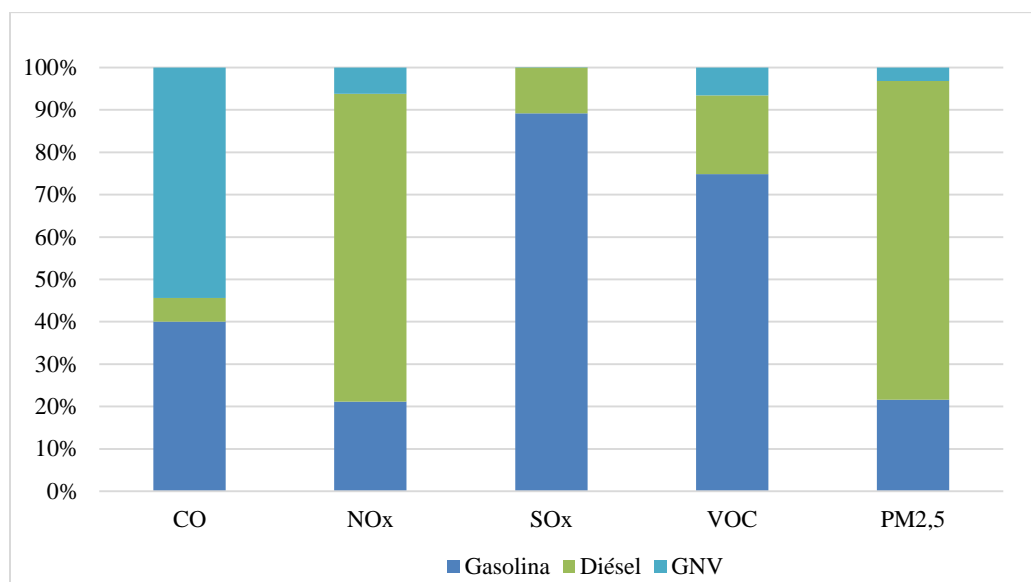
Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

Al analizar las emisiones de contaminantes criterio por tipo de combustible (Tabla 11 y Figura 17), puede verse que la gasolina es responsable del 40% de las emisiones de CO, del 89% de las emisiones de SOX y del 75% de las emisiones de VOC. Por su parte, el diésel contribuye con el 73% de las emisiones de NOX y el 75% de las emisiones de PM2,5, y en cuanto al gas natural vehicular este aporta el 54% de las emisiones de CO, mientras las emisiones de los contaminantes restantes originadas por el GNV son poco significativas.

Tabla 11. Emisiones de contaminantes criterio por tipo de combustible, año 2016

Combustible	ton/año				
	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM _{2,5}
Gasolina	13.234	823	92	1.506	62
Diésel	1.853	2.832	11	374	214
GNV	17.969	240	0	132	9
Total	33.056	3.895	103	2.012	285

Fuente Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

**Figura 17. Distribución de contaminantes criterio por tipo de combustible**

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

Tanto la gasolina como el diésel son fuentes importantes de las inmisiones de PM_{2,5}, pues mientras el diésel aporta el 75% de las emisiones de PM_{2,5} primario, la gasolina es la principal aportante de contaminantes precursores de PM_{2,5} secundario, como lo son los SO_x y VOC, y el diésel a su vez aporta el 73% de los NO_x, otro precursor de PM_{2,5} secundario. Cabe anotar que

los NOx y VOC también son precursores de ozono troposférico (O₃). Es importante mencionar que el bajo aporte del GNV a las emisiones contaminantes está relacionado con que tan solo el 2,4% del parque automotor opera con este combustible.

Finalmente, en la Tabla 12 se presentan las emisiones de contaminantes criterio de cada una de las categorías del parque automotor, de acuerdo al cilindraje y al tipo de combustible utilizado.

Tabla 12. Emisiones de contaminantes criterio por categoría vehicular, tamaño y tipo de combustible

	ton/año				
	CO	NO _x	SO _x	VOC	PM _{2,5}
Autos particulares	21.355	834	58	495	17
Ligeros	15.208	246	17	257	10
Gasolina	1.839	158	17	151	2
Diésel	1	1	0	0	0
GNV	13.368	87	0	106	8
Medianos	4.621	507	37	168	7
Gasolina	1.832	367	37	148	3
Diésel	24	33	0	5	3
GNV	2.765	106	0	15	1
Pesados	1.526	82	4	69	1
Gasolina	721	57	4	63	0
Diésel	2	2	0	0	0
GNV	803	23	0	6	0
Autos comerciales	422	139	9	26	7
Ligeros	248	55	6	14	1

	ton/año				
	CO	NOx	SOx	VOC	PM2,5
Gasolina	166	38	6	13	1
Diésel	1	2	0	0	0
GNV	81	15	0	0	0
Medianos	118	76	3	9	5
Gasolina	45	19	2	4	0
Diésel	39	52	1	5	5
GNV	34	4	0	0	0
Pesados	56	9	0	3	1
Gasolina	9	1	0	1	0
Diésel	6	7	0	1	1
GNV	41	1	0	0	0
Buses	1.738	809	3	138	26
Ligeros	1.052	183	1	50	5
Gasolina	888	14	0	30	0
Diésel	138	168	1	20	5
GNV	26	0	0	0	0
Medianos	520	389	1	56	15
Gasolina	236	2	0	7	0
Diésel	225	386	1	49	15
GNV	59	1	0	0	0
Pesados	166	237	1	32	6
Gasolina	0	0	0	0	0
Diésel	159	237	1	32	5
GNV	7	0	0	0	0
Camiones	4.715	1.485	6	276	134
Ligeros	217	107	1	15	7

	ton/año				
	CO	NOx	SOx	VOC	PM2,5
Gasolina	159	1	0	4	0
Diésel	43	105	1	11	7
GNV	15	0	0	0	0
Medianos	3.151	776	3	153	78
Gasolina	1.913	8	0	46	0
Diésel	473	765	3	104	77
GNV	765	3	0	3	0
Pesados	1.347	602	2	108	49
Gasolina	877	3	0	19	0
Diésel	465	599	2	89	49
GNV	5	0	0	0	0
Motos 2T	592	1	0	271	7
Ligeras	592	1	0	271	7
Gasolina	592	1	0	271	7
Motos 4T	3.560	152	25	739	49
Ligeras	926	33	2	209	15
Gasolina	926	33	2	209	15
Medianas	2.530	115	22	505	32
Gasolina	2.530	115	22	505	32
Pesadas	105	4	0	24	2
Gasolina	105	4	0	24	2
Tractocamiones	98	162	1	20	5
Pesados	98	162	1	20	5
Gasolina	0	0	0	0	0
Diésel	98	162	1	20	5
GNV	0	0	0	0	0

	ton/año				
	CO	NOx	SOx	VOC	PM2,5
Volquetas	577	313	1	47	41
Medianas	459	59	0	22	28
Gasolina	397	1	0	9	0
Diésel	62	58	0	13	28
Pesadas	118	254	1	25	12
Diésel	118	254	1	25	12
Total	33.056	3.895	103	2.012	285

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

7.4 Emisiones de gases efecto invernadero

En la Tabla 13 y Figura 18 se presentan las emisiones estimadas de gases de efecto invernadero (GEI) del parque automotor del área metropolitana de Bucaramanga, y las respectivas emisiones de CO₂-eq. En la tabla 14 se presentan las emisiones de gases efecto invernadero (GEI) per cápita por categoría vehicular.

Tabla 13. Emisiones de gases de efecto invernadero por categoría vehicular

Categoría vehicular	ton/año		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Autos particulares	348.256	4.763	17
Autos comerciales	74.177	25	3
Buses	89.618	195	2
Camiones	176.050	469	4
Motos 2T	1.865	42	0

Categoría vehicular	ton/año		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Motos 4T	129.781	227	0
Tractocamiones	18.305	0	0,5
Volquetas	38.450	4	2
Total	876.503	5.725	28
Total CO ₂ -eq	1.005.422		

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

Tabla 14. Emisiones de gases de efecto invernadero per cápita por categoría vehicular.

Categoría Vehicular	ton/año		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Auto particular	2,4671	0,0337	0,0001
Auto comercial	4,6850	0,0016	0,0002
Bus	15,6839	0,0341	0,0004
Camión	14,5424	0,0387	0,0003
Moto 2T	0,0862	0,0019	-
Moto 4T	0,4081	0,0007	-
Tractocamión	3,9690	-	0,0001
Volqueta	17,5011	0,0018	0,0009

Fuente: Autor

Los resultados muestran que los autos particulares son los principales responsables de las emisiones de CH₄ con un aporte del 83%. En lo relacionado con el N₂O, los autos son nuevamente los principales contribuyentes con un aporte de más del 61%, mientras los autos comerciales aportan el 11% y los camiones el 14%. En cuanto al CO₂, son los autos particulares,

los camiones y las motos 4T los principales aportantes con contribuciones del 40%, 20% y 15% respectivamente.

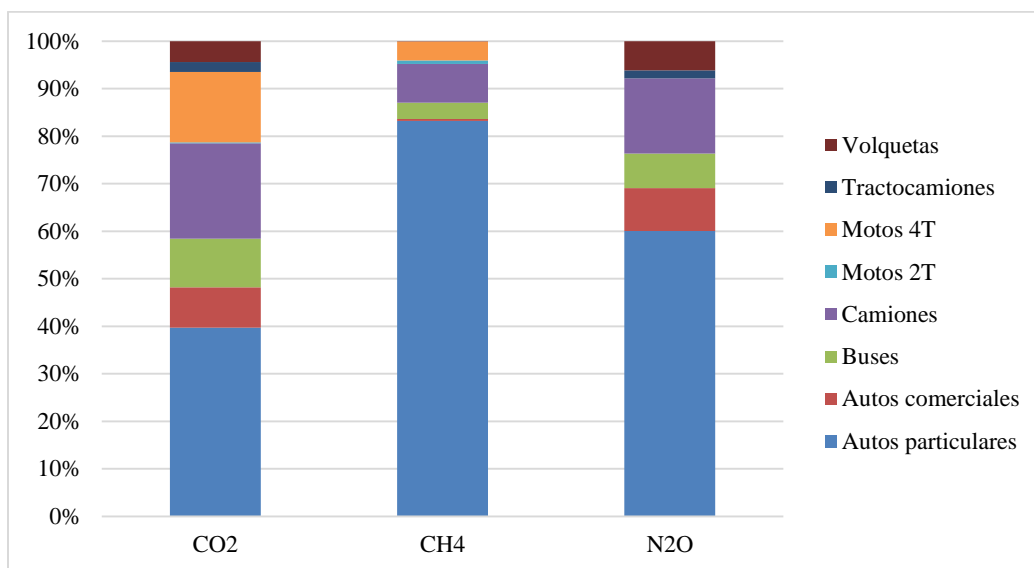


Figura 18. Distribución de emisiones de GEI por categoría vehicular

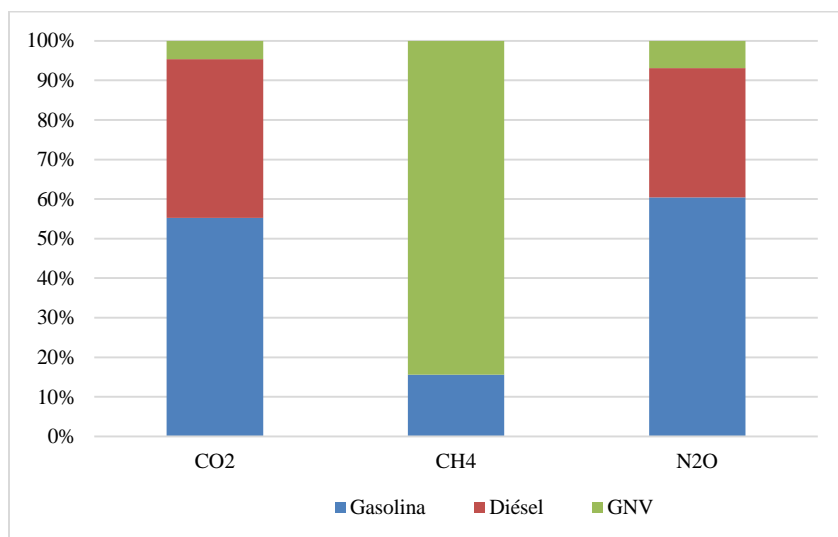
Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

En la Tabla 15 y la figura 19 Su análisis indica que a las emisiones de CO₂ contribuyen la gasolina con un 55%, el diésel con un 40% y el GNV con el 5% restante. Mientras tanto las emisiones de CH₄ se encuentran dominadas por el GNV, con un aporte del 84%. En cuanto al N₂O, sus emisiones provienen de la gasolina en un 61%, por el diésel en un 32% y por el GNV en un 7%.

Tabla 15. Emisiones de gases de efecto invernadero por tipo de combustible

Combustible	ton/año		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Gasolina	484.418	892	17
Diésel	351.753	0	9
GNV	40.332	4.833	2
Total	876.503	5.725	28
Total CO ₂ -eq	1.005.422		

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

**Figura 19. Distribución de emisiones de GEI por tipo de combustible**

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

La Tabla 16 presenta las emisiones de gases de efecto invernadero para todas las categorías del parque automotor, de acuerdo al cilindraje y al tipo de combustible utilizado.

Tabla 16. Emisiones de GEI por categoría vehicular, tamaño y tipo de combustible

	GEI (ton)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Autos particulares	348.256	4.763	16,8
Ligeros	105.705	3.923	2,6
Gasolina	89.851	28	2,2
Diésel	259	0	0,0
GNV	15.596	3.895	0,3
Medianos	219.574	599	12,5
Gasolina	193.606	28	11,4
Diésel	12.465	0	0,3
GNV	13.504	571	0,8
Pesados	22.977	241	1,8
Gasolina	19.211	11	1,5
Diésel	1.045	0	0,0
GNV	2.721	230	0,2
Autos comerciales	74.177	25	2,5
Ligeros	38.681	10	0,9
Gasolina	33.716	3	0,8
Diésel	598	0	0,0
GNV	4.367	7	0,1
Medianos	31.815	4	1,4
Gasolina	11.044	1	0,7
Diésel	20.146	0	0,8
GNV	625	3	0,0
Pesados	3.681	12	0,1
Gasolina	261	0	0,0

	GEI (ton)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Diésel	3.280	0	0,1
GNV	139	12	0,0
Buses	89.618	195	2,0
Ligeros	25.282	9	0,4
Gasolina	2.404	5	0,1
Diésel	22.133	0	0,3
GNV	745	5	0,0
Medianos	41.728	185	0,9
Gasolina	907	176	0,1
Diésel	39.385	0	0,7
GNV	1.436	8	0,2
Pesados	22.608	1	0,7
Gasolina	0	0	0,0
Diésel	22.242	0	0,6
GNV	365	1	0,1
Camiones	176.050	469	4,5
Ligeros	16.689	3	0,3
Gasolina	230	1	0,0
Diésel	16.430	0	0,2
GNV	29	2	0,0
Medianos	93.547	462	2,7
Gasolina	1.114	365	0,1
Diésel	91.661	0	2,6
GNV	772	98	0,1
Pesados	65.814	4	1,5
Gasolina	400	3	0,0

	GEI (ton)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Diésel	65.382	0	1,4
GNV	32	1	0,0
Motos 2T	1.865	42	0,0
Ligeras	1.865	42	0,0
Gasolina	1.865	42	0,0
Motos 4T	129.781	227	0,0
Ligeras	11.407	32	0,0
Gasolina	11.407	32	0,0
Medianas	116.860	191	0,0
Gasolina	116.860	191	0,0
Pesadas	1.513	4	0,0
Gasolina	1.513	4	0,0
Tractocamiones	18.305	0	0,5
Pesados	18.305	0	0,5
Gasolina	0	0	0,0
Diésel	18.305	0	0,5
GNV	0	0	0,0
Volquetas	38.450	4	1,7
Medianas	4.632	4	0,2
Gasolina	29	4	0,0
Diésel	4.602	0	0,2
Pesadas	33.818	0	1,6
Diésel	33.818	0	1,6
Total	876.503	5.725	28

Fuente: Grupo de trabajo (convenio 000195 de 2017).

7.5 Aforos vehiculares

Los conteos vehiculares para la caracterización de las vías y determinación de los flujos vehiculares y patrones de conducción se hicieron para trece puntos distribuidos en todo el casco urbano del Área Metropolitana de Bucaramanga. Se estudiaron vías principales y residenciales para días martes, miércoles y jueves en el transcurso de siete semanas del año 2017, las fechas exactas y las direcciones de cada punto de aforo se relacionan en la Tabla 17.

En el Anexo B se pueden ver los registros de los aforos vehiculares al igual que registros fotográficos.

Tabla 17. Puntos de aforos vehiculares

Punto Aforo	Vías objeto de aforo	Fecha
P1	Carrera 27 Parque Turbay, entre Calle 50 y 51	19 de octubre 2017
P2	Diagonal 15 entre calles 55 y 56	25 de octubre 2017
P3	Vía Bucaramanga-Girón frente a tránsito de Bucaramanga	31 de octubre 2017
P4	Carrera 33 Parque San Pío, entre calle 45 y 47	2 de noviembre 2017
P5	Rincón de Girón, Carrera 17 entre calles 41 y 39	7 de noviembre 2017
P6	Carrera 36 entre calles 55 y 54	9 de noviembre 2017
P7	Calle 9 entre carreras 8 y 9 – Piedecuesta	14 de noviembre 2017
P8	Carrera 6 entre calles 6 y 7 – Piedecuesta	14 de noviembre 2017
P9	Carrera 26 entre calles 18 y 19 – Girón	15 de noviembre 2017
P10	Avenida los Caneyes frente a Metro Cencosud – Girón	16 de noviembre 2017
P11	Avenida Quebradaseca Carrera 33a - 34 Frente Centro comercial Megamall	21 de noviembre 2017
P12	Calle 29 entre carreras 8 y 9 Floridablanca	22 de noviembre 2017

Punto Aforo	Vías objeto de aforo	Fecha
P13	Calle 36 entre carreras 19 y 20 Centro	23 de noviembre 2017

Fuente: Autor

De acuerdo con los aforos vehiculares los contaminantes generados por las fuentes móviles, tienen un comportamiento en el cual las horas en que se generan los máximos de emisiones son entre las 6 y 8 de la mañana y las 5 y 6 de la tarde que es cuando comienza y termina la jornada laboral de la mayoría de los residentes en el área metropolitana de Bucaramanga. Según los aforos vehiculares realizados en el área metropolitana existe mayor flujo vehicular de autos particulares principalmente de motos, siendo estos los principales emisores de contaminantes criterio como CO, SOX, VOC, NOX. Los camiones y volquetas son una categoría representativa de PM_{2,5} Y NOX.

8. Conclusiones y recomendaciones

- Se apoyó en la construcción del inventario de emisiones contaminantes atmosféricos generados por fuentes móviles del Área Metropolitana de Bucaramanga donde circulan aproximadamente 521.000 vehículos de los cuales el 92% son vehículos particulares, especialmente motocicletas con un 65% (4% motos 2T y 61% motos 4T) y 27% autos particulares. De acuerdo a esta información, se logró estimar una tasa de motorización de 199 motos/1000 habitantes, indicando un crecimiento descontrolado de motocicletas; un fenómeno que va en aumento en todo el país.

- El parque automotor de la región es relativamente joven con menos de 10 años de antigüedad del 70% de la flota vehicular, mientras un 10% tiene más de 20 años. El 10% de los camiones y el 20% de las volquetas tienen más de 30 años de antigüedad, por lo cual se recomienda renovar esta pequeña flota (1210 camiones y 439 volquetas) lo que disminuiría significativamente las emisiones de algunos contaminantes.

- Los autos particulares y los camiones son las categorías vehiculares con la mayor demanda energética, pues para el año 2016 consumieron respectivamente el 40,5% y el 19,6% del total de energía. Después de éstas categorías se ubican las motos 4T, los buses y los autos comerciales, que consumieron el 14,8%, 10,1% y 8,5%, respectivamente, de la energía total.

- En relación a las emisiones estimadas de contaminantes criterio, se encontró que los autos particulares contribuyen significativamente a las emisiones de CO y SO_x, con aportes del 65% y 56%, respectivamente, y alrededor del 20% de las emisiones de NO_x y VOC. Los camiones son una categoría representativa en el aporte de emisiones de PM_{2,5} y NO_x, con 47% y 38%, mientras las volquetas aportan el 14% del PM_{2,5} y el 8% de los NO_x. Según estos resultados, el

Área Metropolitana de Bucaramanga debería no solo enfocarse en las fuentes móviles con mayor contribución de emisiones de PM_{2,5} primario sino también en las fuentes móviles que emiten contaminantes precursores de PM_{2,5} secundario, como lo son los SO_x, NO_x y VOC.

- La flota vehicular del Área Metropolitana de Bucaramanga tiene un aporte de gases invernadero de 1.005.422 toneladas de CO₂-eq en el año base 2016, de estos la gasolina contribuyó con el 51%, el diésel con el 35% y el GNV con el 14% restante.

Referencias bibliográficas

- AMVA-UPB. (2013). Inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá, año base 2011. Convenio 243 de 2012. Medellín.
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Universidad Pontificia Bolivariana. (2010). Plan de descontaminación del aire en la región metropolitana del Valle de Aburrá. Medellín: Convenio 543 de 2008.
- Davis, N., Lents, J., Osses, M., Nikkila, N., & Bart, M. (2005). Development and application of an international vehicle emissions model. Transportation Research Board 81st Annual Meeting. Washington, D.C.
- Heaps, C. (2012). Long-range Energy Alternatives Planning (LEAP) system. [Software version 2012.0017]. Somerville, MA, USA: Stockholm Environment Institute
- Patiño, J. A. (2006). Ajuste y mejoramiento del modelo de inventario de emisiones atmosféricas de fuentes móviles del Valle de Aburrá. Trabajo de grado. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.

Apéndices

Apéndice A. Solicitud de información del parque automotor registrado en el municipio



DAMB-SAM 03 AGO 2017

Bucaramanga,

www.amb.gov.co

Teléfono: 6444831

Correo: info@amb.gov.co

Bucaramanga, Santander, Colombia.

SERVIENTREGA
288596614

COPIA

03 AGO 2017

Doctor

MILLER HUMBERTO SALAS RONDON

Director General

DIRECCION DE TRANSITO Y TRANSPORTE DE BUCARAMANGA

Kilómetro 4 Vía Girón

Tel. 6809906 Ext. 102

Bucaramanga

Asunto: Solicitud de información del parque automotor registrado en el Municipio.

Respetado Doctor Salas,

En cumplimiento de nuestras funciones misionales establecidas en la Ley 99 de 1993, venimos gestionando la adquisición de herramientas técnicas y científicas para el desarrollo de políticas y estrategias en pro del mejoramiento de la calidad del aire y, por ende, la salud pública de los Municipios del Área Metropolitana de Bucaramanga.

Para el cumplimiento de los objetivos trazados, hemos suscrito un convenio de asociación con la Universidad Pontificia Bolivariana -UPB, Sede Medellín, para la elaboración del inventario de emisiones atmosféricas provenientes de las fuentes fijas y móviles del Área Metropolitana de Bucaramanga, como instrumento de apoyo para la definición y evaluación de las medidas de reducción de la contaminación y la toma de decisiones en el ejercicio de Autoridad Ambiental urbana.

Como fase inicial para la elaboración del inventario de las emisiones atmosféricas generadas por las fuentes móviles, solicitamos el apoyo de la Dirección de Tránsito para que suministre la base de datos de los vehículos registrados en su dependencia al año 2016, discriminados por número de placa, clase (automóviles, motos de 2 y 4 tiempos, taxis, buses, camiones, tractocamiones y volquetas), tipo de servicio (público, privado o especial), marca, modelo, cilindraje, número de serie, número de motor, fecha de ingreso a la dirección de tránsito y si el vehículo se encuentra activo o no.



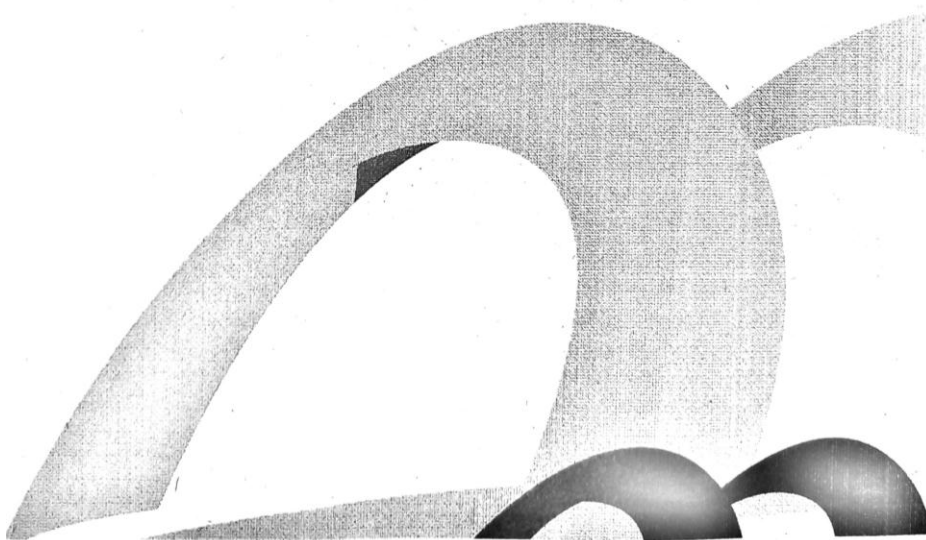
www.amb.gov.co
Teléfono: 6444831
Correo: info@amb.gov.co
Bucaramanga, Santander, Colombia.

De antemano agradezco su colaboración y quedamos atentos a su respuesta, cualquier inquietud podrá comunicarse con el Ingeniero Kento Taro Magara Gómez de la Universidad Pontificia Bolivariana, al correo electrónico kento.magara@upb.edu.co o al número telefónico 6796220 Ext. 20478.

Atentamente,

LUIS ALBERTO MORALES RINCÓN
Subdirector Ambiental

Proyectó:	Javier Flórez	Contratista SAM	
Revisó:	Oscar Mauricio Rojas Figueredo	Profesional Universitario SAM	
Oficina Responsable:	Subdirección Ambiental Metropolitana SAM		





www.amb.gov.co
Teléfono: 6444831
Correo: info@amb.gov.co
Bucaramanga, Santander, Colombia.

DAMB-SAM- B 6 2 6 6

Bucaramanga, 03 AGO 2017

SERVIENTREGA
288596613
COPIA 03 AGO 2017

Ingeniero
HECTOR CACERES RINCON
Gerente
SECRETARIA DE TRANSITO Y TRANSPORTE DE GIRON
Km. 6 Autopista Girón – Bucaramanga
Tel. 6917272 Ext. 118.
Girón

Asunto: Solicitud de información del parque automotor registrado en el Municipio

Respetado Ingeniero Cáceres:

En cumplimiento de nuestras funciones misionales establecidas en la Ley 99 de 1993, venimos gestionando la adquisición de herramientas técnicas y científicas para el desarrollo de políticas y estrategias en pro del mejoramiento de la calidad del aire y, por ende, la salud pública de los Municipios del Área Metropolitana de Bucaramanga.

Para el cumplimiento de los objetivos trazados, hemos suscrito un convenio de asociación con la Universidad Pontificia Bolivariana -UPB Sede Medellín, para la elaboración del inventario de emisiones atmosféricas provenientes de las fuentes fijas y móviles del Área Metropolitana de Bucaramanga, como instrumento de apoyo para la definición y evaluación de las medidas de reducción de la contaminación y la toma de decisiones en el ejercicio de Autoridad Ambiental urbana.

Como fase inicial para la elaboración del inventario de las emisiones atmosféricas generadas por las fuentes móviles, solicitamos el apoyo de la Secretaría de Tránsito para que suministre la base de datos de los vehículos registrados en su dependencia al año 2016, discriminados por número de placa, clase (automóviles, motos de 2 y 4 tiempos, taxis, buses, camiones, tractocamiones y volquetas), tipo de servicio (público, privado o especial), marca, modelo, cilindraje, número de serie, número de motor, fecha de ingreso a la dirección de tránsito y si el vehículo se encuentra activo o no.




www.amb.gov.co
 Teléfono: 6444831
 Correo: info@amb.gov.co
 Bucaramanga, Santander, Colombia.

De antemano agradezco su colaboración y quedamos atentos a su respuesta, cualquier inquietud podrá comunicarse con el Ingeniero Kento Taro Magara Gómez de la Universidad Pontificia Bolivariana, al correo electrónico kento.magara@upb.edu.co o al número telefónico 6796220 Ext. 20478.

Atentamente,



LUIS ALBERTO MORALES RINCÓN
 Subdirector Ambiental

Proyectó:	Javier Flórez	Contratista SAM	
Revisó:	Oscar Mauricio Rojas Figueredo	Profesional Universitario SAM	
Oficina Responsable:	Subdirección Ambiental Metropolitana SAM		



www.amb.gov.co

Teléfono: 6444831

Correo: info@amb.gov.co

Bucaramanga, Santander, Colombia.

DAMB-SAM- 6264
Bucaramanga, 03 AGO 2017

COPIA
SERVIENTREGA
03 AGO 2017
288596611

Doctora
ROSMARY MEJIA SERRANO
Directora General
DIRECCION DE TRANSITO Y TRANSPORTE DE FLORIDABLANCA
Calle 9 N° 8-14
Tel. 6497871
Floridablanca

Asunto: Solicitud de información del parque automotor registrado en el Municipio

Respetada Doctora Mejía:

En cumplimiento de nuestras funciones misionales establecidas en la Ley 99 de 1993, venimos gestionando la adquisición de herramientas técnicas y científicas para el desarrollo de políticas y estrategias en pro del mejoramiento de la calidad del aire y, por ende, la salud pública de los Municipios del Área Metropolitana de Bucaramanga.

Para el cumplimiento de los objetivos trazados, hemos suscrito un convenio de asociación con la Universidad Pontificia Bolivariana -UPB-, Sede Medellín, para la elaboración del inventario de emisiones atmosféricas provenientes de las fuentes fijas y móviles del Área Metropolitana de Bucaramanga, como instrumento de apoyo para la definición y evaluación de las medidas de reducción de la contaminación y la toma de decisiones en el ejercicio de Autoridad Ambiental urbana.

Como fase inicial para la elaboración del inventario de las emisiones atmosféricas generadas por las fuentes móviles, solicitamos el apoyo de la Dirección de Tránsito para que suministre la base de datos de los vehículos registrados en su dependencia al año 2016, discriminados por número de placa, clase (automóviles, motos de 2 y 4 tiempos, taxis, buses, camiones, tractocamiones y volquetes), tipo de servicio (público, privado o especial), marca, modelo, cilindraje, número de serie,



www.amb.gov.co
 Teléfono: 6444831
 Correo: info@amb.gov.co
 Bucaramanga, Santander, Colombia.

número de motor, fecha de ingreso a la dirección de tránsito y si el vehículo se encuentra activo o no.

De antemano agradezco su colaboración y quedamos atentos a su respuesta, cualquier inquietud podrá comunicarse con el Ingeniero Kento Taro Magara Gómez de la Universidad Pontificia Bolivariana, al correo electrónico kento.magara@upb.edu.co o al número telefónico 6796220 Ext. 20478.

Atentamente,

LUIS ALBERTO MORALES RINCÓN
 Subdirector Ambiental

Proyectó:	Javier Flórez	Contratista SAM	
Revisó:	Oscar Mauricio Rojas Figueredo	Profesional Universitario SAM	
Oficina Responsable:	Subdirección Ambiental Metropolitana SAM		



www.amb.gov.co
Teléfono: 6444831
Correo: info@amb.gov.co
Bucaramanga, Santander, Colombia.

DAMB-SAM- 6 2 6 5

Bucaramanga, 03 AGO 2017

COPIA
SERVIENTREGA
03 AGO 2017
288596672

Ingeniera
KELLY ESPERANZA GÓMEZ CONTRERAS
Secretaria de Tránsito y Movilidad
SECRETARIA DE TRANSITO Y MOVILIDAD PIEDECUESTA
Centro Comercial De la Cuesta
Tel. 6852020 Ext.200
Piedecuesta

Asunto: Solicitud de información del parque automotor registrado en el Municipio

Respetada Ingeniera Gómez:

En cumplimiento de nuestras funciones misionales establecidas en la Ley 99 de 1993, venimos gestionando la adquisición de herramientas técnicas y científicas para el desarrollo de políticas y estrategias en pro del mejoramiento de la calidad del aire y, por ende, la salud pública de los Municipios del Área Metropolitana de Bucaramanga.

Para el cumplimiento de los objetivos trazados, hemos suscrito un convenio de asociación con la Universidad Pontificia Bolivariana -UPB, Sede Medellín, para la elaboración del inventario de emisiones atmosféricas provenientes de las fuentes fijas y móviles del Área Metropolitana de Bucaramanga, como instrumento de apoyo para la definición y evaluación de las medidas de reducción de la contaminación y la toma de decisiones en el ejercicio de Autoridad Ambiental urbana.

Como fase inicial para la elaboración del inventario de las emisiones atmosféricas generadas por las fuentes móviles, solicitamos el apoyo de la Secretaría de Tránsito para que suministre la base de datos de los vehículos registrados en su dependencia al año 2016, discriminados por número de placa, clase (automóviles, motos de 2 y 4 tiempos, taxis, buses, camiones, tractocamiones y volquetes), tipo de servicio (público, privado o especial), marca, modelo, cilindraje, número de serie,

Aforos Campo - Microsoft Excel (Error de activación de productos)

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista

Calibri 11 Fuente Alineación Número Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de celda Insertar Eliminar Formato Celdas Autosuma Rellenar Ordenar y filtrar Buscar y seleccionar Modificar

	AH	AI	AJ	AK	AL	AM	AN	AO	AP	AQ	AR	AS	AT	AU	AV	AW	AX	AY
1	11-12 m.				12-1 p.m.						1-2 p.m.							
	Taxis	Buses	Camiones	Metrolínea	Autos	Motos	Taxis	Buses	Camiones	Metrolínea	Autos	Motos	Taxis	Buses	Camiones	Metrolínea	Autos	Motos
2																		
3	843	93	147	24	2599	3346	841	95	100	23	2055	2670	853	88	97	30	2350	2245
4	595	32	72	29	1015	2159	436	31	63	46	895	1835	540	26	58	49	1214	2020
5	605	290	353	0	1511	2100	358	259	257	0	1191	2310	420	256	226	0	1555	2335
6	590	262	19	41	450	692	545	228	11	37	510	613	460	237	8	37	642	1006
7	365	130	464	0	1150	2342	346	109	462	0	1055	2099	332	123	479	0	1101	1974
8	300	24	11	0	794	320	235	25	7	0	855	635	282	20	11	0	1113	640
9	74	1	4	6	103	320	75	0	11	5	80	290	58	1	12	7	99	315
10	70	4	13	0	93	212	55	3	9	0	121	187	56	7	15	0	180	240
11	171	183	130	0	425	985	139	155	84	0	320	835	179	138	74	0	392	847
12	250	145	224	0	523	1356	221	118	181	0	675	1197	255	159	188	0	673	1275
13	160	27	76	0	367	720	155	19	49	0	333	375	127	24	46	0	298	519
14	148	49	25	4	310	752	142	53	10	7	149	675	104	50	11	5	225	611
15	675	7	20	9	463	529	595	4	14	9	444	410	525	2	5	10	633	630
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		

Flujos_Vehiculares ID Tramos

Aforos Campo - Microsoft Excel (Error de activación de productos)

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista

Calibri 11 Fuente Alineación Número Formato condicional Dar formato como tabla Estilos de celda Insertar Eliminar Formato Celdas Autosuma Rellenar Ordenar y filtrar Buscar y seleccionar Modificar

	AY	AZ	BA	BB	BC	BD	BE	BF	BG	BH	BI	BJ	BK	BL	BM	BN	BO	BP
1	2-3 p.m.					3-4 p.m.						4-5 p.m.						
	Motos	Taxis	Buses	Camiones	Metrolínea	Autos	Motos	Taxis	Buses	Camiones	Metrolínea	Autos	Motos	Taxis	Buses	Camiones	Metrolínea	Autos
2																		
3	2245	965	107	140	30	2330	2240	1012	90	142	29	2525	2370	1015	77	117	28	2730
4	2020	502	24	67	34	1153	1781	531	22	86	34	1120	1860	571	25	63	38	1215
5	2235	439	251	339	0	1594	1929	435	300	373	0	1606	1990	389	285	404	0	1672
6	1006	630	245	6	39	640	1011	574	246	15	40	584	995	565	237	13	41	540
7	1974	306	109	432	0	823	1318	373	116	391	0	1173	1491	251	135	487	0	1485
8	640	338	30	11	0	740	640	377	39	23	0	585	755	287	18	12	0	767
9	315	51	1	5	8	157	290	73	1	10	3	126	360	72	2	14	2	120
10	240	85	3	10	0	125	205	69	4	7	0	86	228	91	5	9	0	140
11	847	162	149	126	0	296	653	168	150	95	0	429	845	134	156	114	0	
12	1275	176	157	215	0	691	1513	269	180	209	0	746	1707	247	163	196	0	852
13	519	143	23	55	0	208	551	150	23	78	0	286	450	100	26	98	0	311
14	611	156	49	17	5	232	435	248	39	15	5	230	540	242	48	26	5	
15	630	707	3	11	6	585	495	805	6	6	9	576	583	817	6	8	9	634
16																		
17																		
18																		
19																		
20																		
21																		
22																		

Flujos_Vehiculares ID Tramos

Aforos Campo - Microsoft Excel (Error de activación de productos)

Archivo Inicio Insertar Diseño de página Fórmulas Datos Revisar Vista

Cortar Copiar Copiar formato

Portapapeles Fuente Alineación Número Formato condicional Dar formato como Estilos

BZ17 fx

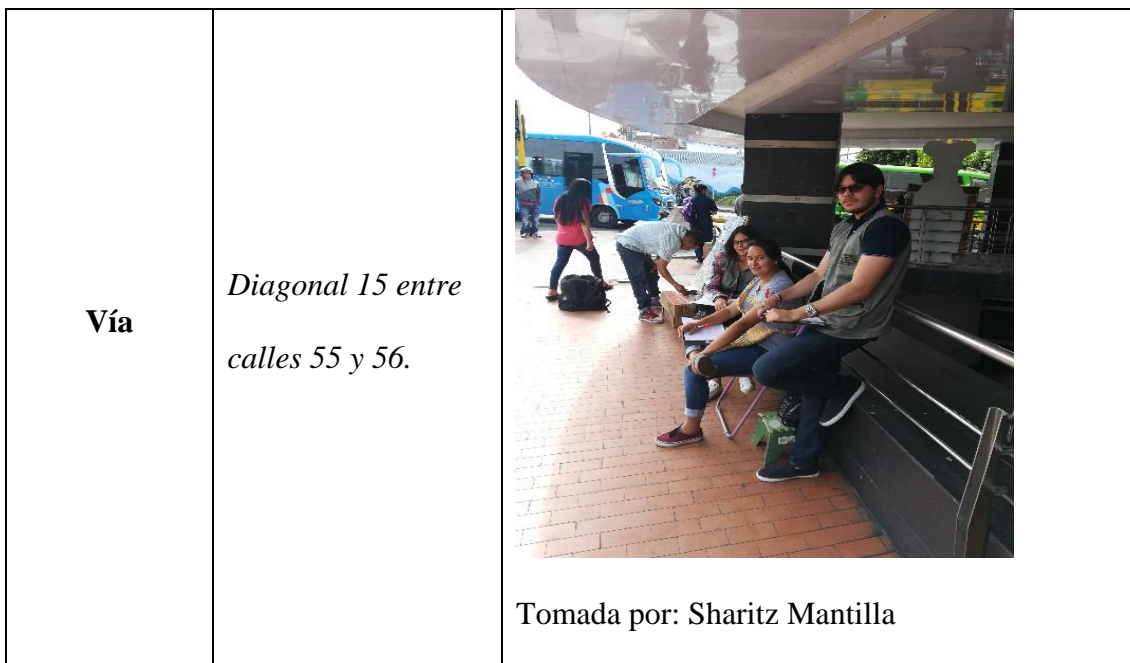
	BP	BQ	BR	BS	BT	BU	BV	BW	BX	BY	BZ	CA
1	5-6 p.m.						6-7 p.m.					
	Autos	Motos	Taxis	Buses	Camiones	Metrolínea	Autos	Motos	Taxis	Buses	Camiones	Metrolínea
2												
3	2730	3560	815	71	102	28	1937	4119	724	39	62	29
4	1215	2438	536	29	78	45	1210	2603	462	32	45	53
5	1672	3345	349	294	318	0	1334	2805	365	247	183	0
6	540	915	470	228	8	38	497	728	412	224	10	43
7	1485	2862	238	125	401	0						
8	767	727	290	27	16	0						
9	120	380	70	1	15	4						
10	140	270	62	4	8	0						
11												
12	852	2482	216	153	163	0						
13	311	557	122	33	76	0						
14												
15	634	535	690	4	12	10						
16												
17												
18												
19												
20												
21												
22												

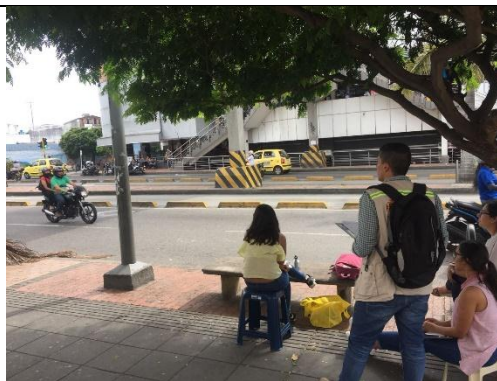
Flujos Vehiculares ID Tramos

Listo

Registro fotográfico de aforos vehiculares

Vía	<i>Carrera 27 entre calles 50 y 51.</i>	 <p>Tomada por: Laura Joya</p>  <p>Tomada por: Daniela Camacho</p>
------------	---	---





Tomada por: Daniela Camacho



Tomada por: Leandro López

Vía

*Vía Bucaramanga
Girón frente a
Dirección de
Tránsito y
Transporte de
Bucaramanga*



Tomada por: Oscar Rueda



Tomada por: Oscar Rueda

Vía

*Carrera 33 Parque
San Pío entre calles
45 y 47*



Tomada por: Oscar Rueda



Tomada por: Daniela Camacho



Tomada por: Daniela Camacho

Vía

*Rincón de Girón,
Carrera 17 entre
calles 41 y 39*





Tomada por: Oscar Rueda



Tomada por: Funcionario Alcaldía Girón



Tomada por: Funcionario Alcaldía Girón

<p>Vía</p>	<p><i>Carrera 36 entre calles 55 y 54</i></p>	 <p>Tomada por: Daniela Camacho</p>  <p>Tomada por: Leandro López</p>
-------------------	---	--

<p>Vía</p>	<p><i>Calle 9 entre carreras 8 y 9 Piedecuesta</i></p>	<p>Sin registro fotográfico</p>
-------------------	--	---------------------------------

Vía



*Carrera 6 entre
calles 6 y 7
Piedecuesta*





Tomada por: Leandro López





Tomada por: Leandro López

<p>Vía</p>	<p><i>Carrera 26 entre calles 18 y 19 Girón</i></p>	 <p>Tomada por: Oscar Rueda</p>  <p>Tomada por: Leandro López</p>
-------------------	---	--

<p>Vía</p>	<p><i>Avenida los Caneyes frente a Metro Cencosud – Girón</i></p>	 <p>Tomada por: Leandro López</p>
-------------------	---	---

<p>Vía</p>	<p><i>Avenida Quebradaseca Carrera 33a - 34 Frente Centro comercial Megamall</i></p>	 <p>Tomada por: Sharitz Mantilla</p>
-------------------	--	--

Vía	<i>Calle 29 entre carreras 8 y 9 Floridablanca</i>	 <p>Tomada por: Leandro López</p>
------------	--	---

Vía	<i>Calle 36 entre carreras 19 y 20 Centro</i>	 <p>Tomada por: Leandro López</p>
------------	---	--