



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Análisis de Ciclo de Vida para diferentes fuentes energéticas usadas en los vehículos de transporte de pasajeros de la ciudad de Bogotá**

**Yohén Cuéllar Álvarez**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental  
Bogotá, Colombia  
2016



# **Análisis de Ciclo de Vida para diferentes fuentes energéticas usadas en los vehículos de transporte de pasajeros de la ciudad de Bogotá**

**Yohén Cuéllar Álvarez**

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de  
**Magíster en ingeniería ambiental**

Director:

Ph.D. Luis Carlos Belalcázar Cerón

Línea de investigación:

Inventarios de emisiones

Grupo de investigación:

Grupo de investigación de Calidad del Aire

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Química y Ambiental

Bogotá, Colombia

2016



*“La actividad más importante que un ser humano puede lograr es aprender para entender, porque entender es ser libre”. Baruch Spinoza.*



## Agradecimientos

Luis Carlos Belalcázar Cerón, Ph.D., profesor asociado al Departamento de Ingeniería Química y Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, a quien admiro y respeto. Agradezco su valiosa orientación y sus maravillosas ideas.

Grupo de investigación de Calidad del Aire de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá, encabezado por los ingenieros Néstor Yezid Rojas Roa y Rodrigo Jiménez Pizarro, por apoyarme y acogerme durante el curso del programa de maestría.

Al Grupo de investigación en Biocombustibles, Energía, y Protección del Medio Ambiente, del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, dirigido por el ingeniero Helmer Acevedo, por su importante colaboración en el suministro de datos para la ejecución de este estudio.

Al ingeniero Rodrigo Buitrago por su capacitación y enseñanzas para el manejo del *software* OpenLCA.

Al Centro Suizo para Inventarios de Análisis de Ciclo de Vida (*Swiss Centre for Life Cycle Inventories*) por facilitar la licencia de manera gratuita de la base de datos ecoinvent .

A Colciencias y a la Universidad Nacional de Colombia por su contribución económica por medio del programa "Jóvenes Investigadores e Innovadores 2013".

A mi familia, fuente de apoyo constante e incondicional, especialmente a mi mamá Yamile, pues sin su ayuda no hubiera sido posible llegar hasta aquí. A mi querido hijo Manuel R. por ser paciente y esperarme todo este tiempo. A mis hermanas por alentarme. Por estar ahí cuando los necesité, a mis tíos y a mis compañeros de siempre: Eder Anillo, Jefferson Castellanos, José Ricardo Torres y Oscar Lombana.





## Resumen

Los vehículos automotores son una fuente importante de contaminación del aire. Sus emisiones no solo se generan por el tubo de escape del vehículo, sino que también se generan emisiones en etapas previas a la combustión como la producción de la fuente energética utilizada. Para evaluar y comparar los impactos ambientales potenciales en todas estas etapas se puede emplear la metodología Análisis de Ciclo de Vida (ACV). Un ACV evalúa los impactos ambientales potenciales asociados a un producto o proceso abarcando desde las etapas de extracción de los recursos hasta su uso, disposición, reciclaje o reúso [1]. Para el caso de los vehículos automotores se puede utilizar un ACV específico para esta fuente de contaminación, conocido como ACV Del Pozo a la Rueda o análisis *Well-to-Wheel* (WTW) [2].

En este estudio se desarrolló un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) Del Pozo a la Rueda (DPR) para los combustibles y biocombustibles utilizados en el transporte de pasajeros de Bogotá, Colombia. Se tuvieron en cuenta los siguientes medios de transporte de pasajeros: los vehículos con motor a gasolina (motocicletas, automóviles particulares y taxis) y los vehículos con motor a diésel (buses tradicionales y *TransMilenio*). Se utilizó el *software* OpenLCA®, la base de datos ecoinvent y toda la información disponible en la ciudad para llevar a cabo este ACV. Se consideraron la categoría de impacto cambio climático (emisiones de CO<sub>2</sub>-eq) y las emisiones de contaminantes PM<sub>2.5</sub>, CO y NO<sub>x</sub>. También se evaluaron fuentes alternativas de energía como el gas natural vehicular (GNV) y la electricidad. Las unidades funcionales utilizadas fueron: gramos de contaminante por kilómetro recorrido (g/km) y gramos de contaminante por kilómetro recorrido y por pasajero transportado (g/km\*pasajero).

Los resultados de este trabajo indican que la mayor parte de las emisiones se generan en la etapa de combustión del vehículo, las cuales son superiores al 80 % para los vehículos que utilizan combustibles fósiles líquidos. Sin embargo, en el caso de los vehículos livianos, las emisiones de PM<sub>2.5</sub> que se generan en las etapas previas a la combustión

son significativas, y se originan principalmente en la producción de la gasolina (61 %) y del bioetanol (17 %).

El ACV muestra que los buses de *TransMilenio* eléctricos producen las menores emisiones de los contaminantes evaluados. Adicionalmente, aunque las motocicletas son un medio de transporte rápido y económico, generan emisiones por kilómetro-pasajero transportado equivalentes a los vehículos livianos sin catalizador. Finalmente, al convertir los buses BTR *TransMilenio* de diésel a electricidad, se presentan reducciones en las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq del 86 %; PM2.5, del 88 %; CO, del 99 %; y de NOx, del 97 %. Sin embargo, en la ciudad de Bogotá se lograrían mejoras más significativas si los pasajeros que se movilizan en motocicletas o transporte particular cambiaran a transporte público.

**Palabras clave: Análisis de Ciclo de Vida Del Pozo a la Rueda, OpenLCA, transporte de pasajeros, combustibles, biocombustibles, fuentes alternativas de energía.**

## Abstract

Vehicles of internal combustion engine are a major source of air pollution. These emissions are not only generated by the exhaust pipe of the vehicle; emissions are also generated by preceding stages to the combustion, as in the production of energy source used. The methodology of Life Cycle Analysis (LCA) can be used to evaluate and compare the potential environmental impacts in all of these stages. LCA assesses the potential environmental impacts associated with a product or process steps, ranging from resource extraction to use, disposal, recycling, or reuse. In the case of motor vehicles, a specific LCA known as LCA well to wheel (WTW) can be used for this source of pollution.

In this study, a Life-Cycle Assessment (LCA) of the well-to-wheel (WTW) for fuels and biofuels used in the transport of passengers in Bogota, Colombia is presented. The following means of transport of passengers were taken into account: gasoline engine vehicles (motorcycles, private cars and taxis), and vehicles with diesel engine (traditional buses and BRT *TransMilenio*). We use the software OpenLCA®, the ecoinvent data base,

and all information available in the city to develop this LCA. The Impact categories climate change (CO<sub>2</sub>-eq) and emissions of pollutants PM<sub>2.5</sub>, CO and NO<sub>x</sub> were considered. Alternative energy sources were also evaluated, such as compressed natural gas (NG) and electricity. The functional units used were grams of pollutant per kilometer (g/km) and grams of pollutant per kilometer and passenger transported (g/km\*passenger).

The results of this study indicate that most of the emissions are generated in the combustion stage of the vehicle, which are higher than 80% for vehicles using liquid fossil fuels. However, for light vehicles, PM<sub>2.5</sub> emissions generated in the stages prior to combustion in the vehicle are significant; these are originated mainly in the production of gasoline (61 %) and bioethanol (17 %).

The LCA shows that electric *TransMilenio* buses produce lower emissions of the pollutants evaluated. Additionally, while motorcycles are a means of fast and economical transportation, they generate emissions per kilometer-passenger transported equivalent to light vehicles without catalyst. Finally, converting BRT *TransMilenio* buses from diesel to electricity would represent reductions in the emissions of pollutants (CO<sub>2</sub>-eq: 86 %; PM<sub>2.5</sub>: 88 %; CO 99 % and NO<sub>x</sub>: 97 %); however, more significant improvements would be achieved in Bogota if the passengers who mobilize on motorcycles or private transport changed to public transport.

**Keywords: Life-Cycle Assessment, Well-to-Wheel, OpenLCA, passenger transportation, fuels, biofuels, alternative energy sources.**



# Contenido

	Pág.
Resumen .....	IX
Lista de figuras.....	XV
Lista de tablas .....	XVII
Lista de símbolos y abreviaturas .....	XIX
Introducción .....	1
<b>1. Antecedentes y estado del arte.....</b>	<b>5</b>
1.1 Análisis de Ciclo de Vida .....	5
1.2 Incertidumbre en el Análisis de Ciclo de Vida .....	9
1.3 ACV Del Pozo a la Rueda.....	10
1.4 ACV de los combustibles en Colombia .....	13
1.5 Herramientas de <i>software</i> utilizadas en ACV de combustibles.....	15
<b>2. Metodología.....</b>	<b>23</b>
2.1 Definición de objetivos y alcance del ciclo de vida .....	23
2.2 Alcance del estudio y Límites del Sistema .....	24
2.3 Descripción de los datos de Inventario del Ciclo de Vida .....	27
<b>3. Interpretación de resultados del Análisis de Ciclo de Vida.....</b>	<b>33</b>
3.1 Interpretación de resultados: unidad funcional masa de contaminante/kilómetro recorrido.....	33
3.2 Interpretación de resultados: unidad funcional masa de contaminante/kilómetro-pasajero transportado .....	42
<b>4. Conclusiones y recomendaciones.....</b>	<b>51</b>
4.1 Conclusiones .....	51
4.2 Recomendaciones .....	52
<b>A. Anexo: descripción de datos de entradas y salidas para el Análisis de Ciclo de Vida</b>	<b>55</b>
<b>B. Anexo: Módulos para la producción de combustibles fósiles y electricidad en OpenLCA®.....</b>	<b>87</b>
Bibliografía .....	115



## Lista de figuras

<b>Figura 1-1:</b>	Etapas de un ACV [11] .....	5
<b>Figura 2-1:</b>	Límites del sistema para la producción de combustibles fósiles (Fuente: esta investigación).....	25
<b>Figura 2-2:</b>	Límites del sistema para la producción de bioetanol y biodiésel (Fuente: esta investigación).....	26
<b>Figura 2-3:</b>	Límites del sistema para la producción de electricidad (Fuente: esta investigación).....	27
<b>Figura 3-1:</b>	Emisiones de CO <sub>2</sub> -eq kilogramos/kilómetro recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los buses de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).....	34
<b>Figura 3-2:</b>	Emisiones de PM <sub>2.5</sub> miligramos/kilómetro-recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los buses de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).....	35
<b>Figura 3-3:</b>	Emisiones de CO gramos/kilómetro-recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los buses de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).....	36
<b>Figura 3-4:</b>	Emisiones de NO <sub>x</sub> gramos/kilómetro-recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los buses de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).....	37
<b>Figura 3-5:</b>	Emisiones de CO <sub>2</sub> -eq kilogramos/kilómetro recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los vehículos livianos de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).....	38
<b>Figura 3-6:</b>	Emisiones de PM <sub>2.5</sub> miligramos/kilómetro recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los vehículos livianos de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).....	39
<b>Figura 3-7:</b>	Emisiones de CO gramos/kilómetro-recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los vehículos livianos de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).....	41
<b>Figura 3-8:</b>	Emisiones de NO <sub>x</sub> gramos/kilómetro-recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los vehículos livianos de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).....	42
<b>Figura 3-9:</b>	Emisiones totales de CO <sub>2</sub> -eq (gramos/kilómetro-pasajero transportado). Análisis DPR para los vehículos de transporte de pasajeros de Bogotá (Fuente: esta investigación).....	44

<b>Figura 3-10:</b> Emisiones totales de PM2.5 (miligramos/kilómetro-pasajero transportado). Análisis DPR para los vehículos de transporte de pasajeros de Bogotá (Fuente: esta investigación).....	46
<b>Figura 3-11:</b> Emisiones totales de CO (gramos/kilómetro-pasajero transportado). Análisis DPR para los vehículos de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).....	47
<b>Figura 3-12:</b> Emisiones totales de NOx (gramos/kilómetro-pasajero transportado). Análisis DPR para los vehículos de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).....	48
<b>Figura 3-13:</b> Impacto de la ocupación de los vehículos en las emisiones de CO <sub>2</sub> -eq (kg/km-pasajero), PM2.5 (mg/km-pasajero), CO (g/km-pasajero) y NOx (g/km- pasajero) estimadas en el análisis DPR. Vehículos livianos: las emisiones se calcularon según la ocupación de diseño y la ocupación mínima (sólo un pasajero). Buses de transporte público: las emisiones se estimaron según la ocupación de diseño y considerando un 25 % de sobrecupo. (Fuente: esta investigación). .....	50



## Lista de tablas

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1-1:</b> Herramientas de cálculo abiertas al público utilizadas para el ACV (adaptación de [45]).	16
<b>Tabla 1-2:</b> Herramientas de cálculo comerciales utilizadas para el ACV (adaptación de [45]).	18
<b>Tabla 2-1:</b> Factores de emisión, economía de combustible y número de pasajeros/vehículo-km para la flota vehicular de Bogotá (Fuente: esta investigación).	32
<b>Tabla A- 1:</b> Datos de fertilizantes en el cultivo de caña referidos a 1 kg caña producido (Adaptado de [22]).	55
<b>Tabla A- 2:</b> Datos entradas/salidas, producción de 1 kg caña de azúcar (Adaptado de [22]).	56
<b>Tabla A- 3:</b> Datos entradas pesticidas cultivo de caña referido a 1 kg caña producido (Adaptado de [22]).	57
<b>Tabla A- 4:</b> Datos entradas preparación de la tierra cultivo de caña referido a 1 kg caña producido (Adaptado de [22]).	57
<b>Tabla A- 5:</b> Datos entradas Insumos químicos producción de etanol referido a 1 kg de etanol 99,6% (Adaptado de [22]).	57
<b>Tabla A- 6:</b> Datos entradas/salidas Producción de etanol en Colombia referido a 1 kg de etanol 99,6% (Adaptado de [22]).	58
<b>Tabla A- 7:</b> Datos parámetro de asignación económico para la producción de etanol 99,6% (Adaptado de [22]).	58
<b>Tabla A- 8:</b> Datos entradas/salidas producción de 1 kg Fruto fresco de palma (Adaptado de [22]).	59
<b>Tabla A- 9:</b> Datos entradas/salidas Extracción aceite de palma referido a 100 t fruto fresco de palma (Adaptado de [22]).	60
<b>Tabla A- 10:</b> Datos entradas/salidas refinación aceite de palma referido a 1 t de aceite refinado (Adaptado de [22]).	61
<b>Tabla A- 11:</b> Datos insumos refinación de glicerina referido a 1 t de biodiésel (Adaptado de [22]).	61
<b>Tabla A- 12:</b> Datos parámetro de asignación económico para la producción de biodiésel (Adaptado de [22]).	61
<b>Tabla A- 13:</b> Datos entradas/salidas producción de biodiésel en Colombia referido a 1 t de biodiésel (Adaptado de [22]).	62
<b>Tabla A- 14:</b> Datos entradas/salidas producción de 1 kg de petróleo crudo (Adaptado de [54]).	63

---

<b>Tabla A- 15:</b> Datos entradas/salidas producción de 1 kg de gasolina sin plomo en refinería (Adaptado de [54]) .....	65
<b>Tabla A- 16:</b> Datos entradas/salidas producción 1 kg de diésel en refinería (Adaptado de [54]) .....	66
<b>Tabla A- 17:</b> Datos entradas/salidas producción 1 kg de diésel de bajo azufre en refinería (Adaptado de [54]) .....	67
<b>Tabla A- 18:</b> Datos entradas/salidas producción 1 kg de diésel de bajo azufre en estación de servicio (Adaptado de [54]) .....	68
<b>Tabla A- 19:</b> Datos entradas/salidas producción de 1 kg de gas natural (Adaptado de [54]) .....	69
<b>Tabla A- 20:</b> Datos entradas/salidas producción 1 kWh de electricidad a partir de carbón (Adaptado de [54]) .....	71
<b>Tabla A- 21:</b> Datos entradas/salidas producción 1 kWh de electricidad en hidroeléctrica (Adaptado de [54]) .....	72
<b>Tabla A- 22:</b> Datos entradas/salidas producción 1 kWh de electricidad mix consumidor Bogotá (Elaboración propia) .....	73
<b>Tabla A- 23:</b> Datos entradas/salidas producción 1 kWh de electricidad alto voltaje, mix consumidor Bogotá (Adaptado de [54]) .....	73
<b>Tabla A- 24:</b> Datos entradas/salidas producción 1 kWh de electricidad medio voltaje, mix consumidor Bogotá (Adaptado de [54]) .....	73
<b>Tabla A- 25:</b> Potencial de calentamiento global gases efecto invernadero (kg CO <sub>2</sub> -eq/kg) [55] .....	76
<b>Tabla B- 1:</b> Capacidad instalada por tecnología [57]. .....	89
<b>Tabla B- 2:</b> Emisiones GEI generación eléctrica Colombia (CO <sub>2</sub> equivalente) [57]. ..	89
<b>Tabla B- 3:</b> Contribución por fuente generación de electricidad Sistema interconectado brasileño [69]. .....	90

## Lista de símbolos y abreviaturas

### Abreviaturas

Abreviatura	Término
ACV	Análisis de Ciclo de Vida
BEB	Bus Eléctrico de Batería
BHCC	Bus Híbrido de Celda de Combustible
BHDE	Bus Híbrido Diésel-Electricidad
BTR	Bus de Tránsito Rápido
CE	Consumo de Energía
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
COV	Compuesto Orgánico Volátil
CUS	Cambio de Uso del Suelo
DAE	Demanda Acumulada de Energía
DNP	Departamento Nacional de Planeación
DPR	Del Pozo a la Rueda
EAE	Evaluación Ambiental Estratégica
EIA	Evaluación de Impacto Ambiental
EICV	Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida
<i>EMPA</i>	<i>Eidgenössische Materialprüfungs und Forschungsanstalt (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology)</i>
ERA	Evaluación del Riesgo Ambiental
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GLP	Gas Licuado de Petróleo
GNC	Gas Natural Comprimido
ICV	Inventario del Ciclo de Vida
<i>IEA</i>	<i>International Energy Agency</i>
<i>IPCC</i>	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IPK	Índice Pasajero por Kilómetro
<i>ISO</i>	<i>International Organization for Standardization</i>
<i>PA</i>	Potencial de Acidificación
<i>PAA</i>	Potencial de Agotamiento Abiótico
PCG	Potencial de Calentamiento Global

**Abreviatura Término**

---

PE	Potencial de Eutrofización
PET	Potencial de Ecotoxicidad
PM2.5	Material Particulado menor a 2.5 $\mu\text{m}$
PTH	Potencial de Toxicidad Humana
TIC	Tecnología de la Información y la Comunicación
<i>TWC</i>	<i>Three Way Catalyst</i>
VC	Vehículo Convencional de gasolina
<i>WTW</i>	<i>Well To Wheel</i>

# Introducción

Para sustituir los combustibles fósiles en el sector energético se ha dado un movimiento hacia el consumo y uso de energías renovables o sostenibles (solar, eólica, geotérmica, de biomasa –biocombustibles de primera y segunda generación–). Estas medidas se han adoptado para disminuir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y mitigar el cambio climático [3]. Cabe recalcar que el sector transporte es uno de los de mayor atención, pues el consumo de petróleo se centra en este sector [4].

En este marco, el Estado colombiano ha suscrito diferentes tratados internacionales encaminados a prevenir o reducir al mínimo las causas del cambio climático y mitigar sus efectos adversos. Uno de los aspectos fundamentales ha sido la reducción de emisiones de GEI, lo cual ha generado la toma de medidas a nivel sectorial como uso racional y eficiente de la energía, masificación del gas natural, promoción de los biocombustibles, mejoras en transporte y movilidad, entre otros [5], fundamentados en que los sectores que contribuyen en mayor proporción a las emisiones globales de GEI son las actividades pecuarias, por la generación de metano, el transporte por quema de combustibles y la deforestación [5].

Concretamente en el caso del sector transporte, la tendencia en las políticas gubernamentales colombianas ha sido el favorecimiento del uso de los biocombustibles (bioetanol y biodiésel) como sustitutos de los combustibles de origen fósil, los cuales son la principal fuente energética en los vehículos de motor de combustión interna. Esta disposición se refleja con la promulgación y establecimiento de leyes como la Ley 693 de 2001 y la Ley 939 de 2004, y posteriormente la Resolución 1289 de 2005 y los Decretos 1135 de 2009 y 2629 de 2007. Sin embargo, aún existe incertidumbre sobre si la utilización de este tipo de combustibles tiene beneficios ambientales considerables en comparación con sus equivalentes fósiles.

Sumado a esto, se han planeado otras opciones para la reducción de la quema de combustibles fósiles en el sector como vehículos livianos y de transporte masivo con

sistemas eléctricos. Se debe mencionar que los proyectos de transporte masivo en las principales ciudades y la restricción del “pico y placa” han contribuido al mejoramiento de la movilidad y la calidad del aire en las zonas urbanas [6].

Si bien los vehículos de motor de combustión interna son una fuente importante de contaminantes del aire [7]–[9], se debe aclarar que las emisiones no solo se presentan en el tubo de escape del vehículo, sino que también se generan emisiones en la producción de la fuente energética, razón por la cual se requiere aplicar un método para evaluar y comparar los impactos ambientales relacionados con la utilización de las diferentes alternativas propuestas en Colombia para el sector transporte.

Con el fin de reducir los riesgos para los humanos y el medio ambiente, se despliegan diferentes herramientas aplicadas a procesos, productos y servicios como el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), la Evaluación Ambiental Estratégica (EAE), la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), la Evaluación del Riesgo Ambiental (ERA), el análisis beneficio-costos, la huella ecológica, el eco-diseño, entre otras, de las cuales el Análisis de Ciclo de Vida es una de las herramientas más aplicadas a nivel mundial [10].

En relación con lo anterior, un Análisis de Ciclo de Vida permite evaluar los impactos ambientales potenciales asociados a un producto o proceso, abarcando desde las etapas de extracción de los recursos hasta su uso previsto, disposición, reciclaje o reúso [1]. Para proporcionar una referencia, se define una unidad funcional a la cual los datos de entrada y de salida deben normalizarse. La fundamentación de la metodología ACV se incorpora en un número de normas internacionales publicadas por la ISO, donde se establecen cuatro fases principales: definición del objetivo y del alcance del estudio, análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV), Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV), e Interpretación del Ciclo de Vida [1], [11].

La metodología ACV ha sido ampliamente utilizada como herramienta para la evaluación del impacto de varios combustibles y fuentes energéticas vehiculares en distintos escenarios [10], [12]–[18]. Se debe mencionar que los impactos evaluados están condicionados a los sistemas productivos, y los estudios de impacto pueden variar de una región a otra. Los ACV de combustibles para el transporte son generalmente denominados Análisis de Ciclo de Combustible, o análisis *Well-to-Wheel* (WTW), que en Español se

conoce como análisis Del Pozo a la Rueda (DPR) [2]. Los resultados pueden ser expresados en unidades de energía, masa o distancia recorrida por el vehículo [18]–[20].

Adicionalmente, los estudios de ACV hasta ahora realizados en Colombia están principalmente enfocados en la cadena de producción de biocombustibles y su comparación con la gasolina y el diésel, y no se han incluido otras alternativas de fuente energética como el gas natural y la electricidad [21]–[26].

Por otra parte, se debe resaltar que uno de los sistemas de Buses de Tránsito Rápido (BTR) más popular en el mundo es *TransMilenio*, que funciona en Bogotá desde el año 2000. De los resultados logrados por este sistema, se destaca el ahorro de tiempo en los viajes, la alta capacidad y la reducción de accidentes y de emisiones [27]–[31]. La experiencia exitosa del sistema BTR en Bogotá ha impulsado la introducción de sistemas BTR en otras ciudades de la región y del mundo [27], [29], [32], [33].

Los Buses de Tránsito Rápido (BTR) son un modo de transporte masivo de pasajeros cómodo, rentable y flexible, en comparación con otras formas de transporte público que combinan estaciones y terminales [27], [31], [33]. Los sistemas BTR en varios lugares son nombrados como *High-Capacity Bus Systems*, *High-Quality Bus Systems*, *Metro-Bus*, *Express Bus Systems*, y *Busway Systems* o *Surface Metro Systems* [30]. Sin embargo, pese a que los sistemas BTR son considerados un modo sostenible de transporte, se encuentran muy pocos estudios relacionados con las emisiones generadas durante el ciclo de vida de los combustibles utilizados en estos [31], [33], [34]. Del mismo modo, son escasas las comparaciones de los ACV de los sistemas BTR con otros modos de transporte.

La presente investigación está dirigida a los vehículos de transporte de pasajeros de la ciudad de Bogotá, Colombia. Bogotá es la ciudad más poblada del país con una proyección a 2016 de 8 millones de habitantes, por lo cual existe una necesidad creciente de medios de transporte que garanticen los mínimos impactos sobre la calidad del aire y la salud de las personas, no solo en la etapa de operación del vehículo sino también desde la etapa inicial de producción o extracción de la fuente energética.

Es por esto que el presente trabajo se enfoca en evaluar los impactos ambientales de los distintos medios de transporte de pasajeros utilizados en Bogotá, mediante la realización de un Análisis de Ciclo de Vida Del Pozo a la Rueda, de acuerdo con las fuentes

energéticas usadas. Se consideran los vehículos con motor a gasolina (motocicletas, automóviles particulares y taxis) y los vehículos con motor a diésel (buses tradicionales y buses articulados del sistema BTR *TransMilenio*). También se tienen en cuenta fuentes alternativas de energía o de uso poco común en la ciudad, como el gas natural vehicular, la electricidad y los biocombustibles (biodiésel y el bioetanol, producidos en Colombia).

Inicialmente, se presenta la descripción de la metodología Análisis de Ciclo de Vida y algunos casos de estudio de combustibles y fuentes energéticas vehiculares a nivel nacional e internacional. Conjuntamente, se detallan algunas herramientas de cálculo (*software*) disponibles para la implementación de un ACV. Después, se presenta la selección del *software* para el desarrollo del ACV. Luego, se indican los límites de los sistemas considerados y el origen de los datos de Inventario del Ciclo de Vida. En este estudio se seleccionaron las categorías de impacto cambio climático (emisiones de CO<sub>2</sub>-eq) y las emisiones de los contaminantes CO, NO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub>.

Posteriormente, se presentan los resultados del ACV propuesto, teniendo en cuenta dos unidades funcionales: masa de contaminante emitido por kilómetro recorrido y masa de contaminante emitido por kilómetro recorrido-pasajero transportado. También se muestra un análisis de sensibilidad respecto a la cantidad de pasajeros transportados en los vehículos. Por último, se exponen las conclusiones y recomendaciones del análisis realizado.



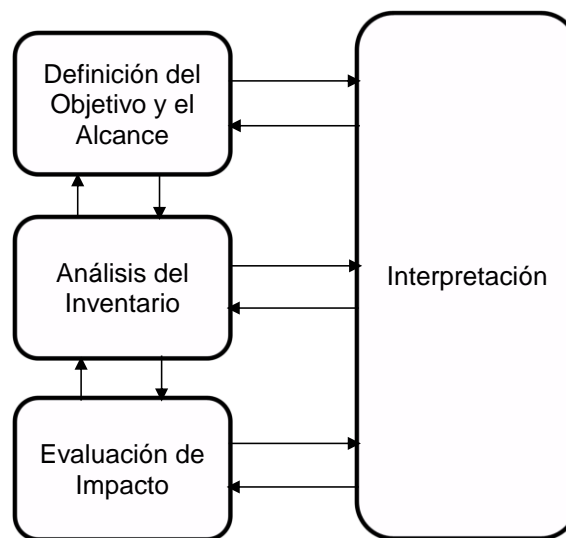
# 1. Antecedentes y estado del arte

## 1.1 Análisis de Ciclo de Vida

Un Análisis de Ciclo de Vida (ACV) es definido en la norma ISO 14040 como “la recopilación y evaluación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema o producto a través de su ciclo de vida”, entendiéndose ciclo de vida como “etapas consecutivas e interrelacionadas desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final” [1].

Un ACV sigue cuatro fases principales: definición del objetivo y del alcance del estudio, análisis de Inventario del Ciclo de Vida (ICV), Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida (EICV), e Interpretación del Ciclo de Vida, mostrados en la Figura 1-1. El ACV es una de las diversas técnicas de gestión ambiental existente, como por ejemplo la Evaluación del Riesgo, la Evaluación del Desempeño Ambiental, la Auditoría Ambiental y la Evaluación del Impacto Ambiental [1].

**Figura 1.1-1:** Etapas de un ACV [11]



### 1.1.1 Definición del objetivo y del alcance del ACV

Esta etapa incluye las razones para llevar a cabo el estudio, la aplicación prevista y la audiencia prevista. Se describen los límites del sistema de estudio y se define la unidad funcional. La unidad funcional es una medida cuantitativa de las funciones que los bienes (o servicios) proporcionan.

El resultado del ICV es una compilación de los insumos (recursos) y las salidas (emisiones) del producto durante su ciclo de vida, en relación con la unidad funcional.

La EICV está dirigida a la comprensión y evaluación de la magnitud y la importancia de los impactos ambientales potenciales del sistema estudiado [11]. En la interpretación, los resultados de las fases anteriores se evalúan en relación con el objetivo y el alcance, con el fin de llegar a conclusiones y recomendaciones [11]. El objetivo de un ACV establece la aplicación prevista, las razones del estudio y el público previsto.

En cuanto al alcance, debe considerar:

- Todas las operaciones que componen el sistema de producto a estudiar o aquellas operaciones que son objeto de interés como, por ejemplo, la etapa de producción. Es decir, que se deben definir los límites del sistema.
  - Se debe definir la unidad funcional sobre la cual se realizará el inventario de entradas y salidas al sistema.
  - Las categorías de impacto ambiental seleccionadas y la metodología de evaluación de impactos.
  - Los procedimientos de asignación para sistemas con múltiples productos de salida.
  - Las suposiciones, limitaciones y requisitos iniciales de calidad de los datos.
- **Unidad Funcional**

La unidad funcional es una referencia cuantitativa de las entradas y salidas de un Inventario del Ciclo de Vida (ICV) [9]. Los datos son normalizados y por tanto los resultados del ACV de la misma unidad funcional pueden ser comparados entre sí [3].

Las opciones de unidades funcionales son inspiradas por los objetivos del ACV, por lo cual estas varían entre estudios. En el caso del ACV de fuentes energéticas o combustibles

para el transporte, los resultados pueden ser expresados en unidades de energía, masa o distancia recorrida por el vehículo [3], [18]–[20].

### **1.1.2 Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV)**

El ICV de un producto o proceso cuantifica las entradas y salidas en todo el límite del sistema [35]. Los datos para cada proceso pueden ser:

- Entradas de energía, materia prima, entradas auxiliares y otras entradas físicas.
- Productos, coproductos y residuos.
- Emisiones al aire, vertimientos al agua y suelo.

Después de la recopilación de datos se requiere de estos procedimientos de cálculo:

- Validación de los datos.
- Relación de los datos con los procesos u operaciones unitarias.
- Relación de los datos con la unidad funcional.

Se debe mencionar que las actividades del ICV también incluyen la entrega de datos de todas las actividades en el sistema y el cálculo de las cargas ambientales en relación con la unidad funcional [3].

### **1.1.3 Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV)**

El objetivo de la EICV es proporcionar información como base para las conclusiones, las recomendaciones y la toma de decisiones, de acuerdo con el objetivo y el alcance definidos [1]. Evalúa los resultados del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) con respecto a su importancia ambiental. Por ello, el inventario de emisiones se asocia a categorías de impacto de interés definidas en el objetivo y alcance del ACV.

La Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) consta de siete actividades: selección de las categorías de impacto, clasificación, caracterización, normalización, agrupación, ponderación y análisis de calidad de los datos [1], donde las tres primeras son obligatorias, mientras que el resto son opcionales [3].

Por otra parte, Wiloso & Heijungs [3], en relación con los sistemas de bioenergía, indican que dos aspectos de la EICV que necesitan un mayor desarrollo son las categorías de impacto y evaluación de impacto regionalizado.

### ▪ **Metodologías de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida**

Las diferentes metodologías de Evaluación de Impacto del Ciclo de Vida se pueden agrupar en los siguientes dos grandes conjuntos en función de su objetivo final:

- Metodologías “*midpoints*” o de impactos de efecto intermedio: metodologías que tienen como resultado la definición de un perfil ambiental, mediante la cuantificación del efecto ambiental sobre diversas categorías (acidificación, destrucción capa de ozono, etc.) del producto, proceso o servicio analizado. Estas alcanzan solo la evaluación de los efectos indirectos o intermedios sobre el ser humano [36].
- Metodologías “*endpoints*” o de impactos de efecto final: metodologías que analizan el efecto último del impacto ambiental, esto es, tratan de identificar y definir el daño causado al hombre y a los sistemas naturales. Las categorías de impacto final son variables que afectan directamente a la sociedad [36].

Por ejemplo, la metodología CML 1992 (directrices holandesas) está basada en el modelado punto medio. Algunas de las categorías de impacto incluidas son: acidificación, cambio climático, demanda de energía acumulada, agotamiento de los recursos, ecotoxicidad, eutrofización, toxicidad humana, radiación ionizante, uso de la tierra, agotamiento de la capa de ozono, material particulado, oxidación fotoquímica, etc.

Las metodologías de evaluación de impacto para la Evaluación del Ciclo de Vida pueden fundamentarse en cualquiera de los siguientes principios [36]:

- EPS (*Environmental Priority Strategies*): metodología basada en el modelado de punto final, que expresa los resultados en valores monetarios.
- *Swiss Ecoscarcity (or Ecopoints)*: el método de la escasez ambiental o método suizo de ecopuntos, que permite una ponderación comparativa y la agregación de las diversas intervenciones ambientales mediante el uso de eco-factores.

Por otra parte, con respecto a los métodos de evaluación de impacto, se encuentra, por ejemplo, Eco-indicador 99, método de valoración de punto final, el cual expresa el impacto ambiental en una sola puntuación. Este método analiza tres tipos de daños: la salud humana, la calidad y los recursos de los ecosistemas. La unidad estándar dada en todas las categorías es el punto (Pt) o *millipoint* (MPT). Puesto que el objetivo de este método es la comparación de productos o componentes, el valor en sí mismo no es más relevante, sino más bien una comparación de valores [36].

A continuación se listan algunos métodos de evaluación [36]–[38]:

- CML 2001 (*Center of Environmental Science of Leiden University*)
- Eco-Scarcity 2006
- EDIP 2003
- EPA-*default methods*
- EPS 2000 - *environmental priority strategies in product development*
- ILCD 2011 *endpoint*
- ILCD 2011 *midpoint*
- IPCC 2007 (Cambio climático)
- IMPACT 2002+
- Selected Life Cycle Inventory indicators
- ReCiPe Endpoint
- ReCiPe Midpoint
- TRACI 2.1
- USEtox

#### **1.1.4 Interpretación de resultados**

La Interpretación del Ciclo de Vida es la fase final del procedimiento de ACV, donde se presentan las conclusiones, las recomendaciones y la toma de decisiones de acuerdo con el objetivo y alcance definidos [1].

## **1.2 Incertidumbre en el Análisis de Ciclo de Vida**

Con un ACV no es posible dar valores exactos de la cantidad de emisiones de Gases de Efecto Invernadero o el Consumo de Energía, porque diferentes tipos de incertidumbre

están involucradas: debido al tipo y la gestión de materias primas, las tecnologías de conversión, las tecnologías de uso final, los límites del sistema, las diferencias regionales, etc. Por tanto, los resultados son generados en amplios intervalos [18].

Huijbregts *et al.* (2003) [39] señalan tres tipos principales de incertidumbre en un ACV según su origen: (a) de los parámetros (errores de medición en los datos de entrada), (b) del escenario (horizonte de tiempo y escala geográfica), (c) del modelo (falta de diferenciación espacial y factor de caracterización para suma de emisiones).

Se ha encontrado que las etapas que más aportan incertidumbre a los resultados de ACVs de sistemas de combustibles son: el método utilizado para asignar los impactos entre los coproductos, el tipo de sistemas de referencia, la elección de la unidad funcional y el porcentaje de mezcla de combustibles, la dinámica de carbono en el suelo y los supuestos alrededor de la emisión de  $N_2O$  [2], [20]. Se debe aclarar que la selección de la tecnología vehicular no presenta tanta incertidumbre como las ya mencionadas [20].

En consecuencia Cherubini *et al.* (2009) [18] indican que la incertidumbre y un análisis de sensibilidad deberían integrarse en los resultados finales de un ACV.

### 1.3 ACV Del Pozo a la Rueda

En este tipo de ACV se debe destacar a Restianti & Gheewala (2012) [40], quienes realizaron el Análisis de Ciclo de Vida de la gasolina en Indonesia. Como método de análisis de impacto emplean CML 2000 y utilizan el *software* Simapro®. Las categorías de impacto evaluadas fueron el Potencial de Calentamiento Global (PCG), el Potencial de Acidificación (PA), el Potencial de Eutrofización (PE), el Potencial de Agotamiento Abiótico (PAA), el Potencial de Toxicidad Humana (PTH), y el Potencial de Ecotoxicidad (PET), de lo cual se obtuvo que la combustión de la gasolina sea predominantemente responsable del PCG, PA y PE. Por otro lado, el PAA está dominado por la etapa de extracción de petróleo crudo, y la refinación es la principal responsable de la toxicidad humana y del potencial de ecotoxicidad.

Así mismo, Gao & Winfield (2012) [14] investigaron el uso de energía, las emisiones de GEI y los costos para cinco tipos de tecnologías vehiculares disponibles en el mercado estadounidense, con similares medidas y prestaciones: un vehículo eléctrico híbrido, un

vehículo eléctrico híbrido enchufable, un vehículo eléctrico de rango extendido, un vehículo eléctrico de batería y un vehículo de celda de combustible. Estos se compararon con un vehículo convencional (VC). El ACV abarcó el ciclo del combustible y el ciclo del vehículo. Los resultados muestran que el vehículo eléctrico híbrido con la configuración de división de potencia alcanza el Consumo de Energía y las emisiones más bajas, con una reducción del uso de energía en un 42 % y las emisiones en un 35 %, en comparación con el VC.

Del mismo modo, Aguirre *et al.* (2012) [12] calcularon las entradas de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente de un vehículo convencional de gasolina (VC), un vehículo híbrido, y un vehículo eléctrico de batería, en California, para determinar los costos ambientales del ciclo de vida. Los resultados indican que el menor impacto global es del vehículo eléctrico de batería, seguido por el híbrido y, por último, el VC.

Adicionalmente, Ma *et al.* (2012) [16] destacaron que los beneficios de reducción de emisiones de GEI de los vehículos: eléctrico híbrido enchufable, eléctrico de batería y de celda de combustible, en comparación con los vehículos de gasolina, que van de 30 % a 65 % en los estudios DPR revisados por ellos. Igualmente, Elgowainy (citado por [16]) demostró el potencial de reducción de CO<sub>2</sub> de los vehículos eléctricos híbridos enchufables, concretamente mediante el uso de biocombustibles.

Faria *et al.* (2012) [41] indicaron que para la mezcla promedio de electricidad de la Unión Europea los vehículos eléctricos de batería tienen menos de la mitad de las emisiones que un vehículo de motor de combustión interna. Ellos presentan una Evaluación del Ciclo de Vida medioambiental y económica de tecnologías vehiculares convencionales y eléctricas, centrándose principalmente en la fuente de energía primaria y las emisiones de GEI en la fase de funcionamiento del vehículo. Se halla que para un VC la fase de operación es la que más contribuye a las emisiones de GEI, entre el 85 y 90 %. Mientras que para un vehículo eléctrico estas dependen del mix de generación de electricidad, cuando el mix de generación es dominado por recursos fósiles, estas representan un 75 % de la emisión del ciclo de vida.

Además, Faria *et al.* (2012) [41] encontraron que para una mezcla con una fuerte contribución de la fuente de energía nuclear o renovable, la fase dominante es la producción del vehículo y la batería, con un 50 % de las emisiones del ciclo de vida, lo cual está sujeto a la capacidad de la batería.





Ellos también concluyeron que los vehículos eléctricos de batería tienen el menor impacto sobre el cambio climático. Sin embargo, esto depende de la fuente de energía eléctrica. Por otra parte, el tipo de cultivo que se utiliza para producir el biocombustible influye en el efecto sobre el cambio climático ocasionado por las emisiones de  $N_2O$  procedentes de la utilización de fertilizantes. Además, los vehículos de gasolina y diésel tienen un efecto respiratorio inferior, en comparación con los vehículos que utilizan biocombustibles [17].

Finalmente, y para el impacto sobre el agotamiento de los recursos minerales, encontraron que la etapa del ciclo con la principal contribución es la producción del vehículo y sus componentes. Los vehículos de pila de combustible eléctricos tienen el mayor impacto debido a la utilización de materiales específicos a la celda de combustible y la batería. No obstante, el reciclaje de estos componentes reduce el impacto significativamente [17].

## 1.4 ACV de los combustibles en Colombia

A nivel nacional se destaca a Valencia (2012) [21], quien presenta las emisiones de GEI asociadas al ciclo de vida de los biocombustibles colombianos (bioetanol y biodiésel). Los procesos fueron simulados utilizando Aspen Plus®, Matlab® y Microsoft Excel®. Las categorías de impacto se calcularon utilizando *software* de WAR GUI adaptado a las condiciones internacionales. Como resultado final, se encuentra que los biocombustibles colombianos cumplen con los estándares internacionales de mitigación de GEI [21].

De la misma manera, en el estudio *Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia*, presentado en el 2012 por el consorcio CUE (Centro Nacional de Producción más Limpia, Universidad Pontificia Bolivariana y la *Empa*<sup>1</sup>) para el Ministerio de Minas y Energía, se analiza el impacto de las cadenas de producción de etanol y biodiésel y se comparan con las cadenas de combustibles fósiles. Como principales categorías de impacto se consideran el Potencial de Calentamiento Global (PCG a 100 años, IPCC) y la Demanda Acumulada de Energía no renovable (DAE), y como categorías de impacto de punto medio: la eutrofización, la acidificación, la eco-toxicidad,

---

<sup>1</sup> *Empa*, acrónimo en Alemán para *Eidgenössische Materialprüfungs und Forschungsanstalt* (Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology)



Al respecto, Saavedra y Vargas (2000) [26] realizaron una comparación y evaluación ambiental de todo el ciclo de vida del cultivo de caña de azúcar, en la modalidad tradicional y otra modalidad denominada “orgánica”, donde el fertilizante químico es sustituido por fertilizante orgánico (pollinaza). Como resultado final, se obtuvo que la modalidad orgánica es más amigable. Se utilizó como herramienta de cálculo el *software* SimaPro®.

## **1.5 Herramientas de *software* utilizadas en ACV de combustibles**

Existen diferentes herramientas de *software* utilizadas en el cálculo de ACV. Los tipos de *software* disponibles se pueden clasificar como comerciales (que requieren la adquisición de una licencia) y libres (abiertos al público). En ambos casos, se encuentran *software products* generales, es decir que funcionan para cualquier tipo de proceso; y específicos para combustibles que, a su vez, se pueden subdividir en varios combustibles o un solo combustible. Dentro de los programas comerciales se hallan Simapro, Gabi, Umberto, LB-Systemtechnik GmbH (un combustible). Entre los programas libres se encuentran: GREET, OpenLCA, GHGenius, LEM, BESS (un combustible).

En la Tabla 1-1 y la Tabla 1-2 se presentan y comparan algunas de estas herramientas y sus características. En particular, se tienen en cuenta los programas que han tenido actualizaciones recientes.

**Tabla 1-1:** Herramientas de cálculo abiertas al público utilizadas para el ACV (adaptación de [45]).

Criterio		CMLCA	OPENLCA	GEMIS	GREET
Aplicación	Tipo de productos o servicios	Todo tipo de productos o servicios	Todo tipo de productos o servicios	Energía, construcción, alimentos, transporte	Transporte
	Región geográfica	Según base de datos disponible	Según base de datos disponible	Países Unión Europea y de otras regiones (Japón, México, Estados Unidos)	Estados Unidos
	Flexibilidad para adaptación a condiciones locales	X	X	X	
	Incluye base de datos	X	X	X	X
	Permite Importación y exportación de datos	X	X	X	
Soporte manejo	Manual de usuario	X	X	X	X
	Ayuda en línea	X	X		X
	Ha sido utilizado para ACV de combustibles en Colombia		X		
Plataforma	Computador Windows	X	X	X	X
	Linux		X		
	Mac		X		

**Tabla 1-1:** Herramientas de cálculo abiertas al público utilizadas para el ACV (adaptación de [45]). (Continuación)

Criterio		CMLCA	OPENLCA	GEMIS	GREET
Idioma	Inglés	X	X	X	X
	Otros idiomas		Alemán, español	Checo, francés, alemán, español	
Tipos de análisis	Ambiental	X	X	X	X
	Social	X		Empleos	
	Económico	X	X	X	
Datos generales	Año última actualización	2012	2015	2009	2014
	Disponible en	<a href="http://www.cmlca.eu/">http://www.cmlca.eu/</a>	<a href="http://OpenLCA.org/web/guest">http://OpenLCA.org/web/guest</a>	<a href="http://www.iinas.org/gemis-download-en.html">http://www.iinas.org/gemis-download-en.html</a>	<a href="https://greet.es.anl.gov/">https://greet.es.anl.gov/</a>
	Desarrolladores	Institute of Environmental Sciences at Leiden University (CML)	GreenDeltaTC GmbH	International Institute for Sustainability Analysis and Strategy (IINAS)	Argonne National Laboratory

**Tabla 1-2:** Herramientas de cálculo comerciales utilizadas para el ACV (adaptación de [45]).

<b>Criterio</b>		<b>GaBi</b>	<b>SIMAPRO</b>	<b>REGIS</b>	<b>UMBERTO</b>
<b>Aplicación</b>	Todo tipo de productos o servicios	X	X	X	X
	Región geográfica	Según base de datos disponible	Según base de datos disponible	Europa	Según base de datos disponible
	Flexibilidad para adaptación a condiciones locales	X	X	X	X
	Incluye base de datos	X	X	X	X
	Permite Importación y exportación de datos	X	X	X	X
<b>Soporte manejo</b>	Manual de usuario	X	X	X	X
	Ayuda en línea	X	X	X	X
	Ha sido utilizado para ACV de combustibles en Colombia		X		
<b>Plataforma</b>	Computador Windows	X	X	X	X
	Linux				
	Mac			X	X

**Tabla 1-2:** Herramientas de cálculo comerciales utilizadas para el ACV (adaptación de [45]). (Continuación)

<b>Criterio</b>		<b>GaBi</b>	<b>SIMAPRO</b>	<b>REGIS</b>	<b>UMBERTO</b>
<b>Idioma</b>	Inglés	X	x	X	X
<b>Idioma Tipos de análisis</b>	Otros idiomas	Alemán, japonés, danés, taiwanés, portugués, español, chino, italiano, tailandés, francés		Alemán, japonés y español	Alemán, inglés
	Ambiental	X		X	X
<b>Tipos de análisis</b>	Social	X		X	
	Económico	X		X	X
<b>Costo</b>	Costo	1.125 EUR	1.800 EUR	Sin Dato	1.862 EUR
<b>Datos generales</b>	Año de última actualización	2014	2014	2006	
<b>Datos generales</b>	Disponible en	<a href="http://www.gabi-software.com/international/overview/product-sustainability-performance/">http://www.gabi-software.com/international/overview/product-sustainability-performance/</a>	<a href="http://www.pre-sustainability.com/simapro">http://www.pre-sustainability.com/simapro</a>	<a href="http://www.sinum.com/typo3/productos/software/">http://www.sinum.com/typo3/productos/software/</a>	<a href="http://www.ifu.com">www.ifu.com</a>
	Desarrolladores	PE INTERNATIONAL	PRé Consultants	sinum AG Switzerland	ifu Hamburg GmbH

Así como se encuentran múltiples herramientas de *software*, también existen múltiples bases de datos para Inventario del Ciclo de Vida (ICV), algunas públicas y otras comerciales. Aunque se han desarrollado bases de datos abiertas al público en diferentes países a nivel mundial [46], se encuentra que en regiones como Latinoamérica estas no son actualizadas con frecuencia, y además poseen información de pocos procesos. Particularmente Curran & Notten (2006) [46] mencionan que Colombia había iniciado una base de datos nacional para ICV, sin embargo, en la revisión de la literatura disponible al público no se encontró ninguna información al respecto.

De este modo, entre las bases de datos libres al público se hallan:

- **Agribalyse:** principales productos agrícolas franceses en la puerta de la granja, proporcionados por la Agencia francesa de Medio Ambiente y Gestión de la Energía (*ADEME*). Los datos de fondo deben ser conectados a los conjuntos de datos deecoinvent 2.2. [47].
- **USLCI:** creada para los Estados Unidos por el NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), contiene datos ICV para energía y combustibles, transporte, agua, procesos de transformación, infraestructura, metales, papel y productos de papel, vidrio, plásticos, productos químicos y minerales, madera y productos de madera, agrícolas, embalaje, productos y conjuntos de construcción, textiles, etc. [48].
- **NEEDS:** base de datos creada por NEEDS (*New Energy Externalities Developments for Sustainability*). Contiene ICV del suministro eléctrico industrial futuro en Europa, servicios de transporte futuros, electricidad y suministro de materiales [49].
- **ELCD** (*Life Cycle Database del Joint Research Center*): base de datos europea que contiene información para materiales, energía, transporte y gestión de residuos [50].
- **GREET** (*Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy use in Transportation*): GREET incluye más de 100 vías de combustible e incluye más de 80 tecnologías de vehículos de referencia para los Estados Unidos. Para un sistema de vehículo y combustible dado, GREET posee el consumo total de recursos (energía en fuentes no renovables y renovables), combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón juntos), petróleo, carbón, gas natural y agua. Se proporcionan las emisiones de GEI (CO<sub>2</sub>-eq): dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano



(CH<sub>4</sub>) y óxido nitroso (N<sub>2</sub>O); y las emisiones de contaminantes criterio: compuestos orgánicos volátiles (COV), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, el carbón negro (BC) y óxidos de azufre (SO<sub>x</sub>) [51].

Bases de datos comerciales:

- **Ecoinvent** : desarrollada por *Swiss Centre for Life Cycle Inventories*, es una de las bases de datos más completa. Contiene datos de agricultura, suministro de energía, transporte, biocombustibles y biomateriales, productos químicos a granel y de especialidad, construcción y materiales de embalaje, metales básicos y preciosos, procesamiento de metales, electrónica y TIC, así como del tratamiento de residuos [52].
- **GaBi**: creada por PE INTERNATIONAL, contiene datos ICV de agricultura, construcción, química y materiales, bienes de consumo, educación, electrónica y TIC, energía y servicios públicos, alimentos y bebidas, salud y vida, productos industriales, metales y minería, plásticos y textiles [53].



## **2. Metodología**

El desarrollo del ACV se realizó siguiendo las normas ISO 14040 [11] e ISO 14044 [35], con el fin de cuantificar los impactos ambientales asociados a las categorías de impacto seleccionadas. De acuerdo con las etapas definidas en la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, a continuación se describen los objetivos y el alcance, el análisis de inventario y la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida.

### **2.1 Definición de objetivos y alcance del ciclo de vida**

#### **2.1.1 Objetivo del ACV**

El presente trabajo se enfoca en evaluar los impactos ambientales de los distintos medios de transporte de pasajeros utilizados en Bogotá, de acuerdo con las fuentes energéticas usadas, mediante la realización de un Análisis de Ciclo de Vida Del Pozo a la Rueda. Se consideran los vehículos a gasolina (motocicletas, automóviles particulares y taxis) y los vehículos con motor diésel (buses tradicionales y BTR *TransMilenio*). También se tienen en cuenta fuentes alternativas de energía o de uso poco común en la ciudad, como el gas natural vehicular, la electricidad y los biocombustibles (biodiésel y bioetanol producidos en Colombia).

Las categorías de impacto seleccionadas son calentamiento global y calidad del aire (emisión de los contaminantes PM2.5, CO y NOx). La categoría de impacto calentamiento global se basa en los factores desarrollados por el Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). Los factores se expresan como Potencial de Calentamiento Global (PCG) en el horizonte temporal de los diferentes años, en donde el más común es el de 100 años (PCG100), calculados en la unidad de referencia: kg de CO<sub>2</sub> equivalente [36]–[38].

Para la realización de este Análisis de Ciclo de Vida se considera la información disponible en la ciudad de Bogotá y Colombia en el año 2012. En los casos donde no es posible

contar con datos nacionales, se utiliza literatura internacional, preferiblemente de regiones con características similares a Colombia. Particularmente, para la cadena de producción de combustibles fósiles no fue posible contar con datos de inventario nacionales, por ello se usan los datos de inventario de la base de datos ecoinvent 2.2. [54].

Finalmente, el objetivo del ACV propuesto es:

***Evaluar los impactos ambientales de los distintos medios de transporte de pasajeros utilizados en Bogotá, asociados a la categoría de impacto calentamiento global (emisiones de CO<sub>2</sub>-eq) y a las emisiones de contaminantes PM<sub>2.5</sub>, CO y NO<sub>x</sub>, de acuerdo con las fuentes energéticas usadas, mediante la realización de un Análisis de Ciclo de Vida Del Pozo a la Rueda.***

## 2.2 Alcance del estudio y Límites del Sistema

Los biocombustibles y combustibles aquí tratados son los utilizados como fuente energética en los vehículos de transporte de pasajeros de la ciudad de Bogotá, para los cuales se tendrá en cuenta la masa de contaminante emitida por unidad de distancia recorrida y pasajero transportado. Los datos de Inventario del Ciclo de Vida para cada proceso en su mayoría se encuentran en ecoinvent 2.2. [54] y los datos publicados por el consorcio CUE [22].

### ▪ Unidad Funcional

Para realizar la comparación de los sistemas propuestos se establecen como unidades funcionales:

- Unidad funcional 1: la cantidad de contaminante emitido en gramos al recorrer un kilómetro.

$$\frac{g \text{ contaminante}}{\text{kilómetro recorrido}}$$

- Unidad funcional 2: la cantidad de contaminante emitido en gramos para transportar un pasajero una distancia de un kilómetro.

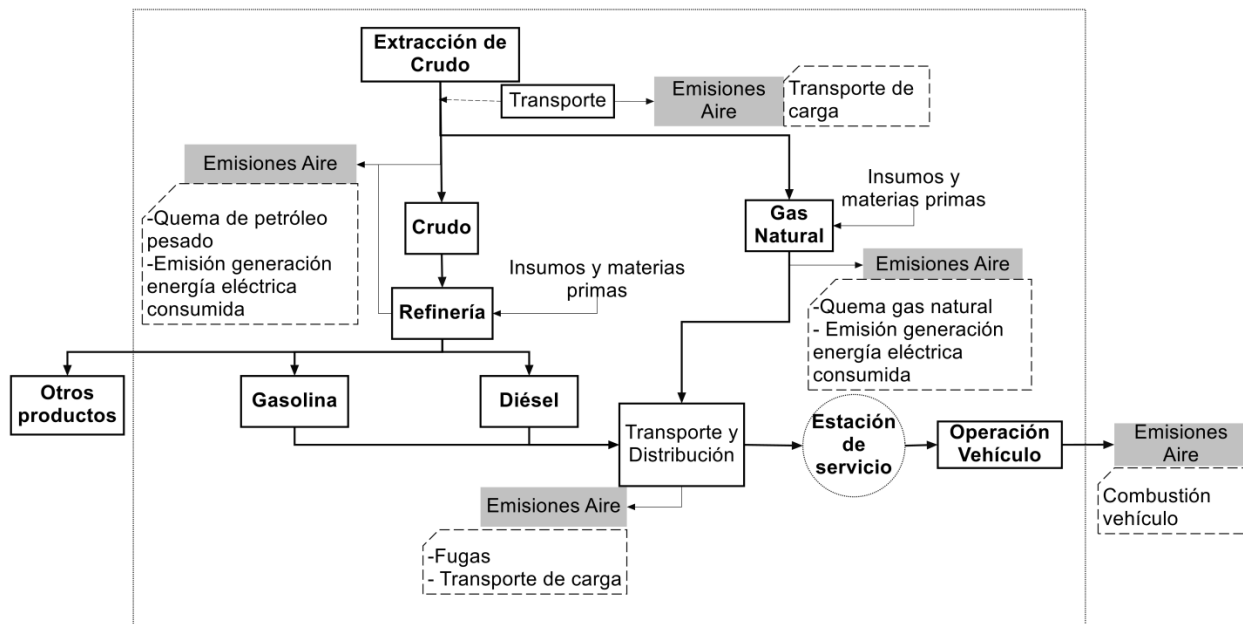
$$\frac{g \text{ contaminante}}{\text{kilómetro} \times \text{Pasajero transportado}}$$

### ▪ Límites del sistema

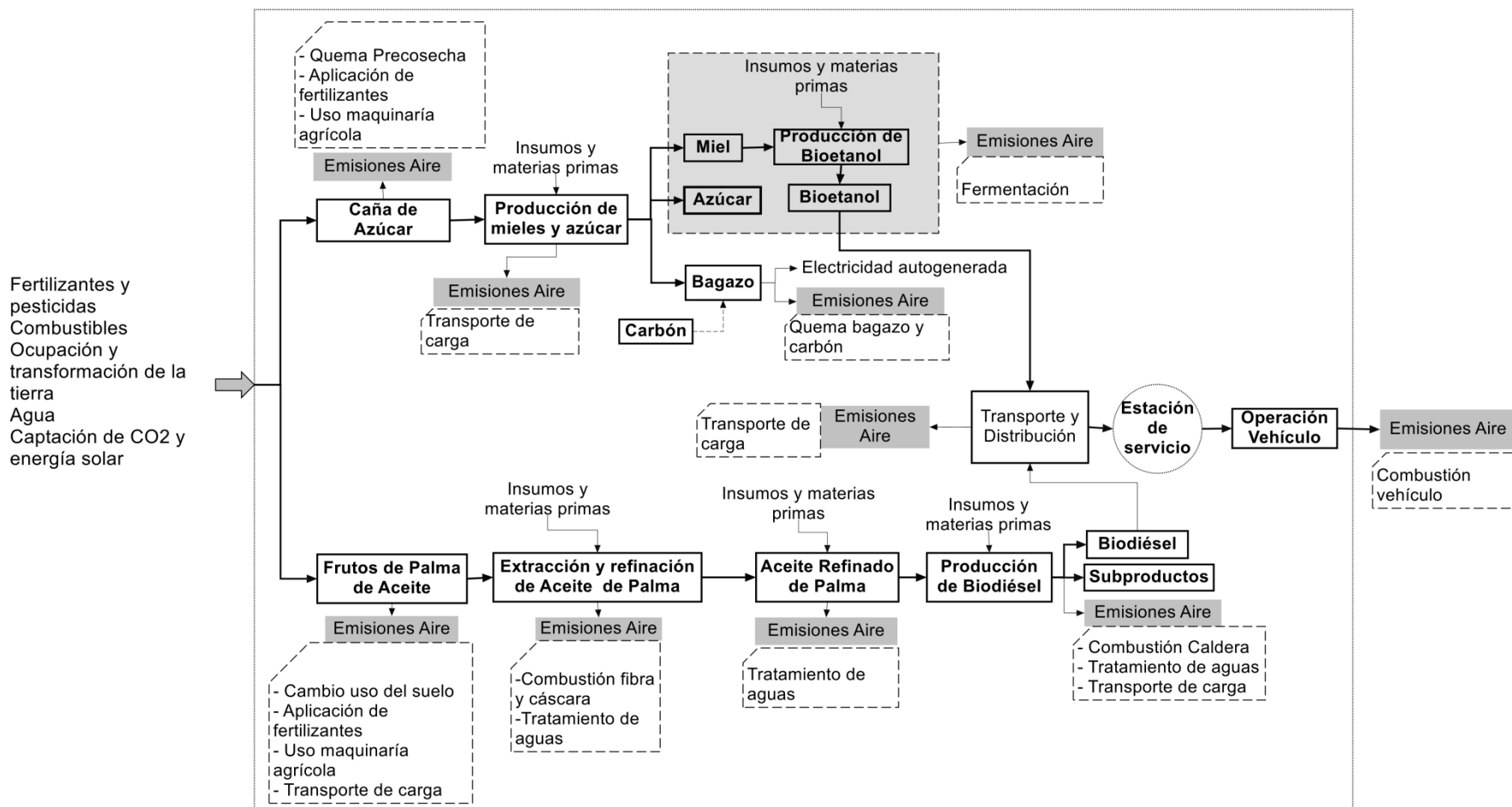
Los límites del sistema comprenden la cadena completa de producción de los combustibles fósiles, biocombustibles y electricidad: extracción de materias primas, transporte, cultivo de biomasa, producción, transporte de distribución y uso como fuente energética en un vehículo. Los límites del sistema se presentan en las Figuras 2-1, 2-2 y 2-3.

En el caso de los biocombustibles, el límite del sistema abarca desde la producción agrícola hasta su uso en las fuentes móviles utilizadas para el transporte en la ciudad de Bogotá.

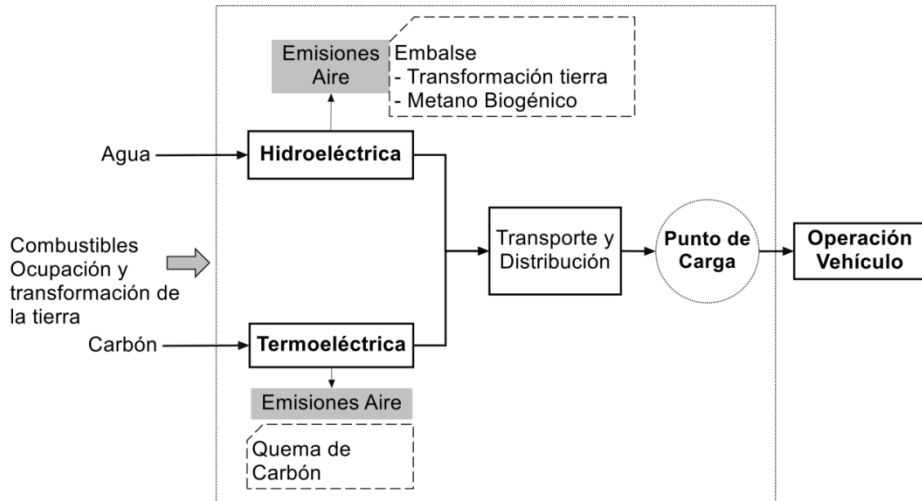
**Figura 2.2-1:** Límites del sistema para la producción de combustibles fósiles (Fuente: esta investigación).



**Figura 2.2-2:** Límites del sistema para la producción de bioetanol y biodiésel (Fuente: esta investigación).



**Figura 2.2-3:** Límites del sistema para la producción de electricidad (Fuente: esta investigación).



Se excluyen del presente análisis la fabricación de maquinaria agrícola, la fabricación y ensamble de vehículos de transporte y la construcción de las instalaciones para la transformación de la caña de azúcar y el aceite de palma en alcohol carburante y biodiésel, respectivamente. Así mismo, se excluyen la fabricación, ensamble y demás partes constituyentes de los vehículos de referencia para el uso final del combustible.

### 2.2.1 Software utilizado OpenLCA®

OpenLCA® es un *software* para el Análisis de Ciclo de Vida y evaluación de la sostenibilidad. Este fue desarrollado por GreenDelta y se encuentra disponible gratuitamente [38], [55].

## 2.3 Descripción de los datos de Inventario del Ciclo de Vida

### 2.3.1 Datos de Inventario del Ciclo de Vida de los biocombustibles

Se consideran las condiciones de producción promedio de Colombia. Los datos de inventario se tomaron del documento del Consorcio CUE (2012) [22]. En las secciones A-1 y A-2 del Anexo A se presentan los datos de inventario utilizados para la producción de biocombustibles en Colombia.

Se tienen en cuenta las emisiones por Cambio de Uso del Suelo de la cadena de producción de biodiésel. Geraldés *et al.* (2013) [23] reportan un cambio en el uso del suelo en Colombia, debido al cultivo de palma desde el año 1999 hasta el 2009: 51 % de zonas de arbustos, 42 % de sabanas y 7 % de áreas arables, lo cual resulta en 0.13 kg de CO<sub>2</sub>-eq/ kg de racimo de fruto fresco de palma, por el cambio directo en el uso del suelo.

Se debe mencionar que en este estudio no se consideró el impacto ambiental que los biocombustibles pueden generar por el uso indirecto del suelo, la sustitución de cultivos o el desplazamiento de otras actividades hacia otras regiones.

### **2.3.2 Datos de Inventario del Ciclo de Vida de los combustibles fósiles**

Para el proceso de producción del diésel, gasolina y gas natural, se tomaron los módulos de producción de la base de datos ecoinvent 2.2. [54], pues en este estudio no fue posible acceder a la información del inventario para el proceso de producción de estos combustibles en Colombia. En el Anexo A, en la sección A-3, se presentan los datos de inventario utilizados para producción de combustibles fósiles.

Para verificar la validez de uso de la información de ecoinvent (cadena de producción de combustibles fósiles, diésel y gasolina) en Colombia, se realizó una comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente obtenidas empleando la base de datos ecoinvent y las reportadas por Ecopetrol S. A. (2013) [56]. Se encontró diferencias de 13 % y 18 % para la gasolina y el diésel, respectivamente. Esta diferencia se considera aceptable y, por tanto, es posible usar ecoinvent para el desarrollo de este estudio.

En el Anexo B, en la sección B-1, se describen los resultados de la creación del módulo de producción de gasolina y diésel, a partir de la base de datos ecoinvent 2.2. en el programa OpenLCA®.

### **2.3.3 Datos de Inventario del Ciclo de Vida de la generación de electricidad**

El inventario para el proceso de producción de electricidad en Colombia se tomó de los módulos de producción de electricidad de Brasil en la base de datos ecoinvent 2.2. [54],



los cuales se modificaron y adaptaron a las condiciones locales, de acuerdo con la contribución de las fuentes de energía eléctrica existentes en la región de Bogotá D.C., Cundinamarca, Guaviare y Meta (92 % hidroeléctrica y 8 % térmica a carbón) [57]. Se halló un factor de emisión de 0.230 kg CO<sub>2</sub>-eq/ kWh para la producción de la electricidad utilizada en Bogotá, mientras que el valor reportado para Colombia por la Subdirección de Energía Eléctrica (2014) fue de 0.213 kg CO<sub>2</sub>-eq/ kWh.

La sección A-4 del Anexo A presenta los datos de inventario utilizados para producción de electricidad. Adicionalmente, en el Anexo B, en la sección B-2, se describen los resultados de la creación del módulo de generación de electricidad en Bogotá y Colombia, a partir del módulo de generación de electricidad para Brasil, disponibles en la base de datos ecoinvent 2.2.

### **2.3.4 Composición de la flota vehicular en Bogotá y selección de tecnologías vehiculares**

A partir de la información del registro distrital automotor, suministrada por la Secretaría de Movilidad, se encuentra que en el parque automotor de Bogotá los vehículos a gasolina (automóviles, motocicletas, taxis, etc.) representan el 93 %, mientras que los vehículos a diésel, buses tradicionales y del sistema de buses de tránsito rápido BTR (buses troncales de *TransMilenio*), representan el 1.2 %.

Se destaca el alto número de motocicletas, las cuales representan el 24 % del total del parque automotor (transporte de pasajeros) de la ciudad y operan en un 99 % con gasolina. Los buses del BTR corresponden a tan solo el 0.1 % del parque automotor, y casi la totalidad de dichos buses funcionan con diésel; sin embargo, la autoridad local planea replazarlos por buses eléctricos.

El combustible vehicular comercializado en Bogotá en el año 2012 contiene un 10 % de etanol en gasolina (mezcla E10) y un 5 % de biodiésel en diésel (mezcla B5). Estos combustibles también se caracterizan por tener un bajo contenido de azufre en comparación con el resto del país (300 ppm en gasolina y 50 ppm en diésel).

De este modo, para el desarrollo del ACV se escogió un vehículo representativo de cada una de las categorías vehiculares (Tabla 2-1). En el Anexo C se presentan los datos de la composición vehicular para el transporte de pasajeros en Bogotá.

Adicionalmente, para efectos de comparación, se incluyeron vehículos con fuentes alternativas de energía como un BTR *TransMilenio* Eléctrico y un bus operado con gas natural vehicular de 120 pasajeros Euro VI (Bus GNV 120 pasajeros). Los factores de emisión de la operación de este vehículo fueron los suministrados por el Grupo de Investigación en Biocombustibles, Energía, y Protección del Medio Ambiente, del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

- **Factores de Ocupación pasajero-kilómetro por modos de transporte**

Con el fin de calcular las emisiones por pasajero transportado, es necesario definir el número de pasajeros que un vehículo es capaz de transportar (número de pasajeros/kilómetro-vehículo). Se debe resaltar que los sistemas de transporte público en Bogotá están sobreocupados en hora pico; el resto del día estos vehículos normalmente transportan pasajeros de acuerdo a la capacidad de su diseño. Se estima que en las horas pico, los buses de transporte público llevan un 25 % más de pasajeros que su capacidad de diseño [58].

Por tanto, en este estudio primero se utilizó la capacidad de diseño, que corresponde a la capacidad máxima de ocupación vehicular reportada para cada tipo de vehículo: para taxis se aproximó a (3) tres pasajeros (no se incluye conductor); para vehículos particulares, a (5) cinco pasajeros; para motocicletas la capacidad es de (2) dos pasajeros; y finalmente, la capacidad de diseño de un bus articulado del sistema *Transmilenio* es de 160 pasajeros (Tabla 2-1).

También se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar el impacto en los resultados del número de pasajeros transportados. En el caso de los vehículos livianos, se calculan las emisiones en su capacidad de diseño y en la ocupación mínima (sólo un pasajero). Mientras que para los buses de transporte público, se evaluaron los vehículos según su ocupación de diseño y el 25 % de sobrecupo.

---

- **Factores de emisión según modos de transporte**

Los factores de emisión de los contaminantes CO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>x</sub> y PM<sub>2.5</sub> para cada una de las categorías vehiculares se toman del Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá (2010) [60] (Tabla 2-1).

Los factores de emisión y economía de combustible del Bus GNV 120 pasajeros, BTR *TransMilenio* B5 y las motocicletas 4T (< 150 cm<sup>3</sup> y > 150 cm<sup>3</sup>) fueron proporcionados por el Grupo de Investigación en Biocombustibles, Energía, y Protección del Medio Ambiente, del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Se consideraron estos valores, debido a que son los valores experimentales más recientes a los cuales se tuvo acceso.

- **Economía de combustible en vehículos seleccionados**

Los consumos de combustible para cada vehículo se calcularon por medio de un balance de masas de carbono, a partir de los factores de emisión de CO y CO<sub>2</sub> (Tabla 2-1) y el contenido de carbono del combustible [61]. En el Anexo A, sección A-5, se encuentra la muestra del cálculo correspondiente.

Finalmente, en el Anexo A, sección A-6, se incluye una muestra del cálculo de las operaciones realizadas en el Análisis de Ciclo de Vida.

**Tabla 2-1:** Factores de emisión, economía de combustible y número de pasajeros/vehículo-km para la flota vehicular de Bogotá (Fuente: esta investigación).

Vehículos <sup>2</sup>		Factores de emisión (gkm <sup>-1</sup> )[60] <sup>3</sup>					Economía Combustible <sup>4</sup>		Pasajeros/ vehículo- km
Categoría	Fuente de energía	CO <sub>2</sub>	CO	NOx	PM2.5	Valor	unidad		
Buses transporte de pasajeros	Bus GNV 120 pasajeros	GNV	1889.7	1.8	4.6E-5	3.15E-8	1	km/m <sup>3</sup>	120
	BTR TransMilenio B5	Diésel	3428.9	248.2	17.1	0.286	0.7	km/L	160
	BTR TransMilenio Eléctrico	Electricidad	N/A	N/A	N/A	N/A	0,5[62]	km/kWh	160
	Bus B5 35-60 pasajeros	Diésel	787.0	9.1	15.2	1.21	3.4	km/L	60
	Bus B5 19-32 pasajeros	Diésel	561.2	5.9	9.8	0.256	4.8	km/L	32
	Bus B5 16-19 pasajeros	Diésel	367.2	3.3	6.0	0.029	7.4	km/L	19
	Bus GNV 16-19 pasajeros	GNV	272.8	20.1	2.3	0.013	6.2 <sup>5</sup>	km/m <sup>3</sup>	19
Vehículos livianos	Taxi E10	Gasolina	258.0	8.4	2.0	0.003	8.4	km/L	3
	Taxi GNV	GNV	241.0	13.0	3.7	0.003	7.2	km/m <sup>3</sup>	3
	Automóvil E10 sin TWC ; > 1400 c.c.	Gasolina	312.0	69.0	2.2	0.003	5.4	km/L	5
	Automóvil E10 con TWC ; >1400 c.c.	Gasolina	312.0	8.5	0.9	0.003	7.0	km/L	5
	Automóvil E10 sin TWC ; < 1400 c.c.	Gasolina	218.0	58.0	1.2	0.003	7.4	km/L	5
	Automóvil E10 con TWC ; < 1400 c.c.	Gasolina	232.0	7.2	0.7	0.003	9.4	km/L	5
	Motocicleta 4T < 150 cm <sup>3</sup>	Gasolina	149.8	38.0	0.8	0.008	10.9	km/L	2
	Motocicleta 4T > 150 cm <sup>3</sup>	Gasolina	216.7	50.7	1.13	0.016	7.7	km/L	2
	Automóvil Eléctrico	Electricidad	N/A	N/A	N/A	N/A	5 [63]	km/kWh	4

<sup>2</sup> BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; E10: mezcla 10 % bioetanol en gasolina; TWC: *Three Way Catalyst* (Catalizador de tres vías).

<sup>3</sup> Factores de emisión del Bus GNV 120 pasajeros, BTR *TransMilenio* B5 y motocicletas 4T (< 150 cm<sup>3</sup> y > 150 cm<sup>3</sup>) fueron proporcionados por el Grupo de Investigación en Biocombustibles, Energía, y Protección del Medio Ambiente, del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

<sup>4</sup> La economía de combustible de cada vehículo fue calculada por medio de un balance de masa de carbono, a partir de los factores de emisión de CO y CO<sub>2</sub>, y el contenido de carbono en el combustible (UPME, 2003)[61]. La economía de combustible del vehículo liviano eléctrico fue tomada de Donateo et al., 2014 [63]; y del BTR Eléctrico de BYD Motor Colombia S.A.S. (ap. 2013) [62].

## **3. Interpretación de resultados del Análisis de Ciclo de Vida**

Considerando las dos unidades funcionales, se realizó una agrupación de las emisiones por etapas del ACV: producción de electricidad a partir del carbón, producción de energía hidroeléctrica, producción de bioetanol, producción de gasolina, producción de Gas Natural, producción de biodiésel, producción de diésel y la operación del vehículo. Los resultados se muestran a continuación.

### **3.1 Interpretación de resultados: unidad funcional masa de contaminante/kilómetro recorrido**

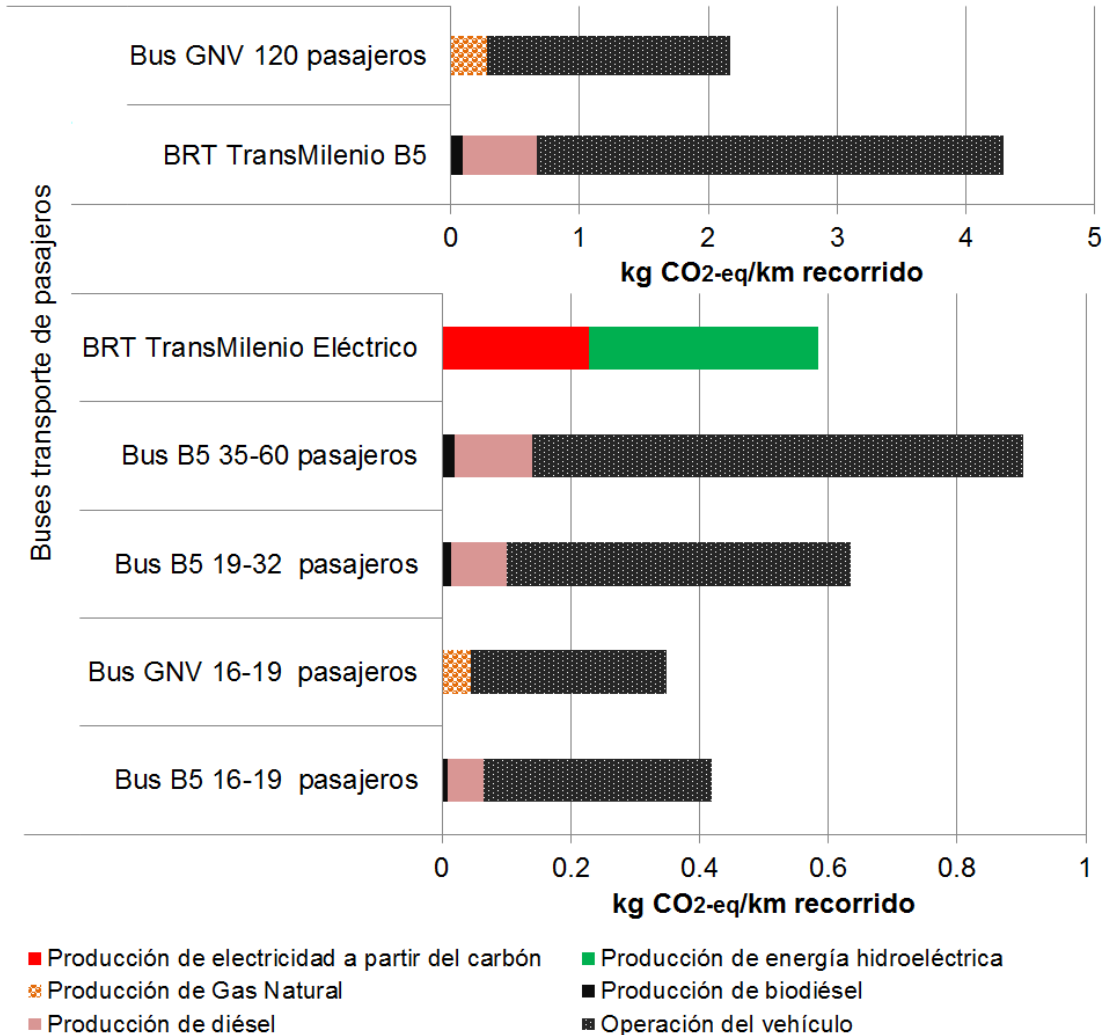
#### **3.1.1 Buses de transporte de pasajeros en Bogotá**

- **Potencial de calentamiento global: emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente**

Para las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq (kilogramos/kilómetro recorrido) de los buses de transporte de pasajeros en la ciudad de Bogotá, se observa que entre el 84 % (BTR *TransMilenio* B5) y el 87 % (Bus GNV 16-19 pasajeros) de las emisiones se presentan en la fase de operación del vehículo. La etapa de producción de biodiésel alcanza apenas una contribución del 2 % (Figura 3.1-1).

Se encuentra también que los buses BTR *TransMilenio* B5 tienen las mayores emisiones globales de CO<sub>2</sub>-eq, mientras que el Bus 16-19 pasajeros GNV y B5 tiene las menores emisiones, seguido por el BTR *TransMilenio* Eléctrico. Se debe destacar que la operación de *TransMilenio* con electricidad puede reducir las emisiones en un factor de siete, comparado con el BTR que opera con combustible diésel.

**Figura 3.1-1:** Emisiones de CO<sub>2</sub>-eq kilogramos/kilómetro recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los buses de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).



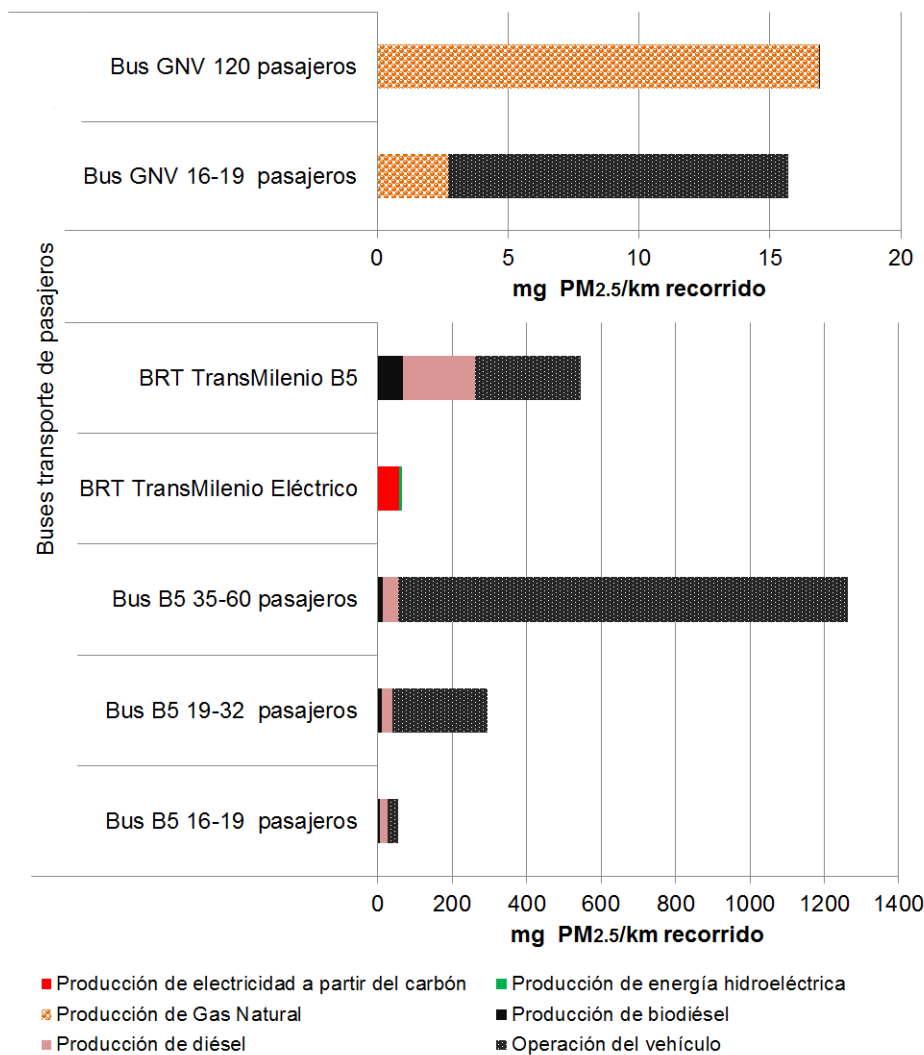
\* BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; B5: mezcla 5 % biodiésel en diésel.

▪ **Calidad del aire: emisiones de PM<sub>2.5</sub>**

De las emisiones de PM<sub>2.5</sub> (miligramos/kilómetro-recorrido) para los buses de transporte de pasajeros en la ciudad de Bogotá, se observa que la mayor parte de las emisiones se genera en la fase de operación del vehículo. Sin embargo, en el caso del Bus B5 16-19 pasajeros, estas corresponden al 53 %, esto se debe principalmente a que el factor de emisión de la operación del vehículo es pequeña (29 mg/km) si se contrasta, por ejemplo, con el Bus B5 19-32 pasajeros (256 mg/km).

En cuanto a la contribución por la producción de biodiésel, se alcanza una participación de alrededor del 12 % para el Bus B5 16-19 pasajeros, mientras que para los demás oscila entre el 1 y el 3 % (Figura 3.1-2). Se encuentra también que el Bus B5 35-60 pasajeros tiene las mayores emisiones globales de PM<sub>2.5</sub>, el doble de las emisiones del BTR *TransMilenio*, mientras que los buses que funcionan con gas natural tienen las menores emisiones. También se debe destacar que el Bus BTR eléctrico tiene emisiones dadas en un 89 % por la quema de carbón.

**Figura 3.1-2:** Emisiones de PM<sub>2.5</sub> miligramos/kilómetro-recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los buses de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).



\* BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; B5: mezcla 5 % biodiésel en diésel.

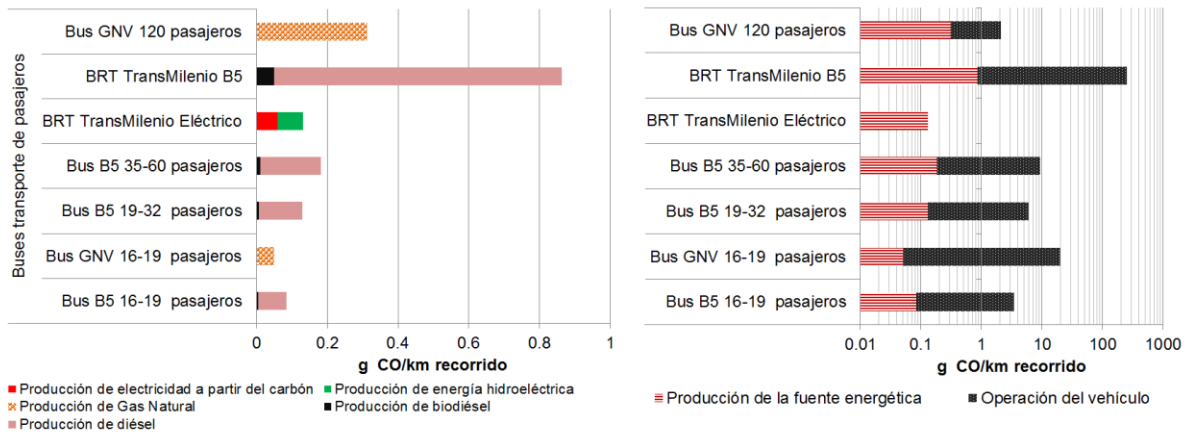
### ▪ Calidad del aire: emisiones de CO

Con respecto a las emisiones de CO (gramos/kilómetro-recorrido) de los buses de transporte de pasajeros en la ciudad de Bogotá, se observa que las emisiones en la fase de operación superan el 97 % del total. En cuanto a la contribución por la producción de la fuente energética, el diésel aporta alrededor del 2 % de la emisión, y para el biodiésel se encuentran contribuciones bajas, de alrededor del 0.1 % (

**Figura 3.1-3).**

Se encuentra que los buses BTR *TransMilenio* B5 tienen las mayores emisiones globales de CO (248 g/km), mientras que el Bus BTR *TransMilenio* Eléctrico tiene las menores emisiones (0.13 g/km). El Bus GNV 16-19 también presenta bajas emisiones (20 g/km).

**Figura 3.1-3:** Emisiones de CO gramos/kilómetro-recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los buses de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).



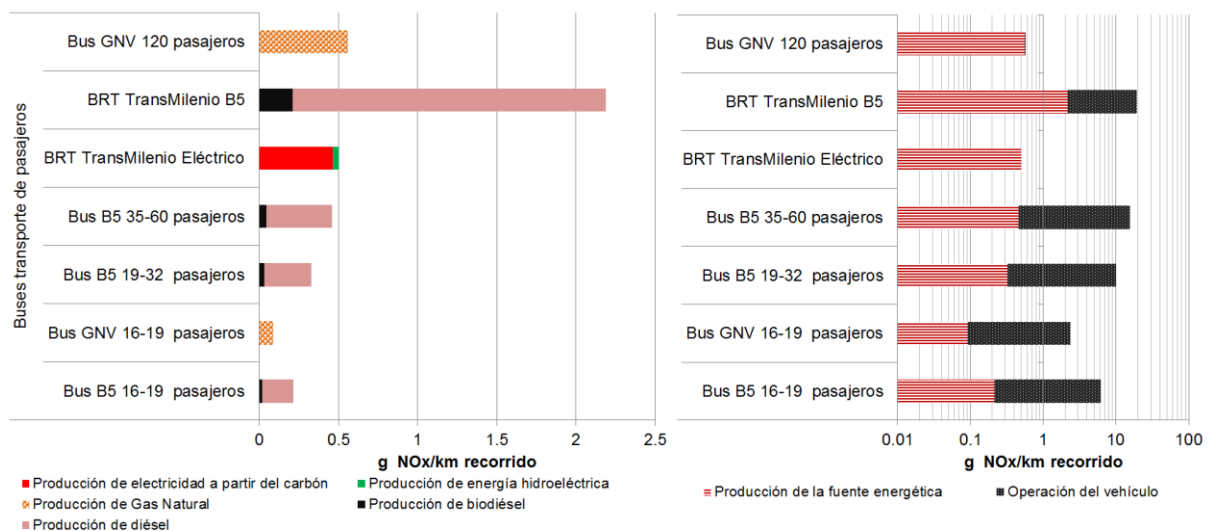
\* BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; BTR: Bus Tránsito Rápido; B5: mezcla 5 % biodiésel en diésel.

### ▪ Calidad del aire: emisiones de NOx

En el caso de las emisiones de NOx (g/km), se encuentra que para los vehículos que funcionan con combustibles líquidos, la fase de operación es la que más contribuye a las emisiones. En contraste, para el Bus GNV 120 pasajeros y el bus BTR *TransMilenio* Eléctrico, las emisiones más altas están en la etapa de producción de la fuente energética (Figura 3.1-4).



**Figura 3.1-4:** Emisiones de NOx gramos/kilómetro-recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los buses de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).



\* BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; BTR: Bus Tránsito Rápido; B5: mezcla 5 % biodiésel en diésel.

### 3.1.2 Vehículos livianos de transporte de pasajeros en Bogotá

#### ▪ Potencial de calentamiento global: emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente

La fase de operación de los vehículos livianos para el transporte de pasajeros presenta los mayores aportes a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Esta contribución es superior al 80 % del total, mientras que en las motocicletas está entre el 80-81 %. Adicionalmente, las emisiones de una motocicleta pueden equipararse con las de un automóvil < 1400 c.c. (Figura 3.1-5).

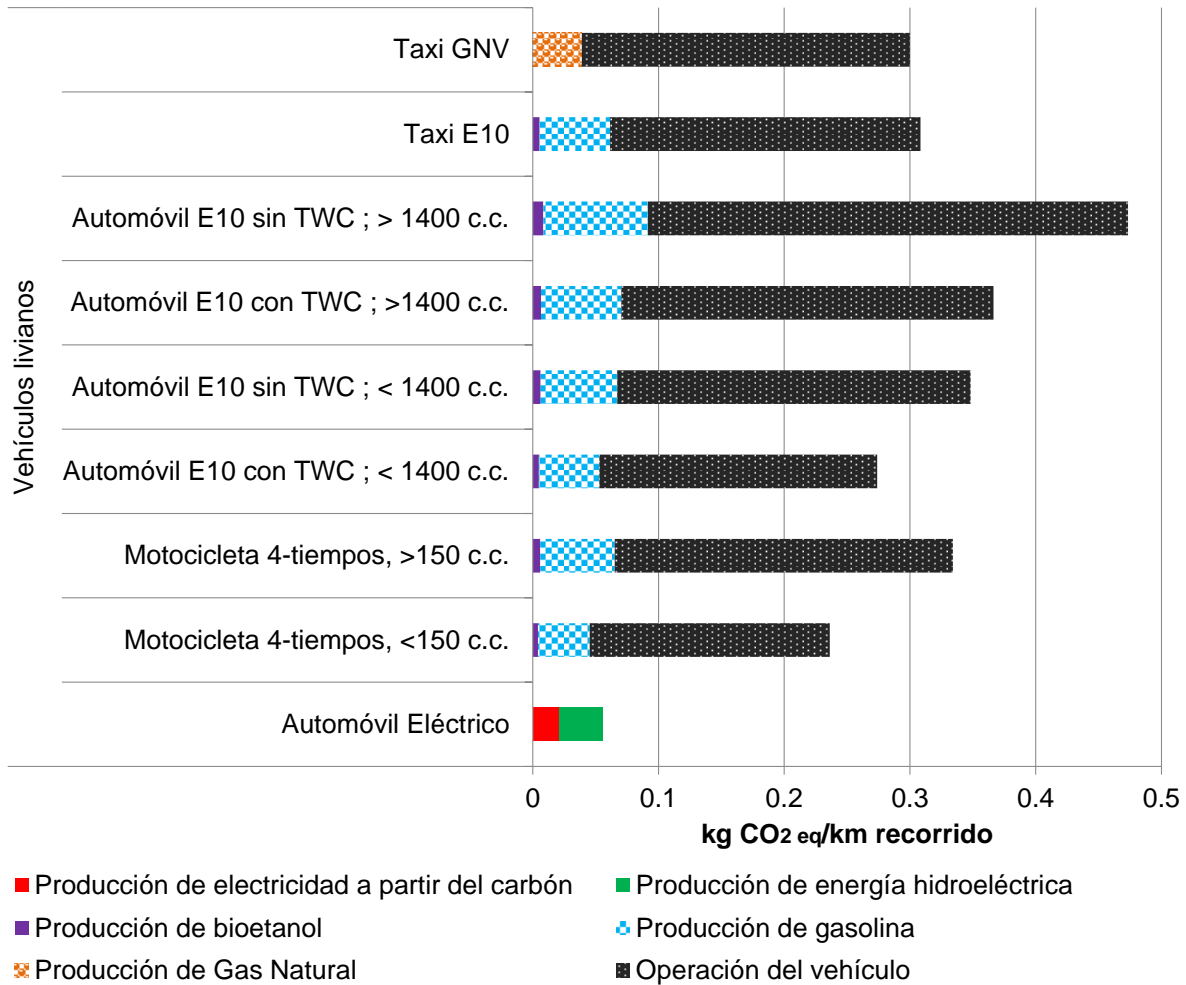
Las emisiones de la fase de producción de la gasolina contribuyen entre el 17 y el 18 % de la emisión global; en cambio, el aporte de la producción de etanol puede aproximarse a un 2 %.

De acuerdo con los resultados, las mayores emisiones de CO<sub>2</sub>-eq las tiene el Automóvil E10 sin TWC, > 1400 c.c. (473 g/km). Sin embargo, no existen grandes diferencias con los demás vehículos livianos, como por ejemplo, los taxis (308 g/km).

Las menores contribuciones se tienen con el automóvil eléctrico, con el cual se podrían reducir en un factor de (6) seis las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq con respecto a los demás vehículos livianos. Se debe señalar que en la producción de energía hidroeléctrica se

tienen en cuenta las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq por la transformación de la tierra y de metano biogénico dentro del embalse.

**Figura 3.1-5:** Emisiones de CO<sub>2</sub>-eq kilogramos/kilómetro recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los vehículos livianos de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).

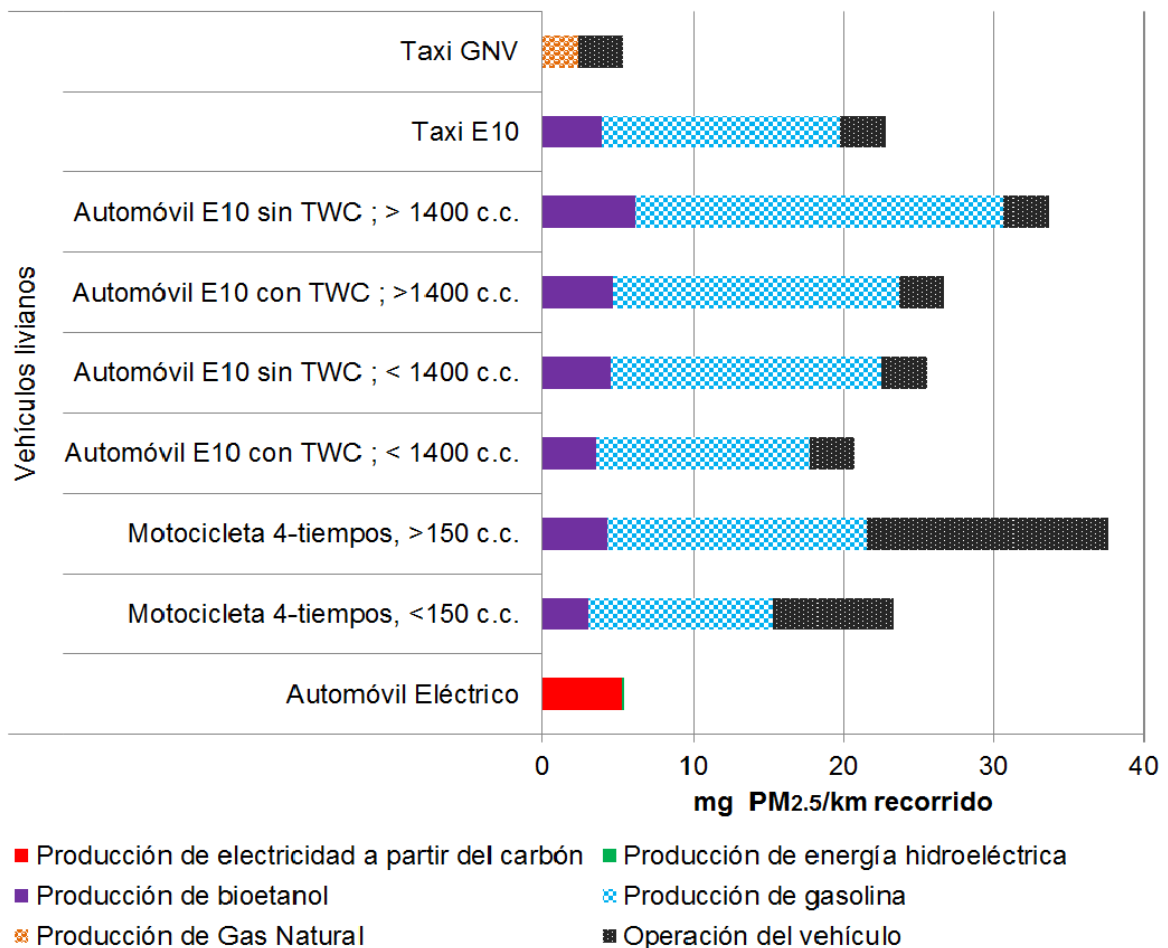


\* BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; E10: mezcla 10 % bioetanol en gasolina; TWC: *Three Way Catalyst* (Catalizador de tres vías).

▪ **Calidad del aire: emisiones de PM2.5**

En este caso las etapas de producción de los combustibles presentan aportes importantes a las emisiones globales, los cuales pueden alcanzar el 70 % de las emisiones totales de cada categoría de vehículo. De este modo, la producción de gasolina se puede aproximar a un 61 % y las emisiones en la producción de bioetanol estarían alrededor del 17 %. Es importante mencionar que las emisiones de material particulado en la producción de bioetanol se generan por la quema de biomasa, tanto por la quema de la caña antes de la cosecha, como por la quema de bagazo para la cogeneración de energía (Figura 3.1-6).

**Figura 3.1-6:** Emisiones de PM2.5 miligramos/kilómetro recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los vehículos livianos de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).



\* BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; E10: mezcla 10 % bioetanol en gasolina; TWC: *Three Way Catalyst* (Catalizador de tres vías).

Los vehículos que presentan las mayores emisiones de PM<sub>2.5</sub> son las motocicletas de cuatro tiempos con cilindrada mayor a 150 c.c., donde la fase de operación alcanza el 80 % de las emisiones. Se debe recordar que los factores de emisión para la fase de operación fueron tomados de mediciones en ruta realizadas recientemente y cuyos valores no están alejados de los encontrados en el Plan Decenal (2010) [60]. Las menores emisiones las generan los taxis que operan con gas natural, seguidos por el automóvil eléctrico.

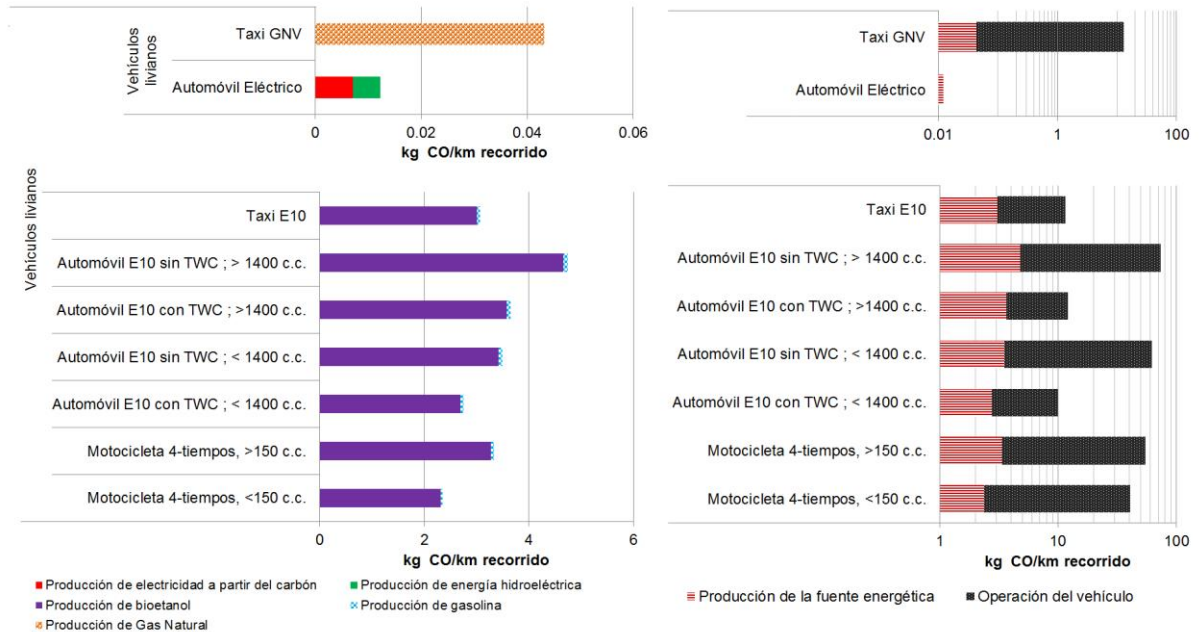
Al contrastar el total de las emisiones de las motocicletas de cuatro tiempos con las emisiones de los demás vehículos livianos, estas son similares a las emisiones de los automóviles E10; en tanto que para los taxis a gas natural y el automóvil eléctrico, las motocicletas de cuatro tiempos con cilindrada mayor a 150 c.c. superan estas emisiones de 4 a 6 veces, respectivamente.

- **Calidad del aire: emisiones de CO**

Las mayores emisiones de CO (gramos/kilómetro) se generan en la etapa de operación del vehículo, cuyos aportes alcanzan el 94 % para los automóviles que no poseen catalizador. Se encuentra que la producción de etanol genera emisiones de CO que alcanzan del 27 al 30 % en los vehículos con catalizador, mientras que para las motocicletas y los automóviles sin catalizador este porcentaje oscila entre el 5 y el 6 %. Estas emisiones se deben principalmente a la quema de la caña antes de la cosecha. Adicionalmente, se debe recordar que la mezcla etanol-gasolina es al 10 %, de lo cual se infiere que la utilización de una mezcla con mayor porcentaje de etanol daría como resultado una mayor contribución de la etapa de producción de etanol a las emisiones totales de CO.

Si bien los automóviles sin catalizador tienen las mayores emisiones de CO, las motocicletas tienen emisiones que pueden equipararse con las de estos (Figura 3.1-7). Por otra parte, los automóviles eléctricos tienen las emisiones de CO más bajas, con los cuales se podrían reducir casi que en su totalidad las emisiones de los demás vehículos.

**Figura 3.1-7:** Emisiones de CO gramos/kilómetro-recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los vehículos livianos de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).



\* BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; E10: mezcla 10 % bioetanol en gasolina; TWC: *Three Way Catalyst* (Catalizador de tres vías).

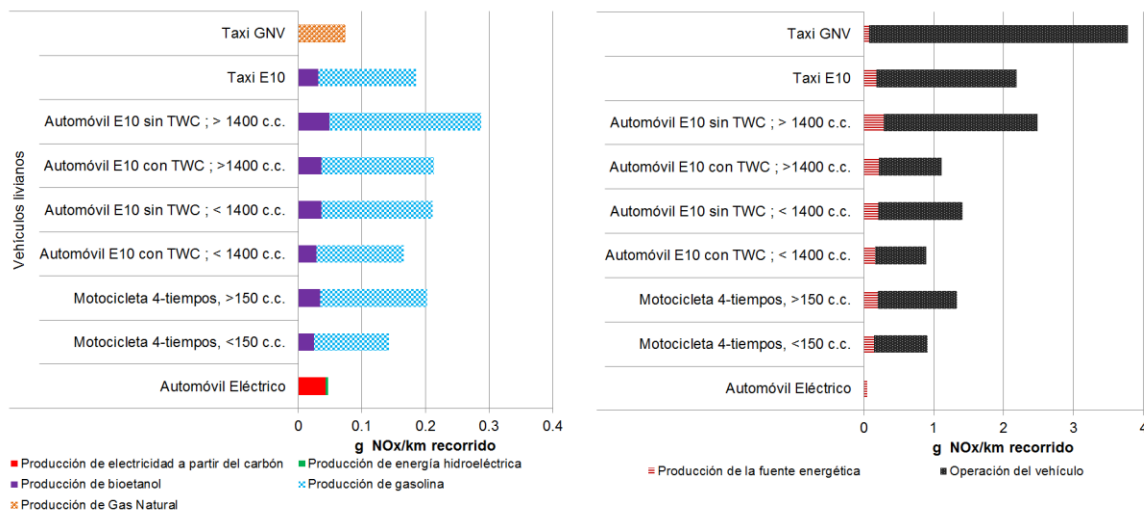
#### ▪ Calidad del aire: emisiones de NO<sub>x</sub>

Las mayores emisiones de NO<sub>x</sub> (gramos/kilómetro), como ha sucedido con los contaminantes anteriores, ocurren en la fase de operación de los vehículos. La contribución de esta fase supera el 80 % del total de emisiones, mientras que la producción de la gasolina abarca del 7 al 16 %, la producción de gas natural se aproxima al 2 % y la producción de bioetanol está entre el 2 y el 3 %.

En este caso se observa que el taxi que opera con gas natural tiene los mayores aportes de NO<sub>x</sub> (Figura 3.1-8), entre tanto las menores emisiones se dan con el automóvil eléctrico, con el cual se lograrían reducir las emisiones entre el 95 y el 98 %, al contrastarse con los demás vehículos livianos. Se debe mencionar que la diferencia entre las emisiones de los distintos vehículos está dada por el factor de emisión de la fase de operación. Por ejemplo, aunque los taxis son automóviles comunes para el cálculo de los factores de emisión, el Plan Decenal (2010) [60] toma un factor de actividad mayor para estos vehículos. No obstante, se debe considerar que el 89 % de los automóviles públicos (taxis) son de años

de modelos anteriores al 2004, mientras que en este mismo período, el 62 % de los vehículos corresponde a automóviles particulares (Anexo C). Adicionalmente, si se considera la inserción de las diferentes tecnologías vehiculares en Colombia a partir del año 2004, estos ya tendrían catalizador de tres vías. Por ende, se recomendaría evaluar los factores de emisión de la operación nuevamente para los taxis y los demás vehículos.

**Figura 3.1-8:** Emisiones de NOx gramos/kilómetro-recorrido. Análisis Del Pozo a la Rueda para los vehículos livianos de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).



\*GNV: Gas natural vehicular; E10: mezcla 10 % bioetanol en gasolina; TWC: *Three Way Catalyst* (Catalizador de tres vías).

### 3.2 Interpretación de resultados: unidad funcional masa de contaminante/kilómetro-pasajero transportado

Se realiza la comparación de las emisiones vehiculares de acuerdo con la ocupación de diseño. En este caso la contribución porcentual de las etapas al ciclo de vida de cada vehículo tiene un comportamiento similar al de la anterior unidad funcional, la mayor diferencia radica en la identificación de los medios de transporte con mayores emisiones. De manera general, los vehículos eléctricos presentan reducciones importantes de las emisiones, ya que la mayor parte de la energía generada es hidroeléctrica. Según lo mencionado por Messagie et al. (2014) [17], si la energía eléctrica se genera únicamente

a partir de combustibles fósiles, o el carbón, el impacto sobre el cambio climático puede ser tan alto como en el caso de los vehículos convencionales.

Adicionalmente, a pesar de que la mezcla bioetanol-gasolina E10 tiene una proporción del 10 % de bioetanol, se observa que la producción de bioetanol contribuye a las emisiones de CO y PM2.5. Esto se debe principalmente a la quema de caña antes de la cosecha y el uso de biomasa para cogeneración de energía. En este aspecto se puede inferir que aumentar el porcentaje de mezcla de etanol-gasolina para el combustible usado en la ciudad no sería adecuado, debido a que no habría una reducción de las emisiones de estos contaminantes, sino que por el contrario, podrían aumentar.

### **3.2.1 Potencial de calentamiento global: emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente**

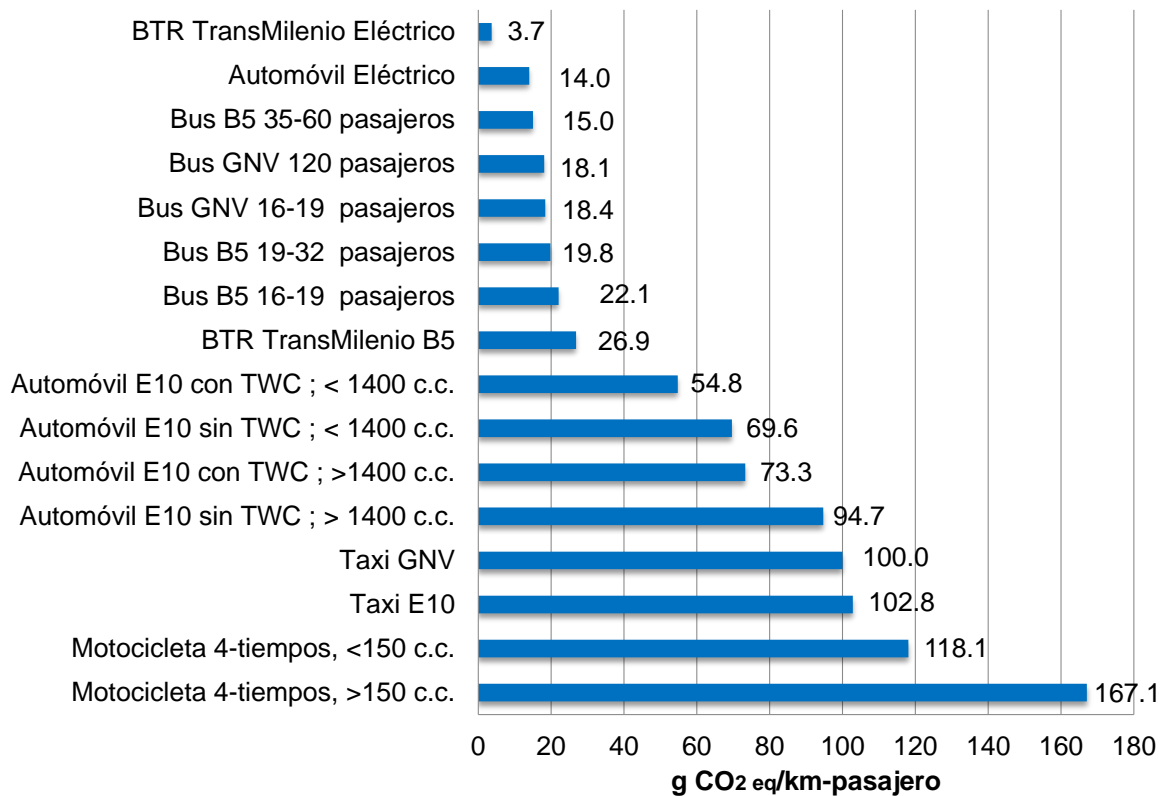
Las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente (g/km-pasajero) del ACV Del Pozo a la Rueda, obtenidas por el método del IPCC 2007, constatan que los vehículos que generan las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente son los vehículos de pasajeros que funcionan con gasolina, entre los que se destacan las motocicletas, seguidas de los taxis a gasolina (E10) y a gas natral (GNV) (Figura 3.2-1).

De los resultados del ACV en las condiciones de la flota actual de la ciudad, se puede decir que las menores emisiones de CO<sub>2</sub>-eq las generan los automóviles eléctricos, mientras que de los vehículos que operan con combustibles líquidos, el Bus B5 35-60 pasajeros tiene las menores emisiones (15 g/km\*pasajero), las cuales son un 44 % inferiores a las del BTR *TransMilenio* B5 (26.9 g/km\*pasajero).

Por otro lado, la implementación de vehículos eléctricos de pasajeros reduciría las emisiones de esta categoría de vehículos de manera significativa; particularmente, si se implementaran buses BTR eléctricos en la ciudad, se estima que se lograría una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq del 86 %. Sin embargo, esta reducción se considera poco significativa si se comparan las emisiones de los buses del sistema BTR con las emisiones generadas por las otras categorías de vehículos.

En este aspecto se debe anotar que los factores de emisión para la operación de los BTR fue tomada de datos medidos en el año 2012, mientras que los factores de los demás buses fueron tomados del Plan Decenal (2010). En el caso de los BTR de *TransMilenio*, se pudo verificar que estos valores estaban subestimando las emisiones de la operación del vehículo, en donde el factor de emisión del Plan Decenal es cinco veces inferior al promedio de los datos reportados en el año 2012 por el Grupo de Investigación en Biocombustibles, Energía, y Protección del Medio Ambiente, del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia.

**Figura 3.2-1:** Emisiones totales de CO<sub>2</sub>-eq (gramos/kilómetro-pasajero transportado). Análisis DPR para los vehículos de transporte de pasajeros de Bogotá (Fuente: esta investigación).



\*BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; E10: mezcla 10 % bioetanol en gasolina; TWC: *Three Way Catalyst* (Catalizador de tres vías).



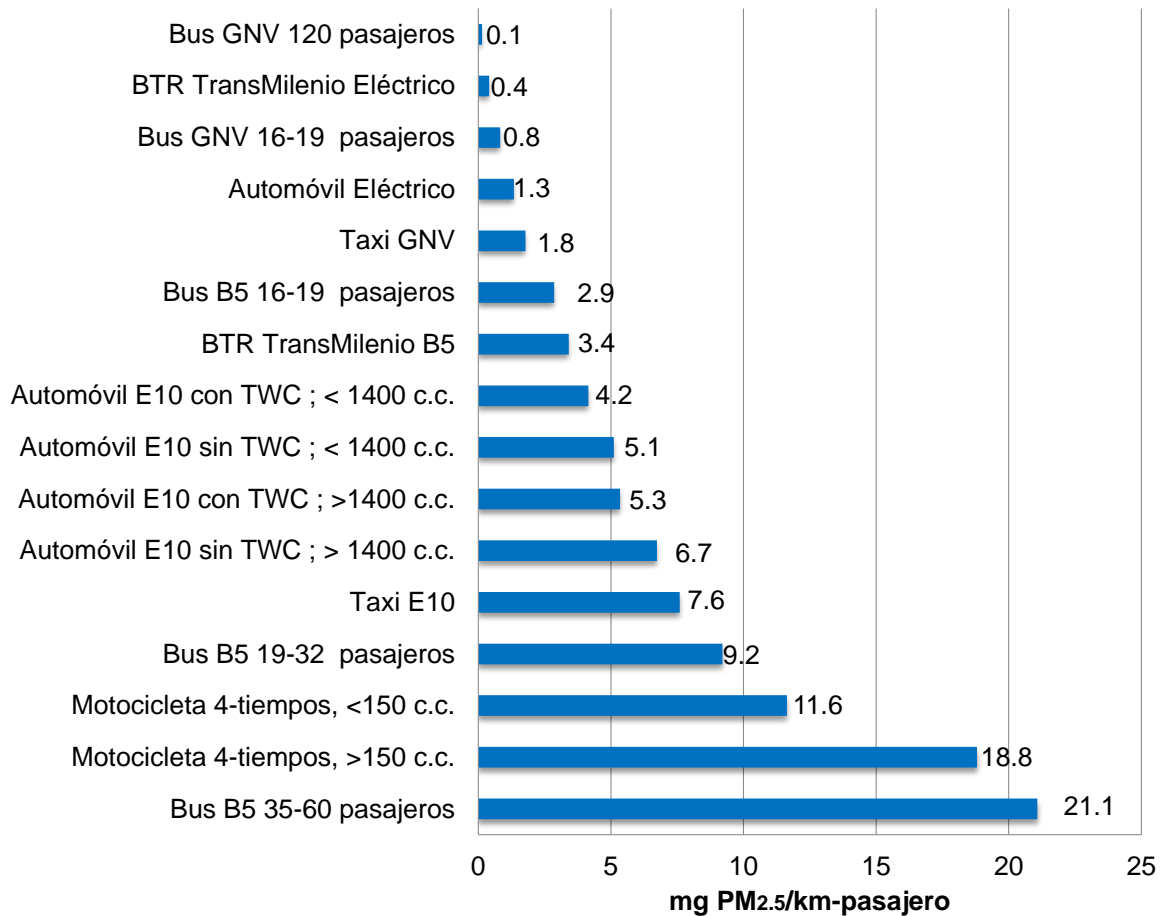
También se observa que, por ejemplo, si una persona cambia de modo de transporte de una motocicleta >150 c.c. a un bus, las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq disminuyen entre 149 y 152 gramos/km\*pasajero; y entre 72 y 112 gramos/km\*pasajero si el cambio es a un automóvil. No obstante, si se comparan estos valores con los logrados si los buses del sistema BTR fueran eléctricos, la disminución sería de 23 gramos/km\*pasajero con respecto al BTR actual, el cual es un valor pequeño en contraste con los ya mencionados.

### 3.2.2 Calidad del aire: emisiones de PM2.5

Los vehículos que generan las menores emisiones de este contaminante son los que funcionan con gas natural, seguidos de los buses del sistema BTR *TransMilenio* Eléctrico. De los vehículos que usan combustibles líquidos, el BTR *TransMilenio* B5 aporta una de las emisiones más bajas de PM2.5 (0.4 mg/km\*pasajero), mientras que el Bus B5 35-60 pasajeros tiene las mayores emisiones (21.1 mg/km\*pasajero). En este aspecto, las motocicletas exceden de 3 a 5 veces las emisiones de PM2.5 del bus BTR *TransMilenio*, las cuales se ubican antes del Bus B5 35-60 pasajeros (Figura 3-10).

Por otro lado, si se usaran buses del sistema BTR eléctricos, se reducirían las emisiones de PM2.5 en un 84 % con respecto al BTR tradicional. Sin embargo, este valor es mucho menor al que se obtendría si se cambiaran las motocicletas por otro medio de transporte. Por ejemplo, si una persona cambia de modo de transporte de una motocicleta >150 c.c. al BTR *TransMilenio* B5, las emisiones disminuyen 15 miligramos/km\*pasajero; mientras que si una persona que usa los buses del sistema BTR actual se transportara en un BTR eléctrico, la disminución sería de 3 miligramos/km\*pasajero con respecto al BTR actual, el cual es un valor pequeño contrapuesto al mencionado anteriormente. Adicionalmente, también se encuentra una reducción importante en el cambio del Bus B5 35-60 pasajeros a cualquiera de los otros modos de transporte, especialmente al BTR *TransMilenio* B5 y el bus a gas natural.

**Figura 3.2-2:** Emisiones totales de PM2.5 (miligramos/kilómetro-pasajero transportado). Análisis DPR para los vehículos de transporte de pasajeros de Bogotá (Fuente: esta investigación).



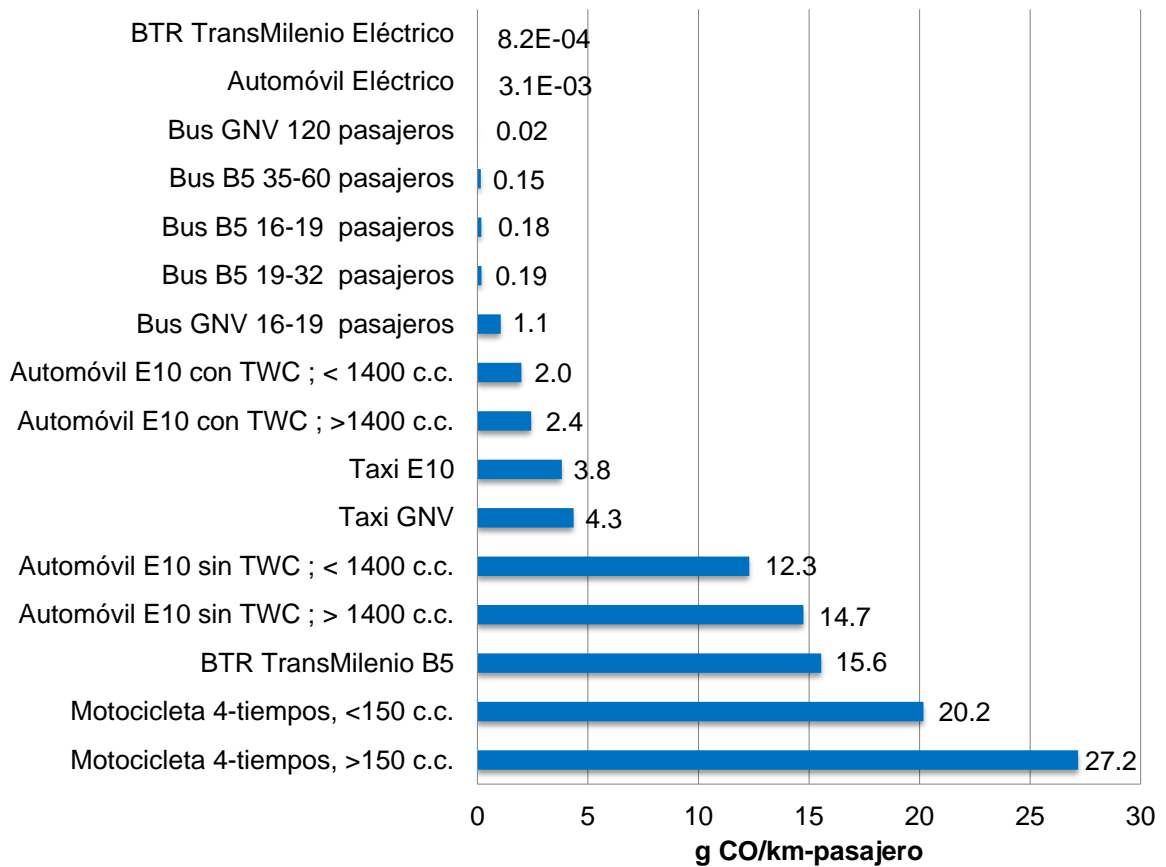
\* BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; E10: mezcla 10 % bioetanol en gasolina; TWC: *Three Way Catalyst* (Catalizador de tres vías).

### 3.2.3 Calidad del aire: emisiones de CO

Del ACV Del Pozo a la Rueda para el monóxido de carbono, se encuentra que el peor medio de transporte es la motocicleta (20.2 - 27.2 g/km-pasajero), seguida del BTR TransMilenio B5 (15.6 g/km-pasajero) y del automóvil sin catalizador de tres vías (12.3 - 14.7 g/km-pasajero). Del mismo modo, los automotores operados con gas natural y

electricidad son los medios de transporte con las menores emisiones (Figura 3.2-3); en el caso de los vehículos eléctricos se observa una reducción significativa en las emisiones.

**Figura 3.2-3:** Emisiones totales de CO (gramos/kilómetro-pasajero transportado). Análisis DPR para los vehículos de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).



\* BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; E10: mezcla 10 % bioetanol en gasolina; TWC: *Three Way Catalyst* (Catalizador de tres vías).

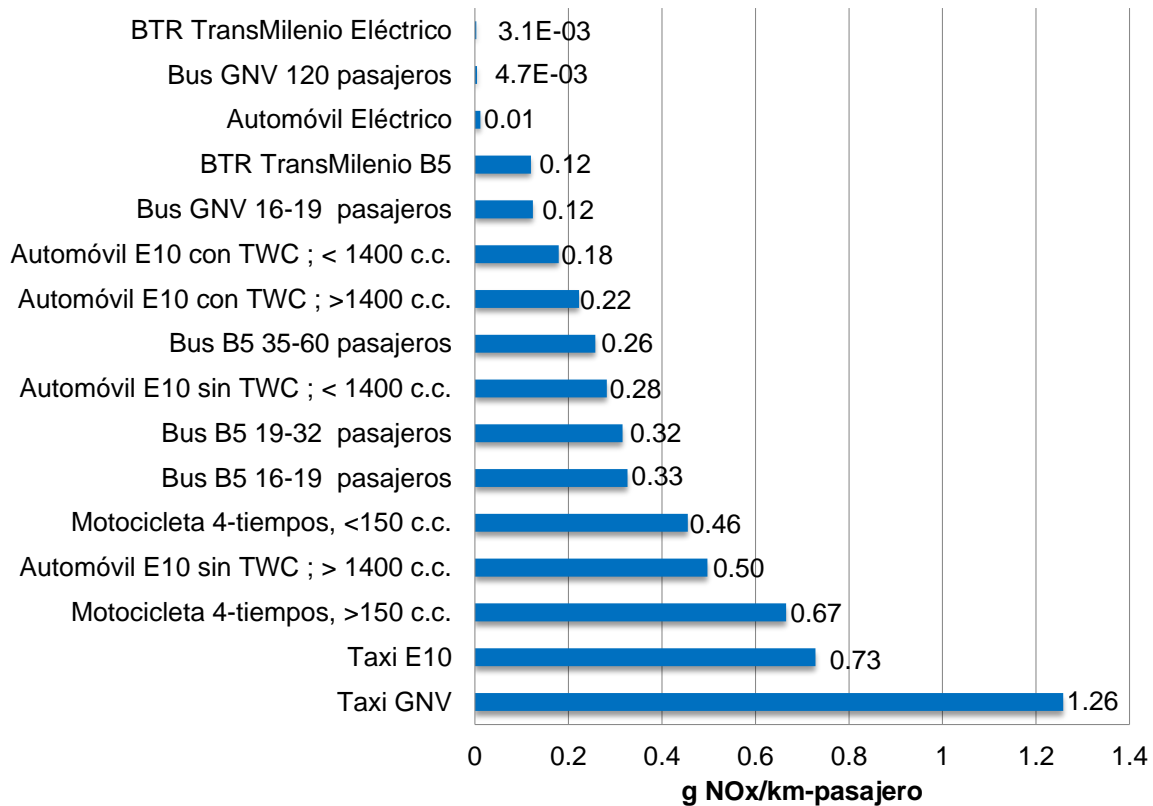
Asimismo, se observa que, por ejemplo, si una persona cambia de modo de transporte de una motocicleta >150 c.c. a uno de los buses tradicionales, las emisiones de CO disminuyen entre 27 gramos/km\*pasajero, mientras que si el cambio es al BTR *TransMilenio* B5, la disminución es de 11 gramos/km\*pasajero. Adicionalmente, si se comparan estos valores con los logrados si los buses del sistema BTR fueran eléctricos, la disminución sería de 15 gramos/km\*pasajero con respecto al BTR actual.

### 3.2.4 Calidad del aire: emisiones de NOx

El taxi a gas natural es el vehículo que genera las mayores emisiones de NOx (1.3 g/km-pasajero), seguido del taxi E10 (0.7 g/km-pasajero) (Figura 3.2-4), mientras que el bus del sistema BTR es el que genera las menores emisiones (0.12 g/km-pasajero). Adicionalmente, los vehículos que funcionan con electricidad generarían las emisiones más bajas de este contaminante.

Sin embargo, si se incluyera dentro de la flota actual de la ciudad el Bus GNV 120 pasajeros con estándar de emisiones Euro VI, este medio de transporte tendría una de las emisiones más bajas, las cuales serían incluso similares a las del BTR eléctrico.

**Figura 3.2-4:** Emisiones totales de NOx (gramos/kilómetro-pasajero transportado). Análisis DPR para los vehículos de transporte de pasajeros en Bogotá (Fuente: esta investigación).



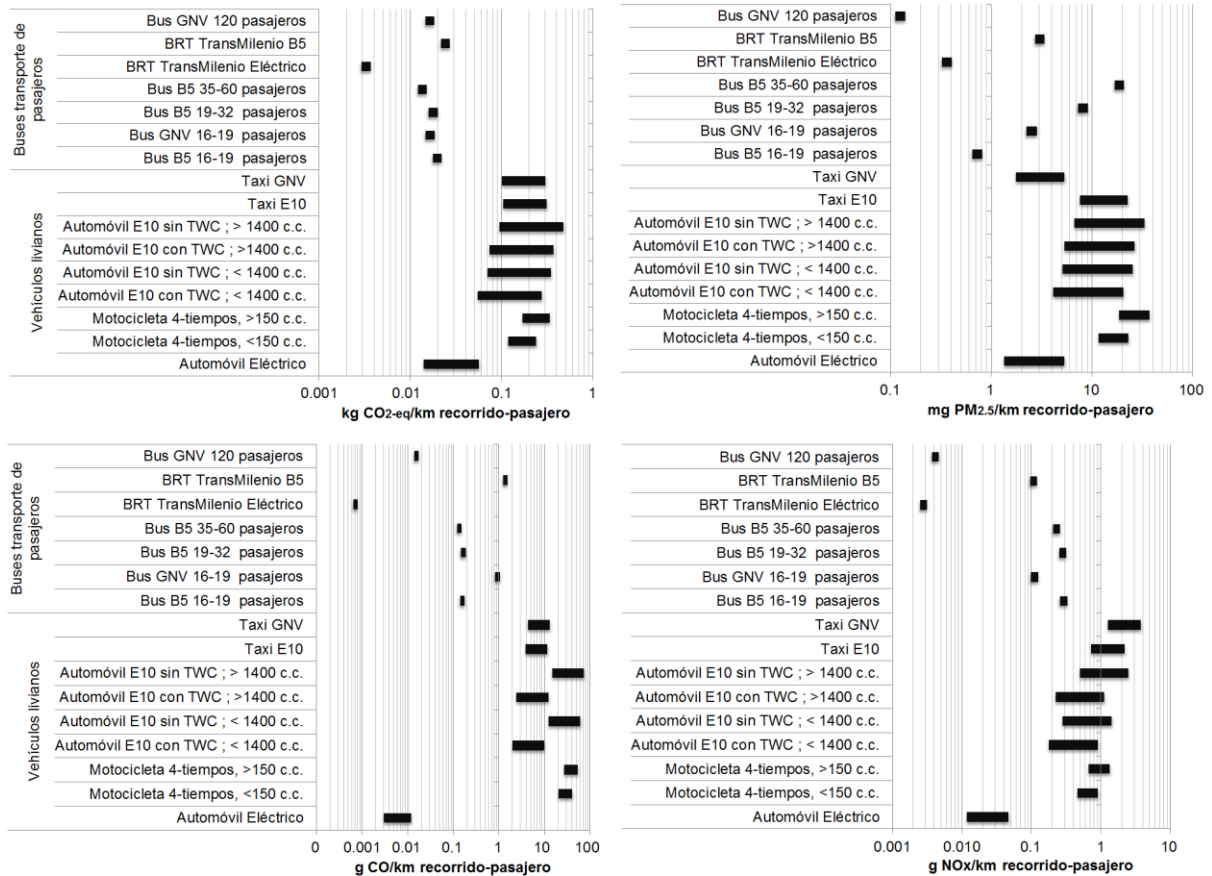
\* BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; E10: mezcla 10 % bioetanol en gasolina; TWC: *Three Way Catalyst* (Catalizador de tres vías).

### 3.2.5 Análisis de sensibilidad al número de pasajeros

Considerando que la unidad funcional masa de contaminante por kilómetro recorrido y pasajero transportado es sensible al cambio en el número de pasajeros que puede transportar el vehículo, se realizó el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq (kg/km-pasajero), PM<sub>2.5</sub> (mg/km-pasajero), CO (g/km-pasajero) y NO<sub>x</sub> (g/km-pasajero) para diferentes valores de ocupación vehicular. En el caso de los vehículos livianos, se calcularon las emisiones según la ocupación de diseño y la ocupación mínima (sólo un pasajero), y para los buses de transporte público, las emisiones se estimaron según la ocupación de diseño y considerando un sobrecupo del 25 % (Figura 3.2-5).

El análisis de sensibilidad muestra que las emisiones de los vehículos ligeros son más sensibles al número de pasajeros transportados, mientras que los buses de transporte público tienen una menor variabilidad y, por lo tanto, son menos sensibles a la ocupación de los vehículos. Los vehículos livianos generan las emisiones más altas, incluso si transportan pasajeros a su máxima capacidad, en tanto que los buses del sistema BTR B5 pertenecen a los vehículos que generan menos emisiones. Este análisis también muestra que los buses BTR eléctricos y GNV emiten las emisiones más bajas. Finalmente, es importante mencionar que las emisiones del BTR eléctrico son incluso más pequeñas que las emisiones producidas por el vehículo liviano eléctrico.

**Figura 3.2-5:** Impacto de la ocupación de los vehículos en las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq (kg/km-pasajero), PM<sub>2.5</sub> (mg/km-pasajero), CO (g/km-pasajero) y NO<sub>x</sub> (g/km-pasajero) estimadas en el análisis DPR. Vehículos livianos: las emisiones se calcularon según la ocupación de diseño y la ocupación mínima (sólo un pasajero). Buses de transporte público: las emisiones se estimaron según la ocupación de diseño y considerando un 25 % de sobrecupo. (Fuente: esta investigación).



\* BTR: Bus de Tránsito Rápido; GNV: Gas natural vehicular; E10: mezcla 10 % bioetanol en gasolina; TWC: *Three Way Catalyst* (Catalizador de tres vías).

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

En este trabajo se realizó el Análisis de Ciclo de Vida de los combustibles, la electricidad y los biocombustibles producidos en Colombia que se usan en vehículos de transporte de pasajeros, para lo cual se empleó el *software* de uso libre OpenLCA ®.

Por medio del ACV Del Pozo a la Rueda ejecutado, se puede concluir que:

- En general, de las categorías de vehículos analizadas, los buses de *TransMilenio* eléctricos son los que producen las menores emisiones de los contaminantes evaluados por kilómetro-pasajero transportado.
- Las motocicletas, aunque son un medio de transporte rápido y económico, generan emisiones de los contaminantes evaluados por kilómetro-pasajero transportado equivalentes a las de los vehículos livianos < 1400 c.c. sin catalizador.
- La fase de operación de los vehículos de motor de combustión interna tiene las mayores emisiones de GEI, las cuales son superiores al 83 % en el caso de los buses de transporte de pasajeros, mientras que en los vehículos livianos supera el 80 %, y en el de las motocicletas esta contribución está entre el 80 y 81 %.
- Para los vehículos livianos, las mayores emisiones de PM2.5 se presentan en la producción de la fuente energética (gasolina y bioetanol). Es importante mencionar que las emisiones de material particulado en la producción de bioetanol ocurren por la quema de biomasa, tanto por la quema de la caña antes de la cosecha, como por la quema de bagazo para la cogeneración de energía.
- Un bus articulado eléctrico del sistema BTR reduce en un 86 % las emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, respecto a un BTR a diésel. También se tienen reducciones del 88 % en emisiones de PM2.5, del 99 % en CO y del 97 % en NOx.
- Al convertir los buses BTR *TransMilenio* de diésel a electricidad se presentan reducciones importantes en las emisiones de contaminantes. Sin embargo, en la

ciudad de Bogotá se lograrían mejoras más significativas si los pasajeros que se movilizan en motocicletas o transporte particular usaran el transporte público.

- Las emisiones vehiculares respecto a la unidad funcional gramos de contaminante por kilómetro y pasajero transportado son muy sensibles a la ocupación de los vehículos, por lo tanto, el aumento de la ocupación del vehículo puede tener algunas reducciones de emisiones para todos los vehículos evaluados, excepto las motocicletas.
- El *software* OpenLCA® que se eligió para el desarrollo del presente trabajo es un programa no comercial, flexible y de fácil uso, por lo cual se recomienda para próximas investigaciones relacionadas con la realización de Análisis de Ciclo de Vida.

## 4.2 Recomendaciones

- Los factores de emisión de la fase de operación del vehículo deben ser preferiblemente experimentales y representativos de la flota vehicular, con el fin de disminuir la incertidumbre asociada por el uso de estos, puesto que la fase de operación es la que más contribuye a las emisiones de los contaminantes evaluados.
- En el presente estudio se evaluaron categorías de impacto de punto intermedio asociadas a las emisiones atmosféricas y no se evaluaron los impactos sobre el agua, el suelo o sobre los ecosistemas. Se debe mencionar que no se evaluaron categorías de impacto de punto final, debido a que los métodos de evaluación han sido creados para países de Europa y Norteamérica, y la utilización de estos en este contexto hubiera introducido una mayor incertidumbre en los resultados. Para estudios futuros, es pertinente valorar el daño a los ecosistemas y a la salud humana, por medio de una metodología de evaluación de impactos adecuada para Colombia.
- A pesar de que hay información suficiente de las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq en la producción de electricidad, se encuentra muy poca información de otros contaminantes como PM<sub>2.5</sub>, CO y NO<sub>x</sub>, por lo cual fue necesario adaptar datos de



otros países. Se requiere realizar más estudios con el fin de determinar las emisiones de estos contaminantes en el sector eléctrico colombiano.

- Se advierte de la necesidad de crear en Colombia una base de datos para el Inventario del Ciclo de Vida (ICV) de los procesos realizados en el país, que muestre las emisiones y que permita usar dicha información en la aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida.
- Aunque se encuentra que los buses BTR *TransMilenio* eléctricos son la categoría de vehículo con las menores emisiones, es necesario realizar un estudio de la viabilidad de implementar este tipo de tecnología en la ciudad, y en particular se requiere de un Análisis de Ciclo de Vida orientado a costos.
- El escenario evaluado consideró las fuentes energéticas utilizadas en los vehículos de transporte de pasajeros de la ciudad de Bogotá en el año 2012 (mezclas biodiésel y diésel -B5-, etanol y gasolina -E10-, gas natural y electricidad). Por tanto, se recomienda tener en cuenta en estudios posteriores el contexto del uso exclusivo de biocombustibles, el aumento del porcentaje de biocombustibles en la mezcla con combustibles fósiles, la producción de energía eléctrica en época del fenómeno de El Niño o sistemas de transporte alternativos como el metro. Además, sería interesante incluir dentro del Análisis de Ciclo de Vida el impacto generado por el tipo de infraestructura requerida por los diferentes medios de transporte.
- Se advierte de la necesidad de crear una política a nivel estatal que regule el uso y el incremento futuro de medios de transporte que no posean control de emisiones, como, por ejemplo, los ciclomotores y las motocicletas, que por su facilidad de adquisición han ido aumentando en la ciudad en los últimos años.



## A. Anexo: descripción de los datos de entradas y salidas para el Análisis de Ciclo de Vida

En este anexo se listan los datos de entrada y salida utilizados en el cálculo del ACV para las diferentes fuentes energéticas y los resultados obtenidos para las categorías de impacto evaluadas.

### A.1. Datos de entradas y salidas para el ACV de bioetanol

**Tabla A- 1:** Datos de fertilizantes en el cultivo de caña referidos a 1 kg caña producido (adaptado de [22])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Sulfato de amonio	Masa	kg	6.014E-4
Compost	Masa	kg	2.27E-3
Fosfato de diamonio, como N	Masa	kg	1.72E-05
Fosfato de diamonio, como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Masa	kg	4.43E-05
Cal agrícola (carbonato de calcio)	Masa	kg	4.85E-4
Roca de fosfato, como P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Masa	kg	3.67E-05
Cloruro de potasio	Masa	kg	1.07E-05
Gallinaza	Masa	kg	9.98E-05
Urea	Masa	kg	2.84E-3
Sulfato de Zinc	Masa	kg	3.51E-07
Sulfuro de Zinc	Masa	kg	1.69E-06

**Tabla A- 2:** Datos entradas/salidas, producción de 1 kg de caña de azúcar (adaptado de [22])

Flujo	Propiedad <sup>6</sup>	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Dióxido de Carbono, biogénico	Masa	Kg	0.451
Cosecha manual	Volumen	m <sup>3</sup>	8.89 E-4
Cosecha mecánica	Área	Ha	5.35E-6
Electricidad consumida red	Energía	kWh	1.34E-2
Energía, poder calorífico superior, en biomasa	Energía	MJ	4.95
Fertilizantes Cultivo de Caña	Ítems	Ítem(s)	1
Ocupación de la tierra	Área*tiempo	m <sup>2</sup> *a	7.96E-7
Pesticidas (Cultivo de Caña)	Ítems	Ítem(s)	1
Preparación de la tierra	Ítems	Ítem(s)	1
Transformación, desde arable	Área	m <sup>2</sup>	3.98E-8
Transformación, hacia arable	Área	m <sup>2</sup>	3.98E-8
Transporte insumos Cultivo de caña Barco	Masa*distancia	t*km	4.22E-4
Transporte insumos Cultivo de caña camión >32 t	Masa*distancia	t*km	5.90E-4
Agua	Volumen	m <sup>3</sup>	0.055
<b>Salidas</b>			
Emisiones al aire por aplicación de fertilizantes/Amoníaco	Masa	kg	2.39E-4
Emisiones al aire por aplicación de fertilizantes/Monóxido de Dinitrógeno	Masa	kg	7.71E-5
Emisiones al aire por aplicación de fertilizantes/Óxidos de Nitrógeno	Masa	kg	1.61E-05
Emisiones al aire quema precosecha/Monóxido de Carbono, biogénico	Masa	kg	3.27E-2
Emisiones al aire quema precosecha/Hidrocarburos, sin especificar	Masa	kg	5.3E-3
Emisiones al aire quema precosecha/Metano, fósil	Masa	kg	3.03E-4
Emisiones al aire quema precosecha/Óxidos de Nitrógeno	Masa	kg	1.7E-4
Emisiones al aire quema precosecha/Partículas, > 10 µm	Masa	kg	2.62E-3
Emisiones al aire quema precosecha/Partículas, > 2.5 µm, y < 10µm	Masa	kg	2.84E-4
Caña de azúcar en Colombia	Masa	kg	1

<sup>6</sup> •La propiedad y la unidad de flujo *ítems* se utiliza para agrupar varios flujos en un solo proceso. Por ejemplo, la entrada Pesticidas (Cultivo de Caña) (**Tabla A- 2**) está conformada por Atrazina, Diuron, Glifosato, Compuestos fenoxi y Compuestos triazina (**Tabla A- 3**).

**Tabla A- 3:** Datos entradas pesticidas cultivo de caña referido a 1 kg de caña producido (adaptado de [22])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Atrazina	Masa	Kg	4.92E-06
Diuron	Masa	Kg	1.48E-05
Glifosato	Masa	Kg	5.97E-06
Compuestos fenoxi	Masa	Kg	1.71E-06
Compuestos triazina	Masa	Kg	6.52E-06

**Tabla A- 4:** Datos entradas preparación de la tierra cultivo de caña referido a 1 kg de caña producido (adaptado de [22])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Labranza, cultivador rotatorio	Área	Ha	1.39E-05
Labrado, rastrilleo, por batidora rotatoria	Área	Ha	1.39E-05
labranza, arado	Área	Ha	1.39E-05
Labranza, rastrilleo, por rastrillo rotatorio	Área	Ha	1.39E-05
Labranza, rastrilleo, por rastrillo rotatorio	Área	Ha	1.39E-05
Labranza, rastrilleo	Área	Ha	1.39E-05
Labranza, rastrilleo	Área	Ha	1.39E-05
Fertilización por transmisión	Área	Ha	1.39E-05
Plantación	Área	Ha	1.39E-05
Fertilización por transmisión	Área	Ha	1.39E-05

**Tabla A- 5:** Datos entradas Insumos químicos producción de etanol referido a 1 kg de etanol 99.6 % (adaptado de [22])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
productos químicos orgánicos, en la planta	Masa	kg	9.01E-3
Diamonio fosfato	Masa	kg	2.00E-4
Ácido Nítrico	Masa	kg	1.10E-3
Ácido Fosfórico	Masa	kg	1.80E-4
Hidróxido de sodio	Masa	kg	8.50E-3
Hipoclorito de sodio	Masa	kg	4.80E-4
Sulfato de sodio	Masa	kg	1.80E-6
Metabisulfito	Masa	kg	2.40E-5
Ácido sulfúrico	Masa	kg	1.80E-2
Agua	Masa	kg	1.30
Urea	Masa	kg	1.80E-3

**Tabla A- 6:** Datos entradas/salidas Producción de etanol en Colombia referido a 1 kg de etanol 99.6 % (adaptado de [22])

Flujo	Propiedad <sup>7</sup>	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Distribución de etanol en Bogotá	Ítems	Ítem(s)	2.60E-10
Electricidad consumida de la red	Energía	kWh	2.20E-2
Infraestructura planta de etanol	Ítems	Ítem(s)	5.50E-10
Insumos químicos Producción de Etanol	Ítems	Ítem(s)	1
Miel B	Masa	kg	3.84
Planta de compostaje	Ítems	Ítem(s)	4.54E-10
Transporte de etanol a Bogotá/camión > 16t	Masa*distancia	t*km	0.49
Transporte insumos químicos etanol barco	Masa*distancia	t*km	9.06E-3
Transporte insumos químicos etanol camión 28 T	Masa*distancia	t*km	6.20E-3
Tratamiento de agua, clase 2	Volumen	m <sup>3</sup>	6.68E-3
<b>Salidas</b>			
Compostaje/Metano, biogénico	Masa	kg	4.00E-7
Compostaje/Dióxido de Nitrógeno	Masa	kg	4.10E-6
Compostaje/Vapor de agua	Masa	kg	5.05E-2
Azúcar blanca	Masa	kg	236.84
Azúcar refinada	Masa	kg	252.63
Dióxido de Carbono	Masa	kg	0.95
CO <sub>2</sub> líquido	Masa	kg	1.60E-2
Compost	Masa	kg	322.63
Electricidad vendida	Energía	kWh	1.35E-1
Etanol al 99.6% a transportar	Masa	kg	1

**Tabla A- 7:** Datos parámetro de asignación económico para la producción de etanol 99.6 % (adaptado de [22])

Producto	Económico
azúcar blanca	0.351
azúcar refinada	0.392
CO <sub>2</sub> líquido	0
Compost	0.032
electricidad vendida	0.002
etanol al 99.6% a transportar	0.223

<sup>7</sup> La propiedad y la unidad de flujo *ítems* se utiliza para agrupar varios flujos en un solo proceso. Por ejemplo, la entrada Pesticidas (Cultivo de Caña) (**Tabla A- 2**) está conformada por Atrazina, Diuron, Glifosato, Compuestos fenoxi y Compuestos triazina (**Tabla A- 3**).

## A.2. Datos de entradas y salidas para el ACV de biodiésel

**Tabla A- 8:** Datos entradas/salidas producción de 1 kg Fruto fresco de palma (adaptado de [22])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Dióxido Carbono, biogénico	Masa	kg	1.14
Dióxido Carbono, Transformación de la tierra	Masa	kg	-0.13
Energía, poder calorífico superior, en biomasa	Energía	MJ	16
Fertilizantes palma de aceite	Área*tiempo	ha*a	5.26E-05
Pesticidas palma de aceite	Masa	kg	2.19E-4
Transporte de insumos cultivo de palma/ transporte, camión> 16t, automotor promedio Europa	Transporte de mercancías (masa*distancia)	t*km	5.10E-3
Transporte de insumos cultivo de palma/automóvil de pasajeros, gasolina, EURO 3	Persona transportada	p*km	1.39E-3
Transporte de insumos cultivo de palma/ tractor y remolque	masa*distancia	t*km	4.97E-3
<b>Salidas</b>			
Emisiones al aire por liberación de fertilizantes/Amoníaco	Masa	kg	2.34E-4
Emisiones al aire por liberación de fertilizantes/Monóxido de Dinitrógeno	Masa	kg	1.57E-4
Emisiones al aire por liberación de fertilizantes/Óxidos de Nitrógeno	Masa	kg	3.30E-5
Fruto fresco de palma	Masa	kg	1

**Tabla A- 9:** Datos entradas/salidas Extracción aceite de palma referido a 100 t fruto fresco de palma (Adaptado de [22])

Flujo	Propiedad <sup>8</sup>	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Electricidad autogenerada	Energía	kWh	740.12
Fruto fresco de palma	Masa	kg	100000
Caldera/Unidad de cogeneración 6400kWth, quema de leña, construcción/CH	Ítems	Ítem(s)	8.67E-08
Caldera/Unidad de cogeneración 6400kWth, quema de leña, componentes comunes para calor+ electricidad/CH	Ítems	Ítem(s)	3.47E-7
Turbina/Unidad de cogeneración 6400kWth, quema de leña, componentes comunes solo electricidad	Ítems	Ítem(s)	3.47E-7
Extractor de aceite	Ítems	Ítem(s)	1.00E-7
Electricidad de la red	Energía	kWh	919
Agua	Masa	kg	109840
<b>Salidas</b>			
Aceite crudo de palma	Masa	kg	21380
Emisiones aire/Dióxido de Carbono, biogénico	Masa	kg	62750
Emisiones aire/Monóxido de Carbono, biogénico	Masa	kg	3.09
Emisiones aire/ Monóxido de Dinitrógeno	Masa	kg	1.01
Emisiones aire/Formaldehido	Masa	kg	5.73E-2
Emisiones aire/Calor, residual	Energía	MJ	3.03E5
Emisiones aire/Hidrocarburos, alifáticos, alcanos, sin especificar	Masa	kg	4.01E-1
Emisiones aire/Hidrocarburos, alifáticos, sin especificar	Masa	kg	1.37
Emisiones aire/Metano, biogénico	Masa	kg	1.91E-1
Emisiones aire/Óxidos de Nitrógeno	Masa	kg	38.8
Emisiones aire/ NMVOC, compuestos orgánicos volátiles sin metano, origen no especificado	Masa	kg	2.69E1
Emisiones aire/ PAH, hidrocarburos aromáticos policíclicos	Masa	kg	4.85E3
Emisiones aire/ Partículas, < 2.5 µm	Masa	kg	19.8
Emisiones aire/ Dióxido de Azufre	Masa	kg	1.1

<sup>8</sup> La propiedad y la unidad de flujo *ítems* se utiliza para agrupar varios flujos en un solo proceso. Por ejemplo, la entrada Pesticidas (Cultivo de Caña) (**Tabla A- 2**) está conformada por Atrazina, Diuron, Glifosato, Compuestos fenoxi y Compuestos triazina (**Tabla A- 3**). En este caso, los procesos no se muestran, debido a que hacen parte de uno de los procesos de referencia tomados de ecoinvent 2.2., es decir que para ver su contenido debe referirse a la base de datos.



**Tabla A- 10:** Datos entradas/salidas refinación aceite de palma referido a 1 t de aceite refinado (adaptado de [22])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Aceite crudo de palma	Masa	kg	1040
Arena de blanqueo	Masa	kg	5.01
Electricidad de la red	Energía	kWh	14.09
Vapor	Energía	MJ	512.16
Hidróxido de sodio 50%	Masa	kg	0.68
Agua	Masa	kg	179.24
<b>Salidas</b>			
Aceite refinado de palma	Masa	kg	1000

**Tabla A- 11:** Datos insumos refinación de glicerina referido a 1 t de biodiésel (adaptado de [22])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Carbón activado	Masa	kg	0.83
Electricidad de la red	Energía	kWh	17.36
Hidróxido de Sodio	Masa	kg	1.28
Vapor	Masa	kg	198.7
Agua	Masa	kg	235

**Tabla A- 12:** Datos parámetro de asignación económico para la producción de biodiésel (adaptado de [22])

Producto	Económico
Aceite de palmiste	0.06
Biodiésel Colombia	0.85
Glicerina cruda	0.02
Glicerina purificada	0
Jabón	0.003
Oleína	0
Torta de palmiste	0.013
Tusa	0.054

**Tabla A- 13:** Datos entradas/salidas producción de biodiésel en Colombia referido a 1 t de biodiésel (adaptado de [22])

Flujo	Propiedad <sup>9</sup>	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Aceite refinado de palma	Masa	Kg	1000
Infraestructura refinación y esterificación	Ítems	ítem(s)	1
Ácido acético	Masa	Kg	0.63
Electricidad de la red	Energía	kWh	28.18
Vapor	Energía	MJ	387.84
Ácido clorhídrico	Masa	Kg	7.69
Metanol	Masa	Kg	108.65
Nitrógeno	Masa	Kg	1.80
Hidróxido de sodio	Masa	Kg	0.96
Metóxido de sodio	Masa	Kg	18.15
Ácido sulfúrico	Masa	Kg	0.18
Operación, buque transoceánico	masa*distancia	t*km	781.7
Transporte, camión > 32t, EURO 3	masa*distancia	t*km	141.3
Insumos refinación de glicerina	Ítems	Ítem(s)	1
Tratamiento de Agua Biodiésel	Volumen	m <sup>3</sup>	3.29
<b>Salidas</b>			
Aceite de palmiste	Masa	Kg	95.69
Biodiésel Colombia	Masa	Kg	1000
Glicerina cruda	Masa	kg	137.32
Glicerina purificada	Masa	kg	0
Jabón	Masa	kg	50.72
Oleína	Masa	kg	0
Torta de palmiste	Masa	kg	138.76
Tusa	Masa	kg	1019.14
Demanda química de oxígeno, DQO	Masa	t	4.66E-3
Metano, biogénico	Masa	t	1.50E-2

<sup>9</sup> La propiedad y la unidad de flujo *ítems* se utiliza para agrupar varios flujos en un solo proceso. Por ejemplo, la entrada Pesticidas (Cultivo de Caña) (**Tabla A- 2**) está conformada por Atrazina, Diuron, Glifosato, Compuestos fenoxi y Compuestos triazina (**Tabla A- 3**). En este caso, los procesos que conforman a Infraestructura refinación y esterificación no se muestran, debido a que hace parte de uno de los procesos de referencia tomados de ecoinvent 2.2., es decir que para ver su contenido debe referirse a la base de datos.

### A.3. Datos de entradas y salidas ciclo de vida de combustibles fósiles

- Producción de crudo, refinación de gasolina y diésel

**Tabla A- 14:** Datos entradas/salidas producción de 1 kg de petróleo crudo (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Energía en biomasa	Energía	MJ	1.76E-3
Dióxido de carbono, en el aire	Masa	kg	1.78E-4
Energía, cinética (en el viento)	Energía	MJ	6.59E-4
Energía, solar	Energía	MJ	9.62E-06
Carbono, en materia orgánica, en el suelo	Masa	kg	2.68E-07
Carbón mineral, duro, en el subsuelo	Masa	kg	2.68E-3
Gas natural, en el subsuelo	Volumen	m <sup>3</sup>	4.64E-2
Petróleo crudo, en el subsuelo	Masa	kg	1.01
Energía, potencial (en hidroeléctrica)	Energía	MJ	4.96E-3
Agua	Volumen	m <sup>3</sup>	4.34E-2
Ocupación de la tierra	Área*tiempo	m <sup>2</sup> *a	1.62E-3
Transformación de la tierra	Área	m <sup>2</sup>	2.49E-3
<b>Salidas</b>			
Agua	Masa	kg	8.09E-07
Amoníaco	Masa	kg	1.05E-06
Benceno	Masa	kg	5.92E-07
Benzo(a)pireno	Masa	kg	7.71E-13
Calor residual	Energía	MJ	1.85E+00
CFC-11	Masa	kg	4.43E-16
CFC-113	Masa	kg	3.44E-14
CFC-114	Masa	kg	4.82E-11
CFC-12	Masa	kg	3.08E-13
Cloroformo	Masa	kg	2.05E-12
Diclorobenceno	Masa	kg	4.99E-15
Dióxido de carbono, biogénico	Masa	kg	1.78E-04
Dióxido de carbono, fósil	Masa	kg	2.57E-02
Dióxido de carbono, transformación de la tierra	Masa	kg	2.89E-06
Disulfuro de carbono	Masa	kg	6.48E-14
Halón 1001	Masa	kg	8.80E-20
Halón 1211	Masa	kg	3.82E-11
Halón 1301	Masa	kg	8.29E-10

**Tabla A- 14:** Datos entradas/salidas producción de 1 kg de petróleo crudo (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Salidas</b>			
HCFC-21	Masa	kg	2.73E-16
HCFC-22	Masa	kg	1.60E-10
Hexafluoruro de azufre	Masa	kg	5.91E-10
HFC-116	Masa	kg	1.45E-10
HFC-134 <sup>a</sup>	Masa	kg	4.74E-10
HFC-152 <sup>a</sup>	Masa	kg	3.54E-12
HFC-23	Masa	kg	8.68E-14
Metano, biogénico	Masa	kg	2.46E-07
Metano, fósil	Masa	kg	5.03E-05
Monóxido de carbono, biogénico	Masa	kg	3.49E-08
Monóxido de carbono, fósil	Masa	kg	1.46E-04
Monóxido de dinitrógeno	Masa	kg	1.23E-06
NMVOOC, compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano	Masa	kg	3.34E-05
Óxidos de nitrógeno	Masa	kg	2.02E-04
Ozono	Masa	kg	4.05E-08
PAH, hidrocarburos aromáticos policíclicos	Masa	kg	7.54E-09
Partículas, < 2.5 µm	Masa	kg	2.24E-05
Partículas, > 2.5 µm, y < 10µm	Masa	kg	1.02E-05
Petróleo crudo, transportado	Masa	kg	1.00E+00
R-10	Masa	kg	1.20E-10
R-14	Masa	kg	1.28E-09
R-40	Masa	kg	3.17E-13

**Tabla A- 15:** Datos entradas/salidas producción de 1 kg de gasolina sin plomo en refinería (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Amoníaco líquido	Masa	kg	1.92E-06
Cloruro de calcio, CaCl <sub>2</sub> , en la planta	Masa	kg	1.55E-5
Químicos orgánicos, en la planta	Masa	kg	1.82E-4
Cloro líquido, producción	Masa	kg	1.31E-4
Producción de petróleo crudo, transportado larga distancia	Masa	kg	9.40E-1

**Tabla A- 15:** Datos entradas/salidas producción de 1 kg de gasolina sin plomo en refinería (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad <sup>10</sup>	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Electricidad de mediana tensión de la red	Energía	kWh	5.54E-2
Petróleo pesado, quemado en equipos de la refinería	Energía	MJ	1.22
Ácido clorhídrico, 30%	Masa	kg	8.49E-5
Aceite lubricante	Masa	kg	2.37E-5
Metil tertbutil éter	Masa	kg	0.02493
Molibdeno	Masa	kg	7.87E-08
Gasolina	Masa	kg	3.82E-2
Níquel	Masa	kg	1.22E-08
Nitrógeno líquido	Masa	kg	7.86E-4
Paladio	Masa	kg	7.96E-08
Platino	Masa	kg	2.52E-09
Propilenglicol	Masa	kg	1.97E-5
Refinería	Número de ítems	Ítem(s)	4.93E-11
Gas de la refinería, quemado en equipos	Energía	MJ	3.69
Renio	Masa	kg	3.16E-09
Rodio	Masa	kg	2.52E-09
Hipoclorito de sodio, 15%	Masa	kg	4.77E-5
Ácido sulfúrico	Masa	kg	1.14E-5
Agua, potable	Masa	kg	1.45E-2
transporte, carga, tren	Transporte de bienes (Masa*distancia)	t*km	4.05E-3
transporte, camión > 16t, flota promedio	Transporte de bienes (Masa*distancia)	t*km	6.7E-4
Agua, fría	Volumen	m <sup>3</sup>	3.82E-3
Agua, río	Volumen	m <sup>3</sup>	6.68E-4
Zeolita	Masa	kg	1.76E-5
Zinc	Masa	kg	1.90E-07

<sup>10</sup> La propiedad y la unidad de flujo *ítems* se utiliza para agrupar varios flujos en un solo proceso. Por ejemplo, la entrada Pesticidas (Cultivo de Caña) (**Tabla A- 2**) está conformada por Atrazina, Diuron, Glifosato, Compuestos fenoxi y Compuestos triazina (**Tabla A- 3**). En este caso, los procesos no se muestran, debido a que hace parte de uno de los procesos de referencia tomados de ecoinvent 2.2., es decir que para ver su contenido debe referirse a la base de datos.

**Tabla A- 15:** Datos entradas/salidas producción de 1 kg de gasolina sin plomo en refinería (adaptado de [54]) (continuación)

Flujo	Propiedad <sup>11</sup>	Unidad	Valor
<b>Salidas</b>			
Gasolina sin plomo	Masa	kg	1
Amoníaco	Masa	kg	7.02E-08
Monóxido de dinitrógeno	Masa	kg	1.69E-06
Calor residual	Energía	MJ	9.27E-2
Metano, fósil	Masa	kg	3.84E-5
Óxidos de nitrógeno	Masa	kg	3.96E-5
Partículas, > 10 µm	Masa	kg	9.59E-06
Dióxido de azufre	Masa	kg	3.00E-4

**Tabla A- 16:** Datos entradas/salidas producción 1 kg de diésel en refinería (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad <sup>9</sup>	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Amoníaco líquido	Masa	kg	1.93E-06
Cloruro de calcio, CaCl <sub>2</sub> , en la planta	Masa	kg	1.56E-05
Químicos orgánicos, en la planta	Masa	kg	4.27E-4
Cobalto	Masa	kg	2.92E-08
Producción de petróleo crudo, transportado larga distancia	Masa	kg	9.69E-1
Electricidad de mediana tensión de la red	Energía	kWh	2.45E-2
Petróleo pesado, quemado en equipos de la refinería	Energía	MJ	6.80E-1
Ácido clorhídrico, 30%	Masa	kg	8.54E-05
Aceite lubricante	Masa	kg	2.38E-05
Molibdeno	Masa	kg	1.58E-08
Gasolina	Masa	kg	3.84E-2
Nitrógeno líquido	Masa	kg	7.91E-4

<sup>11</sup> La propiedad y la unidad de flujo *ítems* se utiliza para agrupar varios flujos en un solo proceso. Por ejemplo, la entrada Pesticidas (Cultivo de Caña) (**Tabla A- 2**) está conformada por Atrazina, Diuron, Glifosato, Compuestos fenoxi y Compuestos triazina (**Tabla A- 3**). En este caso, los procesos no se muestran, debido a que hace parte de uno de los procesos de referencia tomados de ecoinvent 2.2., es decir que para ver su contenido debe referirse a la base de datos.

Propilenglicol	Masa	kg	5.52E-07
Refinería	Número de ítems	Ítem(s)	2.76E-11

**Tabla A- 16:** Datos entradas/salidas producción 1 kg de diésel en refinería (adaptado de [54]) (continuación)

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Gas de la refinería, quemado en equipos	Energía	MJ	2.07
Hipoclorito de sodio, 15%	Masa	kg	4.80E-5
Ácido sulfúrico	Masa	kg	1.14E-05
Agua, potable	Masa	kg	1.46E-2
Transporte, carga, tren	Transporte de bienes (Masa*distancia)	t*km	4.07E-3
Transporte, camión > 16t, flota promedio	Transporte de bienes (Masa*distancia)	t*km	6.79E-4
Agua, fría	Volumen	m3	3.84E-3
Agua, rio	Volumen	m3	6.72E-4
Zeolita	Masa	kg	3.37E-06
Zinc	Masa	kg	3.64E-08
<b>Salidas</b>			
Diésel, en refinería	Masa	kg	1
Amoníaco	Masa	kg	7.06E-08
Monóxido de dinitrógeno	Masa	kg	9.44E-07
Calor residual	Energía	MJ	5.18E-2
Metano, fósil	Masa	kg	3.86E-5
Óxidos de nitrógeno	Masa	kg	2.21E-05
Partículas, > 10 µm	Masa	kg	9.65E-06

**Tabla A- 17:** Datos entradas/salidas producción 1 kg de diésel de bajo azufre en refinería (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Diésel, en la refinería	Masa	kg	1
Electricidad de mediana tensión de la red	Energía	kWh	1.47E-3
Petróleo pesado, quemado en equipos de la refinería	Energía	MJ	4.27E-2
Gas de la refinería, quemado en equipos	Energía	MJ	1.24E-1
<b>Salidas</b>			
Diésel de bajo azufre, en la refinería	Masa	kg	1
Calor residual	Energía	MJ	5.30E-3

**Tabla A- 18:** Datos entradas/salidas producción 1 kg de diésel de bajo azufre en estación de servicio (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Diésel de bajo azufre, en la refinería	Masa	kg	1
Disposición de residuos sólidos municipales, 22,9% de agua, en relleno sanitario	Masa	kg	1.00E-5
Disposición, lodos, 90% de agua, incineración de residuos peligrosos	Masa	kg	1.70E-4
electricidad, baja tensión, de la red	Energía	kWh	6.70E-3
Petróleo liviano, quemado en caldera de 100 kW	Energía	MJ	6.20E-4
Agua	Masa	kg	6.90E-4
Transporte, camión cisterna barcaza	Transporte de bienes (Masa*distancia)	t*km	4.70E2
Transporte, oleoducto, en tierra	Transporte de bienes (Masa*distancia)	t*km	5.59E-1
Transporte, carga, tren	Transporte de bienes (Masa*distancia)	t*km	3.20E-2
Transporte, camión > 16t, flota promedio	Transporte de bienes (Masa*distancia)	t*km	3.37E-2
Transporte, camión cisterna transoceánica	Transporte de bienes (Masa*distancia)	t*km	6.32E-1

**Tabla A- 18:** Datos entradas/salidas producción 1 kg de diésel de bajo azufre en estación de servicio (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Tratamiento de agua lluvia, tratamiento de agua residual clase 2	Volumen	m <sup>3</sup>	8.00E-5
<b>Salidas</b>			
Diésel de bajo azufre, promedio regional	Masa	kg	1
Calor residual	Energía	MJ	2.41E-2



- Producción de gas natural

**Tabla A- 19:** Datos entradas/salidas producción de 1 kg de gas natural (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad <sup>12</sup>	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Dióxido de carbono	Masa	kg	2371.1
Energía, cinética (viento)	Energía	MJ	395.55
Energía, solar	Energía	MJ	7.51
Petróleo crudo, en el subsuelo	Masa	kg	1779.4
Gas natural, en el subsuelo	Volumen	m <sup>3</sup>	1424.6
Carbón, marrón, en el subsuelo	Masa	kg	1069.5
Carbón, duro, en el subsuelo	Masa	kg	5026.8
Carbono, materia orgánica en el suelo	Masa	kg	6.38E-3
Agua	Área	m <sup>2</sup>	85008.03
Ocupación de la tierra	Área*tiempo	m <sup>2</sup> *a	204.03
Transformación de la tierra	Volumen	m <sup>3</sup>	2.35
Energía, potencial (en hidroeléctrica)	Energía	MJ	114.49
Energía, en la biomasa	Energía	MJ	98.68
<b>Salidas</b>			
Gas natural, estación de servicio	Número de ítems	Ítem(s)	1
Agua	Masa	kg	2.43E-03
Amoníaco	Masa	kg	2.27E-02
Benceno	Masa	kg	2.37E-12
Calor residual	Energía	MJ	2.74E+02
CFC-11	Masa	kg	3.86E-13
CFC-113	Masa	kg	3.01E-11
CFC-12	Masa	kg	4.68E-10
Cloroformo	Masa	kg	4.34E-09

<sup>12</sup> La propiedad y la unidad de flujo *ítems* se utiliza para agrupar varios flujos en un solo proceso. Por ejemplo, la entrada Pesticidas (Cultivo de Caña) (**Tabla A- 2**) está conformada por Atrazina, Diuron, Glifosato, Compuestos fenoxi y Compuestos triazina (**Tabla A- 3**). En este caso, los procesos no se muestran, debido a que hace parte de uno de los procesos de referencia tomados de ecoinvent 2.2., es decir que para ver su contenido debe referirse a la base de datos.

**Tabla A- 19:** Datos entradas/salidas producción de 1 kg de gas natural (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Salidas</b>			
Dióxido de carbono, biogénico	Masa	kg	8.89E-02
Dióxido de carbono, fósil	Masa	kg	1.98E-01
Dióxido de carbono, transformación de la tierra	Masa	kg	2.52E-04
Disulfuro de carbono	Masa	kg	1.52E-04
HFC-134 <sup>a</sup>	Masa	kg	2.17E-06
CFC-114	Masa	kg	5.38E-08
Halón 1211	Masa	kg	5.60E-08
Halón 1301	Masa	kg	6.29E-08
HCC-30	Masa	kg	1.84E-09
HCFC-140	Masa	kg	7.10E-11
HCFC-21	Masa	kg	2.38E-13
HCFC-22	Masa	kg	4.37E-07
Hexafluoruro de azufre	Masa	kg	4.14E-07
HFC-116	Masa	kg	2.16E-06
HFC-152 <sup>a</sup>	Masa	kg	2.72E-09
HFC-23	Masa	kg	7.56E-11
Metano, biogénico	Masa	kg	2.03E-04
Halón 1001	Masa	kg	5.92E-15
CFC-12	Masa	kg	4.68E-10
Metano, fósil	Masa	kg	4.58E-03
R-10	Masa	kg	9.03E-08
R-14	Masa	kg	1.94E-06
Monóxido de carbono, biogénico	Masa	kg	7.16E-04
Monóxido de carbono, fósil	Masa	kg	1.62E-03
Monóxido de dinitrógeno	Masa	kg	2.76E-04
NMVOOC, compuestos orgánicos volátiles diferentes al metano	Masa	kg	1.23E-02
Óxidos de nitrógeno	Masa	kg	5.92E-02
Ozono	Masa	kg	3.99E-05
PAH, hidrocarburos aromáticos policíclicos	Masa	kg	1.13E-05
Partículas, < 2.5 µm	Masa	kg	9.84E-03
Partículas, > 10 µm	Masa	kg	3.80E-02
Partículas, > 2.5 µm, y < 10 µm	Masa	kg	2.62E-02
R-40	Masa	kg	3.92E-09
Tolueno	Masa	kg	5.78E-06

## A.4. Datos de entradas y salidas: Ciclo de vida generación de electricidad

**Tabla A- 20:** Datos entradas/salidas producción 1 kWh de electricidad a partir de carbón (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Ocupación de la tierra	Área*tiempo	m <sup>2</sup> *año	3.18E-2
Transformación de la tierra	Área	m <sup>2</sup>	6.44E-4
Energía potencial convertida (en el depósito-hidroeléctrica)	Energía	MJ	2.13E-2
Agua	Volumen	m <sup>3</sup>	1.75E-1
Carbono materia orgánica en el suelo	Masa	Kg	1.25E-8
Carbón, café, en el subsuelo	Masa	Kg	7.33E-3
Carbón, duro, en el subsuelo	Masa	Kg	5.99E-1
<b>Salidas</b>			
Agua	Masa	Kg	1.13E-04
Amoníaco	Masa	kg	3.32E-05
Calor residual	Energía	MJ	6.35
CFC-11	Masa	kg	1.04E-15
CFC-113	Masa	kg	5.58E-14
CFC-114	Masa	kg	2.19E-10
CFC-12	Masa	kg	8.43E-13
Cloroformo	Masa	kg	7.32E-12
Dióxido de carbono, biogénico	Masa	kg	6.16E-04
Dióxido de carbono, Transformación de la tierra	Masa	kg	1.56E-06
Dióxido de carbono, fósil	Masa	kg	1.02
Disulfuro de carbono	Masa	kg	1.36E-07
Halón 1211	Masa	kg	1.11E-10
Halón 1301	Masa	kg	3.66E-10
HCC-30	Masa	kg	1.00E-12
HCFC-140	Masa	kg	4.94E-14
HCFC-22	Masa	kg	5.18E-10
Hexafluoruro de azufre	Masa	kg	1.74E-09
HFC-116	Masa	kg	1.09E-09
HFC-134 <sup>a</sup>	Masa	kg	1.29E-11
HFC-152 <sup>a</sup>	Masa	kg	1.60E-11
HFC-23	Masa	kg	2.04E-13
Metano, biogénico	Masa	kg	1.97E-06
Metano, fósil	Masa	kg	3.26E-03
Monóxido de carbono, biogénico	Masa	kg	3.81E-06
Monóxido de carbono, fósil	Masa	kg	2.38E-04

**Tabla A- 20:** Datos entradas/salidas producción 1 kWh de electricidad a partir de carbón (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Salidas</b>			
Monóxido de dinitrógeno	Masa	kg	1.18E-05
PAH, hidrocarburos aromáticos policíclicos	Masa	kg	3.09E-08
Partículas, < 2.5 µm	Masa	kg	5.09E-04
Partículas, > 10 µm	Masa	kg	1.30E-03
Partículas, > 2.5 µm, y < 10 µm	Masa	kg	8.24E-05
R-10	Masa	kg	2.44E-10
R-14	Masa	kg	9.79E-09
R-40	Masa	kg	1.32E-12

**Tabla A- 21:** Datos entradas/salidas producción 1 kWh de electricidad en hidroeléctrica (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad <sup>13</sup>	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Disposición, aceite mineral usado, 10% de agua, incineración de residuos peligrosos	Masa	kg	7.00E-7
Energía potencial convertida (en el depósito hidroeléctrica)	Energía	MJ	3.79
Aceite lubricante	Masa	kg	7.00E-7
Ocupación, masas de agua artificiales	Área*tiempo	m <sup>2</sup> *a	3.50E-2
Central hidroeléctrica, embalse	Número of ítems	Ítem(s)	3.90E-13
Transformación de la tierra	Área	m <sup>2</sup>	4.60E-4
Volumen ocupado, reservorio	Volumen*tiempo	m <sup>3</sup> *a	0.15
El agua origen natural, uso en la turbina	Volumen	m <sup>3</sup>	8.1
<b>Salidas</b>			
Dióxido de carbono, Transformación de la tierra	Masa	kg	1.04E-1
Electricidad hidroeléctrica	Energía	kWh	1
Metano, biogénico	Masa	Kg	1.97E-3

<sup>13</sup> La propiedad y la unidad de flujo *ítems* se utiliza para agrupar varios flujos en un solo proceso. Por ejemplo, la entrada Pesticidas (Cultivo de Caña) (**Tabla A- 2**), está conformado por Atrazina, Diuron, Glifosato, Compuestos fenoxi y Compuestos triazina (**Tabla A- 3**). En este caso, los procesos no se muestran, debido a que hace parte de uno de los procesos de referencia tomados de ecoinvent 2.2., es decir que para ver su contenido debe referirse a la base de datos.

**Tabla A- 22:** Datos entradas/salidas producción 1 kWh de electricidad mix consumidor Bogotá (elaboración propia)

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Electricidad de carbón	Energía	kWh	8.30E-2
Electricidad hidroeléctrica	Energía	kWh	9.17E-1
<b>Salidas</b>			
Electricidad, mix consumidor, Bogotá	Energía	kWh	1

**Tabla A- 23:** Datos entradas/salidas producción 1 kWh de electricidad alto voltaje, mix consumidor Bogotá (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Electricidad, mix consumidor, Bogotá	Energía	kWh	1
Red de transmisión electricidad, voltaje medio	Longitud	Km	8.44E-09
Red de transmisión electricidad, larga distancia	Longitud	Km	3.17E-10
<b>Salidas</b>			
Monóxido de dinitrógeno	Masa	Kg	5.00E-7
Electricidad, alta tensión, mezcla consumidores, red Bogotá	Energía	kWh	1
Calor residual, suelo	Energía	MJ	1.78E--3
Calor residual, aire	Energía	MJ	3.40E-2

**Tabla A- 24:** Datos entradas/salidas producción 1 kWh de electricidad medio voltaje, mix consumidor Bogotá (adaptado de [54])

Flujo	Propiedad	Unidad	Valor
<b>Entradas</b>			
Electricidad, alta tensión, mezcla consumidores, red modificada Bogotá	Energía	kWh	1
Hexafluoruro de azufre, líquido	Masa	Kg	3.73E-08
Red de transmisión electricidad, voltaje medio	Longitud	Km	3.24E-08
<b>Salidas</b>			
Electricidad, media tensión, mezcla consumidores, red Bogotá	Energía	kWh	1
Calor residual, suelo	Energía	MJ	1.65E-2
Calor residual, aire	Energía	MJ	2.01E-2
Hexafluoruro de azufre	Masa	Kg	3.72E-08

## A.5. Muestra de cálculo: Economía de combustible

En esta sección se realiza una muestra de cálculo para la obtención de la economía del combustible por medio del balance de masa de carbono, a partir de los factores de emisión de CO<sub>2</sub> y CO y el contenido de carbono del combustible.

Datos requeridos:

Densidad usada en los cálculos		% de Carbono en combustibles [61]	
Densidad mezcla B5	<b>873.9 g/L</b>	%C Diésel	<b>0.861</b>
Densidad mezcla E10	<b>721.4 g/L</b>	%C gasolina	<b>0.864</b>
Densidad gas natural	<b>0.517 g/L</b>	%C gas natural	<b>0.998</b>

### Ejemplo 1. Bus BTR Transmilenio B5

Proceso de cálculo

1. Tomar factores de emisión de CO<sub>2</sub> y CO de la **Tabla 2-1**.

Factor de emisión (g/km)	CO <sub>2</sub>	CO
BTR Transmilenio B5	3428.878	248.166

2. Multiplicar la emisión por la fracción en masa de carbono en el compuesto. Sumar los resultados del CO<sub>2</sub> y CO y multiplicar por los inversos de la densidad y el contenido de carbono en el combustible.

$$\frac{3428.878 \text{ g CO}_2}{\text{km}} * \frac{12 \text{ g C}}{44 \text{ g CO}_2} = 935.15 \text{ g de C/km}$$

$$\frac{248.166 \text{ g CO}}{\text{km}} * \frac{12 \text{ g C}}{28 \text{ g CO}} = 106.36 \text{ g de C/km}$$

$$\begin{aligned} & (935.15 + 106.36) \text{ g de } \frac{\text{C}}{\text{km}} * \frac{1 \text{ L diésel B5}}{873.9 \text{ g combustible}} * \frac{1 \text{ g combustible}}{0.861 \text{ g C}} \\ & = \frac{1.38 \text{ L diésel B5}}{\text{km}} \end{aligned}$$

3. El resultado final se registra en la **Tabla 2-1** en km/volumen de combustible, así que se debe calcular el inverso del resultado anterior.

$$\frac{1}{1.38 \text{ L diésel B5/km}} = 0.72 \text{ km/L}$$

**Ejemplo 2. Taxi GNV**

Proceso de cálculo

1. Tomar factores de emisión de CO<sub>2</sub> y CO de la **Tabla 2-1**.

Factor de emisión (g/km)	CO <sub>2</sub>	CO
Taxi GNV	241	13

2. Multiplicar la emisión por la fracción en masa de carbono en el compuesto. Sumar los resultados del CO<sub>2</sub> y CO y multiplicar por los inversos de la densidad y el contenido de carbono en el combustible.

$$\frac{241 \text{ g CO}_2}{\text{km}} * \frac{12 \text{ g C}}{44 \text{ g CO}_2} = 65.72 \text{ g de C/km}$$

$$\frac{13 \text{ g CO}}{\text{km}} * \frac{12 \text{ g C}}{28 \text{ g CO}} = 5.57 \text{ g de C/km}$$

$$(65.72 + 5.57) \text{ g de } \frac{\text{C}}{\text{km}} * \frac{1 \text{ L GNV}}{0.517 \text{ g combustible}} * \frac{1 \text{ g combustible}}{0.998 \text{ g C}} = \frac{138.17 \text{ L GNV}}{\text{km}}$$

3. El resultado final se registra en la **Tabla 2-1** en km/volumen de combustible, así que se debe calcular el inverso del resultado anterior.

$$\frac{1}{138.17 \text{ L GNV/km}} * \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} = 7.2 \text{ km/m}^3$$

## A.6. Muestra de cálculo: Análisis de Ciclo de Vida

### Ejemplo 1

En esta sección se plasma una muestra de cálculo que indica la realización del ACV para el gas natural en la categoría cambio climático (emisiones de CO<sub>2</sub>-eq).

1. Suma de las emisiones de cada uno de los gases efecto invernadero por etapa: producción de la fuente energética y consumo en el vehículo.
2. Multiplicar la emisión del gas de efecto invernadero por el factor de conversión a unidades de CO<sub>2</sub> equivalente. El potencial de calentamiento global de los Gases de Efecto Invernadero se muestra en la siguiente tabla:

**Tabla A- 25:** Potencial de calentamiento global gases efecto invernadero (kg CO<sub>2</sub>-eq/kg) [55]

Flujo	Factor	Unidad
CFC-11	4750	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
CFC-113	6130	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
CFC-114	10000	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
CFC-115	7370	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
CFC-12	10900	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
CFC-13	14000	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
Cloroformo	30	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
CO	1.5714	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
CO <sub>2</sub>	1	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
Halón 1211	1890	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
Halón 1301	7140	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HCC-30	8.7	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HCFC-123	77	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HCFC-124	609	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HCFC-141b	725	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HCFC-142b	2310	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HCFC-21	210	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HCFC-22	1810	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HFC-116	12200	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HFC-125	3500	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HFC-134 <sup>a</sup>	1430	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HFC-143 <sup>a</sup>	4470	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HFC-152 <sup>a</sup>	124	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
HFC-23	14800	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg



**Tabla A- 25:** Potencial de calentamiento global gases efecto invernadero (kg CO<sub>2</sub>-eq/kg) [55] (continuación)

Flujo	Factor	Unidad
HFC-32	675	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
Metano	25	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
N <sub>2</sub> O	298	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
R-10	1400	kg CO <sub>2</sub> -eq/kg
R-14	7390	kg CO <sub>2</sub> -eq /kg
R-40	13	kg CO <sub>2</sub> -eq /kg
Hexafluoruro de Azufre	22800	kg CO <sub>2</sub> -eq /kg
Óxido nitroso	298	kg CO <sub>2</sub> -eq /kg
Fluoruro de nitrógeno	17200	kg CO <sub>2</sub> -eq /kg

3. Sumar las emisiones convertidas a CO<sub>2</sub> equivalente.
4. Cálculo potencial de calentamiento global uso de gas natural

Se toman los Gases de Efecto Invernadero generados por la producción de 1 kg de gas natural de la Tabla **A- 19** y se multiplican por los factores respectivos de la Tabla A- 25, por ejemplo: del refrigerante CFC-11 se emiten 3,86E-13 kg/kg de gas natural producido, este valor se multiplica por el potencial de calentamiento global del CFC-11, que es 475 kg CO<sub>2</sub>-eq /kg.

$$3.86 * 10^{-13} \text{ kg} * \frac{4750 \text{ kg CO}_2\text{-eq}}{\text{kg}} = 1.83 * 10^{-9} \text{ kg CO}_2\text{-eq}$$

De la misma manera se realiza para los demás Gases de Efecto Invernadero, de lo cual se obtiene lo siguiente:

Flujo	Valor (kg/kg gas natural)	kg CO <sub>2</sub> -eq /kg gas natural
CFC-11	3.86E-13	1.83E-09
CFC-113	3.01E-11	1.84E-07
CFC-12	4.68E-10	5.10E-06
Cloroformo	4.34E-09	1.30E-07
Dióxido de carbono, biogénico	8.89E-02	8.89E-02
Dióxido de carbono, fósil	1.98E-01	1.98E-01
Dióxido de carbono, transformación de la tierra	2.52E-04	2.52E-04
HFC-134 <sup>a</sup>	2.17E-06	3.11E-03
CFC-114	5.38E-08	5.38E-04
Halón 1211	5.60E-08	1.06E-04
Halón 1301	6.29E-08	4.49E-04
HCC-30	1.84E-09	1.60E-08
HCFC-21	2.38E-13	4.99E-11
HCFC-22	4.37E-07	7.91E-04
Hexafluoruro de azufre	4.14E-07	9.44E-03
HFC-116	2.16E-06	2.64E-02
HFC-152 <sup>a</sup>	2.72E-09	3.38E-07
HFC-23	7.56E-11	1.12E-06
Metano, biogénico	2.03E-04	5.07E-03
CFC-12	4.68E-10	5.10E-06
Metano, fósil	4.58E-03	1.15E-01
R-10	9.03E-08	1.26E-04
R-14	1.94E-06	1.44E-02
Monóxido de carbono, biogénico	7.16E-04	1.13E-03
Monóxido de carbono, fósil	1.62E-03	2.54E-03
Monóxido de Dinitrógeno	2.76E-04	8.23E-02
R-40	3.92E-09	5.09E-08
<b>Total emisiones kg CO<sub>2</sub>-eq /kg gas natural</b>		<b>0.548</b>

Ahora, el total de las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq se debe multiplicar por la economía del combustible del vehículo. En el caso de los vehículos a gas natural se toman de la Tabla 2-1 los valores en km/m<sup>3</sup> y se llevan a kg/km utilizando la densidad.

Por ejemplo para el Taxi GNV, tenemos:

$$\frac{7.2 \text{ km}}{\text{m}^3} * \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} * \frac{1 \text{ L GNV}}{0.517 \text{ g}} * \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ kg}} = \frac{13.9 \text{ km}}{\text{kg}}$$

Para el cálculo de las emisiones del ACV, necesitamos el valor inverso del resultado anterior:

$$\frac{1}{13.9 \text{ km/kg}} = 0.0719 \text{ kg/km}$$

<b>Economía Combustible</b>		
<b>Vehículo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Taxi GNV	0.0719	kg/km
Bus GNV 16-19 pasajeros	0.3119	kg/km
Bus GN 120 pasajeros	1.9342	kg/km

$$\frac{0.548 \text{ kg CO}_2\text{-eq}}{\text{kg gas natural}} * 0.0719 \frac{\text{kg gas natural}}{\text{km}} = \frac{0.0394 \text{ kg CO}_2\text{-eq}}{\text{km}}$$

Del mismo modo se realiza con los demás vehículos

<b>Emisiones GEI producción gas natural</b>		
<b>Vehículo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Taxi GNV	0.0394	kg CO <sub>2</sub> -eq /km
Bus GNV 16-19 pasajeros	0.1709	kg CO <sub>2</sub> -eq /km
Bus GN 120 pasajeros	1.0599	Kg CO <sub>2</sub> -eq /km

El valor anterior corresponde a las emisiones de la producción del combustible que, para los vehículos tomados, corresponde a gas natural.

Ahora, para las emisiones de la fase de operación se toman los factores de emisión de CO<sub>2</sub> y CO de la Tabla 2-1, los cuales se deben convertir de gramos a kilogramos.

Vehículo	Emisiones operación vehículos		
	CO	CO <sub>2</sub>	Unidad
Taxi GNV	0.013	0.241	kg/km
Bus GNV 16-19 pasajeros	0.02012	0.272	kg/km
Bus GN 120 pasajeros	0.001785	1.889	kg/km

Posteriormente, las emisiones de CO se convierten a emisiones de CO<sub>2</sub>-eq utilizando el factor de conversión de 1,5714 kg CO<sub>2</sub>-eq /kg de CO (Tabla A- 25).

$$\frac{0.013 \text{ kg de CO}}{\text{km}} * \frac{1.57 \text{ kg CO}_2\text{-eq}}{\text{kg de CO}} = 0.0204 \text{ kg CO}_2\text{-eq}$$

Vehículo	Emisiones GEI operación vehículos provenientes del CO	
	Valor	Unidad
Taxi GNV	0.0204	kg CO <sub>2</sub> -eq /km
Bus GNV 16-19 pasajeros	0.0316	kg CO <sub>2</sub> -eq /km
Bus GN 120 pasajeros	0.0028	Kg CO <sub>2</sub> -eq /km

El valor obtenido se suma con las emisiones de CO<sub>2</sub> de la operación del vehículo.

Vehículo	Emisiones GEI operación vehículos	
	Valor	Unidad
Taxi GNV	0.261	kg CO <sub>2</sub> -eq /km
Bus GNV 16-19 pasajeros	0.304	kg CO <sub>2</sub> -eq /km
Bus GN 120 pasajeros	1.892	Kg CO <sub>2</sub> -eq /km

Por último, para obtener la emisión total del ciclo de vida para los Gases de Efecto Invernadero por kilómetro recorrido en el vehículo, se suman los valores de la emisión de la fase de producción de la fuente energética (gas natural) y la fase de operación del vehículo. Tomando como ejemplo el taxi a gas natural, sería:

$$\frac{0.0394 \text{ kg } CO_{2-eq}}{\text{km}} + \frac{0.261 \text{ kg } CO_{2-eq}}{\text{km}} = \frac{0.301 \text{ kg } CO_{2-eq}}{\text{km}}$$

## Ejemplo 2

En este ejemplo se presenta el cálculo de las emisiones generadas en la categoría cambio climático (emisiones de CO<sub>2</sub>-eq) para la generación y el uso de la electricidad.

Se toman los Gases de Efecto Invernadero generados por la producción de 1 kWh de electricidad de la Tabla A- 20, la Tabla A- 21, la Tabla A- 23 y la Tabla A- 24, y se multiplican por los factores respectivos de la Tabla A- 25. Por ejemplo: del Hexafluoruro de azufre se emiten 1.745E-09 kg/kWh por la electricidad producida a partir de carbón y 3.945E-08 kg/kWh por la electricidad transportada, ya que este es el valor total del transporte. Este se desagrega por tipo de fuente y se debe ponderar por la contribución de la energía hidroeléctrica, que es del 0.92, y de carbón, de 0.08. El resultado se multiplica por el potencial de calentamiento global del Hexafluoruro de azufre, que es 22 800 kg CO<sub>2</sub>-eq /kg.

Producción de Electricidad a partir de carbón:

$$(1.745 \times 10^{-9}) \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} * \frac{22800 \text{ kg } CO_{2-eq}}{\text{kg}} = 3.98 \times 10^{-5} \frac{\text{kg } CO_{2-eq}}{\text{kWh}}$$

Producción de Electricidad hidroeléctrica

No tiene aporte de hexafluoruro de azufre.

Los anteriores cálculos se realizan por separado para la producción de electricidad a partir de carbón y la hidroeléctrica.

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero/producción de electricidad a partir de carbón:

Flujo	Valor (kg/ de electricidad)	kg CO <sub>2</sub> -eq /kWh de electricidad
CFC-11	1.04E-15	5.0E-12
CFC-113	5.58E-14	3.4E-10
CFC-114	2.19E-10	2.2E-06
CFC-12	8.43E-13	9.2E-09
Cloroformo	7.32E-12	2.2E-10
Dióxido de carbono, biogénico	6.16E-04	6.2E-04
Dióxido de carbono, transformación de la tierra	1.56E-06	1.6E-06
Dióxido de carbono, fósil	1.02E+00	1.0E+00
Disulfuro de carbono	1.36E-07	
Halón 1211	1.11E-10	2.1E-07
Halón 1301	3.66E-10	2.6E-06
HCC-30	1.00E-12	8.7E-12
HCFC-140	4.94E-14	
HCFC-22	5.18E-10	9.4E-07
Hexafluoruro de azufre	1.74E-09	4.0E-05
HFC-116	1.09E-09	1.3E-05
HFC-134 <sup>a</sup>	1.29E-11	1.8E-08
HFC-152 <sup>a</sup>	1.60E-11	2.0E-09
HFC-23	2.04E-13	3.0E-09
Metano, biogénico	1.97E-06	4.9E-05
Metano, fósil	3.26E-03	8.1E-02
Monóxido de carbono, biogénico	3.81E-06	6.0E-06
Monóxido de carbono, fósil	2.38E-04	3.7E-04
Monóxido de Dinitrógeno	1.18E-05	3.5E-03
R-10	2.44E-10	3.4E-07
R-14	9.79E-09	7.2E-05
R-40	1.32E-12	1.7E-11
<b>Total emisiones kg CO<sub>2</sub>-eq /kWh producción de electricidad a partir de carbón</b>		<b>1.1</b>

El resultado se debe ponderar por la contribución de la energía eléctrica a la red, que es del 8 % para el carbón:

$$\frac{1.1 \text{ kg } CO_{2\text{-eq}}}{kWh} * 0.08 = 8.82 \times 10^{-2} \frac{\text{kg } CO_{2\text{-eq}}}{kWh}$$

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero/producción de electricidad hidroeléctrica:

Flujo	Valor (kg/ de electricidad)	kg CO2-eq /kWh de electricidad
Dióxido de carbono, transformación de la tierra	0.10404	0.104
Metano, biogénico	0.00197	0.049
<b>Total emisiones kg CO2-eq /kWh producción de electricidad hidroeléctrica</b>		<b>0.153</b>

El resultado se debe ponderar por la contribución de la energía eléctrica a la red, que es del 92 % para la hidrogenación:

$$\frac{0.153 \text{ kg } CO_{2-eq}}{kWh} * 0.92 = 1.41 \times 10^{-1} \frac{\text{kg } CO_{2-eq}}{kWh}$$

Emisiones de Gases de Efecto Invernadero/transporte y distribución de electricidad:

Flujo	Valor (kg/ de electricidad)	kg CO2-eq /kWh de electricidad
Hexafluoruro de azufre	3.94E-08	8.99E-04
Monóxido de Dinitrógeno	5.00E-06	1.49E-03
<b>Total emisiones kg CO2-eq /kWh transporte y distribución de electricidad</b>		<b>2.39E-03</b>

Retomando el ejemplo del hexafluoruro de azufre:

Transporte y distribución de electricidad a partir de carbón:

$$(0.08 * 3.945 \times 10^{-8}) \frac{\text{kg}}{kWh} * \frac{22800 \text{ kg } CO_{2-eq}}{\text{kg}} = 7.20 \times 10^{-5} \frac{\text{kg } CO_{2-eq}}{kWh}$$

Transporte y distribución de electricidad hidroeléctrica:

$$(0.92 * 3.945 \times 10^{-8}) \frac{\text{kg}}{kWh} * \frac{22800 \text{ kg } CO_{2-eq}}{\text{kg}} = 8.28 \times 10^{-4} \frac{\text{kg } CO_{2-eq}}{kWh}$$

Al sumar los resultados se obtiene:

Hidroeléctrica	2.20E-03	<b>kg CO<sub>2</sub>-eq /kWh transporte y distribución de electricidad</b>
A partir de carbón	1.91E-04	<b>kg CO<sub>2</sub>-eq /kWh transporte y distribución de electricidad</b>

Al sumar por separado los resultados para la generación de electricidad hidroeléctrica y a partir de carbón se tiene que:

Hidroeléctrica	9.04E-02	<b>kg CO<sub>2</sub>-eq /kWh de electricidad</b>
A partir de carbón	1.41E-01	<b>kg CO<sub>2</sub>-eq /kWh de electricidad</b>

Ahora, el total de las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq se debe multiplicar por la economía del combustible del vehículo. En el caso de los vehículos eléctricos, estos son los valores de la Tabla 2-1, que se encuentran en km/kWh y se pasan a kWh/km.

<b>Economía del Combustible</b>		
<b>Vehículo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidad</b>
Automóvil eléctrico	0.2	kWh/km
BTR <i>TransMilenio</i> Eléctrico	2.14	kWh/km

Tomando como muestra el automóvil eléctrico:

Aporte de energía a partir de carbón:

$$\frac{9.04 \times 10^{-2} \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}}{\text{kWh}} * 0.2 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} = \frac{0.03513 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}}{\text{km}}$$

Aporte de energía hidroeléctrica:

$$\frac{1.41 \times 10^{-1} \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}}{\text{kWh}} * 0.2 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} = \frac{0.0282 \text{ kg CO}_{2\text{-eq}}}{\text{km}}$$



Del mismo modo, se realiza con BTR *TransMilenio* Eléctrico:

Vehículo	Emisiones de GEI producción electricidad		
	Energía a partir de carbón	Energía hidroeléctrica	Unidad
Automóvil eléctrico	1.81E-02	2.82E-02	kg CO <sub>2</sub> -eq /km
BTR <i>TransMilenio</i> Eléctrico	1.93E-01	3.02E-01	kg CO <sub>2</sub> -eq /km

El valor anterior corresponde a las emisiones de la producción de la fuente energética, que para los vehículos tomados, es la electricidad. Ahora, las emisiones de la fase de operación, como se muestra en la Tabla 2-1, no se generan. Por tanto, las emisiones de kg CO<sub>2</sub>-eq /km corresponden a la suma de la contribución por generación de energía eléctrica hidráulica y a partir de carbón, mostradas a continuación para el automóvil eléctrico:

$$\frac{0.0181 \text{ kg } CO_{2\text{-eq}}}{\text{km}} + \frac{0.0282 \text{ kg } CO_{2\text{-eq}}}{\text{km}} = \frac{0.046 \text{ kg } CO_{2\text{-eq}}}{\text{km}}$$

Vehículo	Emisiones GEI/electricidad consumida por el vehículo	
	Valor	Unidad
Automóvil eléctrico	0.046	kg CO <sub>2</sub> -eq /km
BTR <i>TransMilenio</i> Eléctrico	0.50	kg CO <sub>2</sub> -eq /km



## **B. Anexo: Módulos para la producción de combustibles fósiles y electricidad en OpenLCA®**

Los datos de inventario para el módulo de producción de gasolina, diésel, gas natural y electricidad se toman de la base datos ecoinvent 2.2 [54].

En esta sección se hace una comparación entre las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq utilizando los datos de inventario de la producción de gasolina y diésel para Europa, y las reportadas en Colombia por Ecopetrol S.A. [56].

Adicionalmente, se realiza una comparación entre las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq del mix de generación de electricidad de Brasil y el modulo adaptado para Colombia en OpenLCA®.

### **B.1. Comparación de resultados de la producción de combustibles fósiles en Europa y Colombia**

Categorías de impacto:

Cambio climático - Potencial de Calentamiento Global (GWP)

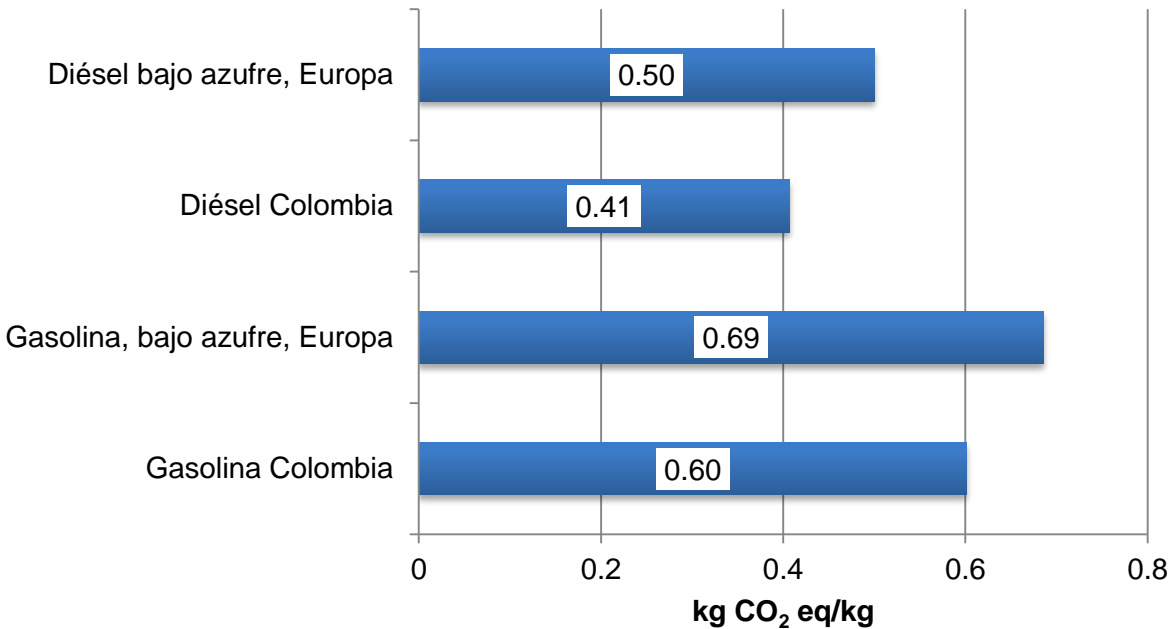
Método de evaluación de impactos: IPCC 2007

Se encuentra que las emisiones de la producción de gasolina y diésel en Colombia son similares a las del proceso creado como referencia para Europa, cuyos datos fueron descargados de ecoinvent 2.2. Las emisiones de Colombia fueron inferiores a las de la refinería creada como promedio de Europa (Figura B- 1): alrededor de un 12 % para la gasolina y 18 % para el diésel.

En este caso se debe considerar que la mayor contribución a las emisiones de CO<sub>2</sub>-eq ocurre en la fase de operación del vehículo. Por ende, los factores de emisión de esta fase

tendrán una mayor repercusión sobre el resultado final que las emisiones en la etapa de producción del combustible fósil.

**Figura B- 1:** Potencial de Calentamiento Global (GWP 100<sup>a</sup>) (kg CO<sub>2</sub>-eq /kg) / producción de combustibles fósiles (gasolina y diésel) Europa y Colombia. (Fuente: esta investigación). Los datos de Colombia son reportados por Ecopetrol S.A [56].



## B.2. Creación de un mix eléctrico para Colombia

### ▪ Generación de energía eléctrica en Colombia

En el reporte mensual de junio de 2014 de generación de energía eléctrica en Colombia, se indica que en el país se registró una capacidad total instalada de 14 619.7 MW en la producción de energía eléctrica (Subdirección de Energía Eléctrica, 2014) [57]; la contribución por tipo de tecnología se muestra en la Tabla B-1. Por parte de los agentes distribuidores, se encuentra que Empresas Públicas de Medellín (EPM) tiene la mayor participación en el mercado con cerca del 22.2 %, seguida por Emgesa con 20.6 % e Isagen con 14.9 %; el porcentaje restante está distribuido entre otros actores como Gecelca, AES Chivor, EPSA y Celsia [57].

De modo particular se observa que la región conformada por Bogotá D.C., Cundinamarca, Guaviare y Meta tiene una contribución del 92 % (2 480.2 MW) de energía hidráulica y un 8 % de energía térmica a carbón (225 MW).

**Tabla B- 1:** Capacidad instalada por tecnología [57].

Tecnología	Potencia (MW)
Hidráulica	9913.1
Térmica gas	3909.8
Térmica carbón	701
Biomasa	52.8
Otras	43
<b>Total</b>	<b>14619.7</b>

Por otro lado, con respecto a las emisiones de Gases de Efecto Invernadero, la Subdirección de Energía Eléctrica (2014) [57] muestra los siguientes datos:

**Tabla B- 2:** Emisiones GEI/generación eléctrica en Colombia (CO<sub>2</sub> equivalente) [57].

Tipo de planta	Energía Neta Generada (MWh)	Consumo de Combustible (MMBTU)	Emisiones (ton. CO <sub>2</sub> /mes)	Factor emisión (kg CO <sub>2</sub> -eq/ kWh)
Gas Natural	1 293 500	11 035 500	641 547	0.4960
Carbón	492 300	4 557 100	467 613	0.9499
Combustóleo (FO6)		3100		0.7440
ACPM (FO2)	8 200	73900	6101	0
Agua	3 082 900	0	0	0
Otras	351 800	0	0	0
<b>Total</b>	<b>5 228 700</b>	<b>15 669 600</b>	<b>1 115 261</b>	<b>0.2133</b>

Energía Neta Generada (MWh/mes)	5 228 700.0
Emisiones Generadas (ton CO <sub>2</sub> /mes)	1 115 261.0
Factor de Emisión (ton CO <sub>2</sub> /MWh)	0.2133

Como se puede observar en la tabla anterior, el factor de emisión está basado en las emisiones asociadas a la quema de combustibles y no se tienen en cuenta las emisiones asociadas a los embalses. En este aspecto se debe destacar que la generación de energía hidroeléctrica posee emisiones de Gases de Efecto Invernadero, principalmente por el

cambio de usos del suelo para la creación del embalse y la producción de metano de origen biogénico dentro del reservorio [64]–[67]; estas emisiones son consideradas dentro de la base de datos ecoinvent 2.2.

- **Sistema interconectado brasileño**

Según Dale *et al.* (2013) [68], en Brasil el 64.6 % de la electricidad es generada por plantas hidroeléctricas; las centrales térmicas, principalmente de gas natural, carbón, fisión nuclear y biomasa, representan el 28 %; y el porcentaje restante (6 % aproximadamente) es importado, principalmente de Paraguay.

En la siguiente tabla se muestra el porcentaje de contribución por tipo de fuente a la generación de electricidad en el sistema interconectado brasileño.

**Tabla B- 3:** Contribución por fuente a la generación de electricidad en el sistema interconectado brasileño [69].

Fuente	Porcentaje*
Biomasa	8.76 %
Eólica	2.72 %
Fósil Carbón Mineral	2.58 %
Fósil Gas natural	9.02 %
Fósil Derivados de petróleo	6.42 %
Fósil otros	0.11 %
Hídrica	63.10 %
Nuclear	1.43 %
Solar	0.01 %
Importaciones	5.86 %

\*Producción total de energía: 139 408.33 GWh

Finalmente, se debe mencionar que en la base de datos ecoinvent 2.2 se encuentra un módulo para la producción de electricidad en Brasil, el cual puede ser adaptado y modificado a las condiciones de Colombia.

- **Creación de un mix eléctrico para Colombia en OpenLCA®**

Teniendo en cuenta los datos de la Subdirección de Energía Eléctrica (2014) [57], se crean dos procesos para la generación de electricidad en Colombia. Los datos para la producción de energía eléctrica según tipo de fuente se resumen a continuación.

- El primero toma los procesos de ecoinvent 2.2 de Brasil y se introducen las contribuciones según el tipo de fuente para Colombia. A los procesos para los cuales no se tenga información se les asigna el valor de cero. En el caso de la cogeneración con bagazo de caña, se toma el proceso ya creado para la producción de etanol en Colombia, donde la electricidad que es vendida a la red está como subproducto.
- El segundo proceso se crea únicamente para la generación de electricidad en Bogotá, por tanto este solo asigna valores a la generación hidroeléctrica y a la generación térmica con carbón.

- **Mix eléctrico para Colombia y Bogotá usando OpenLCA**

Se utiliza como herramienta de cálculo el *software* OpenLCA versión 1.4: los datos de inventario son tomados de la Subdirección de Energía Eléctrica (2014) [57] y la base de datos ecoinvent 2.2.

Unidad funcional:

$$\frac{kg\ CO_2\ eq\ \text{ó}\ MJ\ eq}{kWh}$$

Categorías de impacto:

Cambio climático - Potencial de Calentamiento Global (GWP)

Consumo Energético - *Cumulative Energy Demand*

Método de evaluación de impactos: IPCC 2007 y *Cumulative Energy Demand*

- **Comparación de resultados de mix eléctrico para Colombia en OpenLCA**

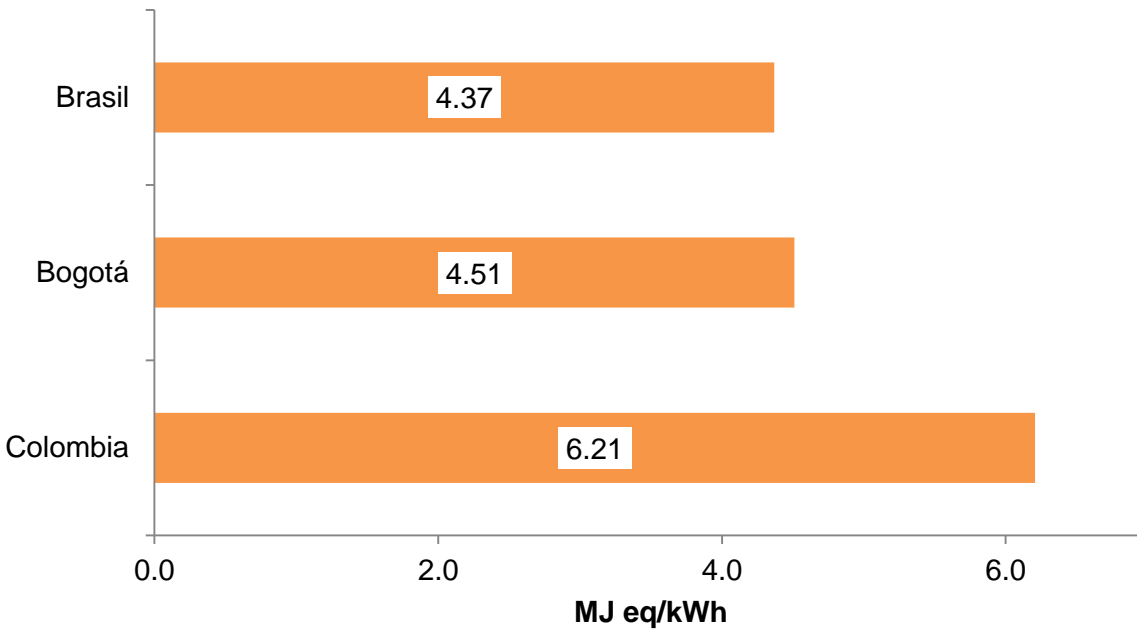
El factor de emisión de kg CO<sub>2</sub>-eq/ kWh promedio hallado para Colombia (0.3294) es un 57.9 % superior al de Brasil (0.2086); con respecto a la producción de electricidad para Bogotá (0.2303), el factor es inferior al promedio nacional en un 30.1 %. Estos resultados también se contrastan con el factor de emisión reportado para Colombia por la

Subdirección de Energía Eléctrica (2014) [57] de 0.2133 kg CO<sub>2</sub>-eq/ kWh, el cual es más cercano al de Brasil, con una desviación del -2.2 %. Pese a esta semejanza, se debe recordar que el factor de Colombia no tiene en cuenta las emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la producción hidroeléctrica.

En relación a la Demanda Acumulada de Energía, se obtiene un comportamiento análogo al potencial de calentamiento global, donde el mix eléctrico modificado con datos de Colombia tiene un consumo de energía mayor, 29.6 % superior al de Brasil, y la del mix eléctrico para Bogotá es más cercano, con una diferencia del 3.2 %.

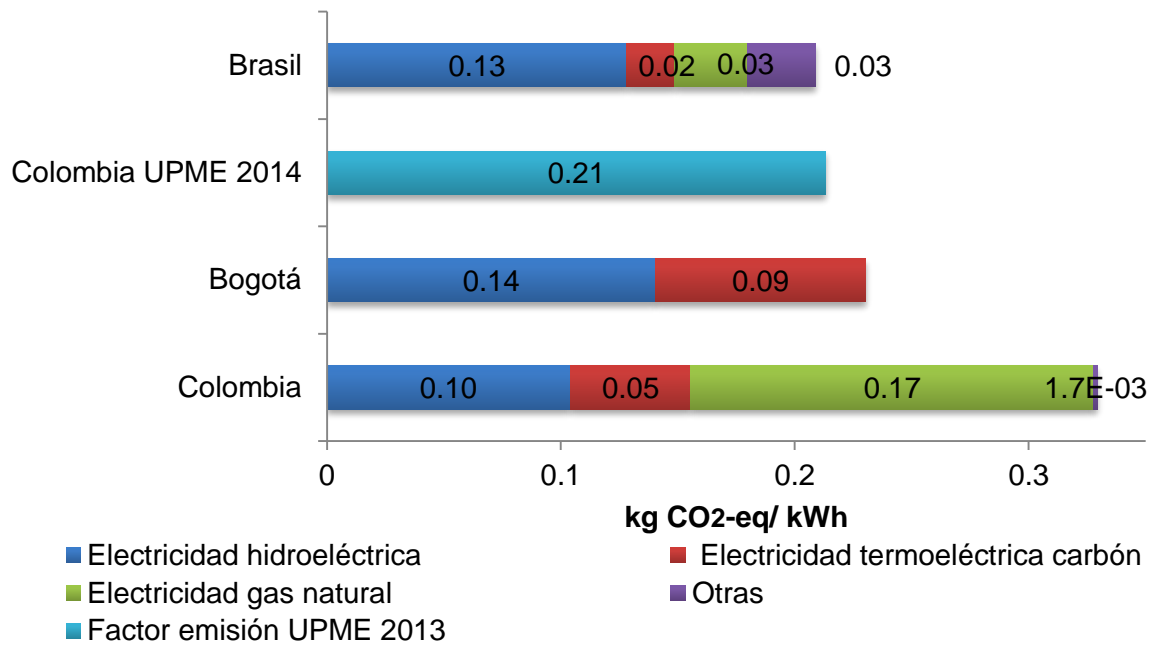
Los resultados anteriores se pueden observar en las siguientes gráficas. Se debe recordar que la agrupación *otras* está conformada, entre otros, por la generación con biomasa y energía eólica.

**Figura B- 2:** Demanda Acumulada de Energía (MJ eq/ kWh), mix eléctrico para Colombia, Bogotá y Brasil. (Fuente: esta investigación)





**Figura B- 3:** Factor de emisión (kg CO<sub>2</sub>-eq/ kWh) mix eléctrico para Colombia, Bogotá y Brasil. (Fuente: esta investigación)





## C. Anexo: Composición de la flota vehicular para el transporte de pasajeros en Bogotá

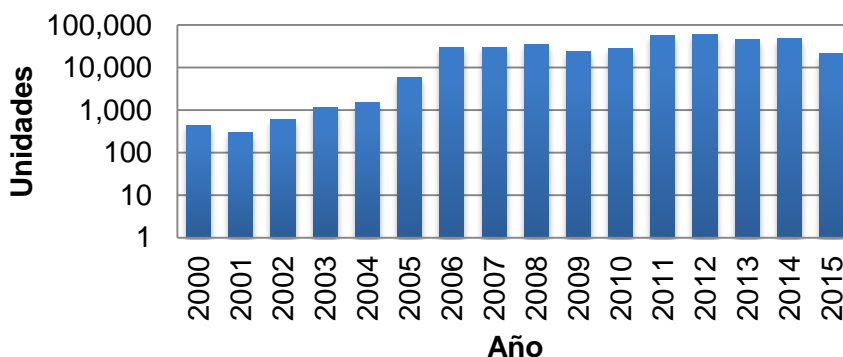
En la caracterización de la flota vehicular para el transporte de pasajeros de Bogotá se tuvo en cuenta el año modelo, el tipo de combustible y la marca. Los vehículos fueron clasificados en tres grupos: vehículos livianos (motocicletas, automóviles y taxis), medianos (microbuses) y pesados (busetas, buses tradicionales y articulados de *TransMilenio*).

### C.1. Vehículos livianos

#### ▪ Motocicletas

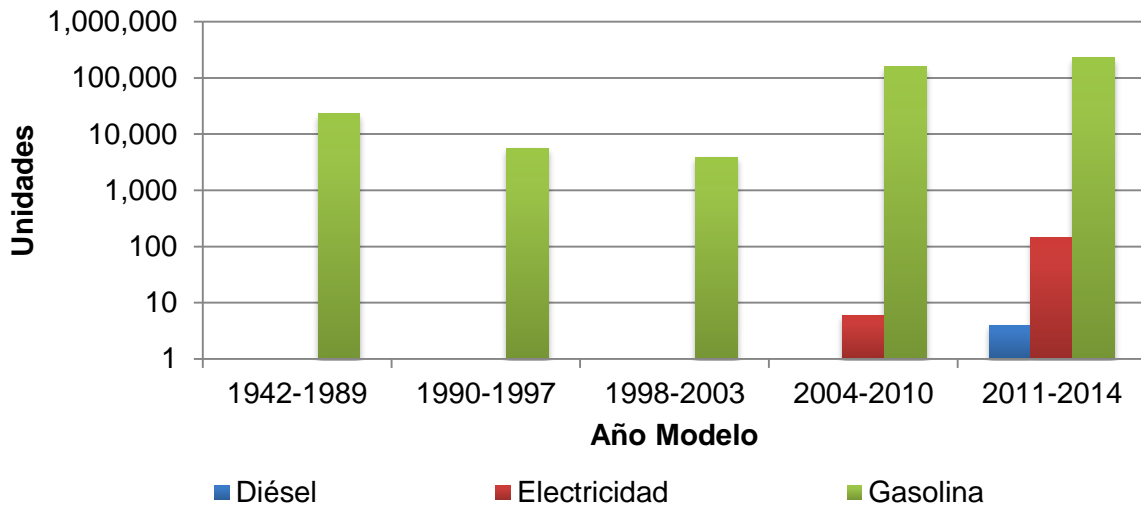
Las motocicletas activas registradas en la ciudad son 422 308, de las cuales el 1.4 % es de servicio oficial y el 98.6 %, de servicio particular. Se encuentran registros desde 1942, sin embargo, se observa un pico de registros a partir del año 2006, por lo que el 85.5 % de las motocicletas activas corresponden a registros posteriores a este año. En la siguiente gráfica se muestran los registros a partir del año 2000.

**Figura C-1:** Número de motocicletas según el año modelo desde el año 2000 (Fuente: esta investigación).



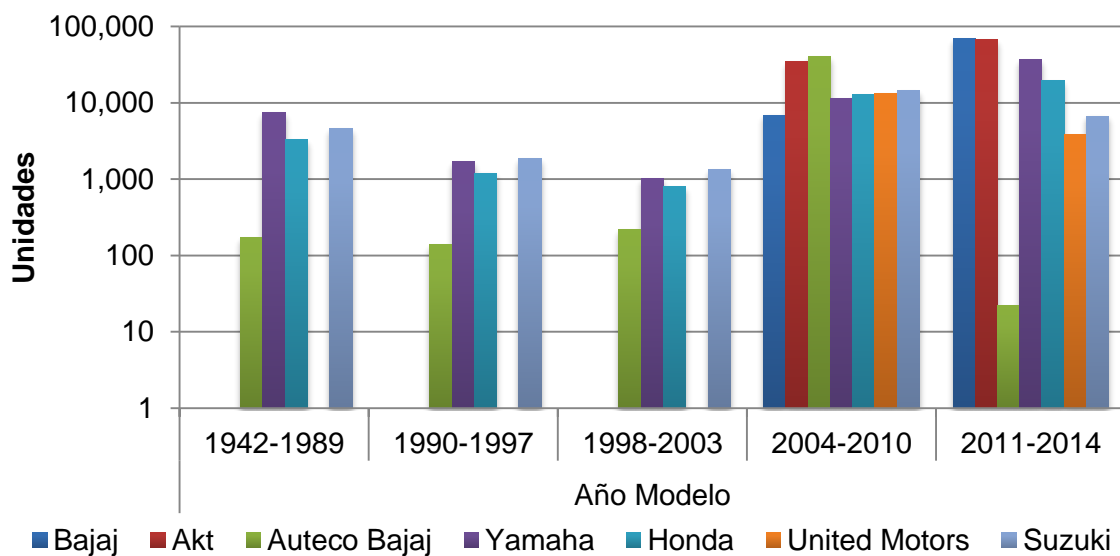
Con respecto al tipo de combustible usado, predomina la gasolina con el 99.96 % (Figura C-2).

**Figura C-2:** Tipo de combustible usado por las motocicletas según el año modelo (Fuente: esta investigación).



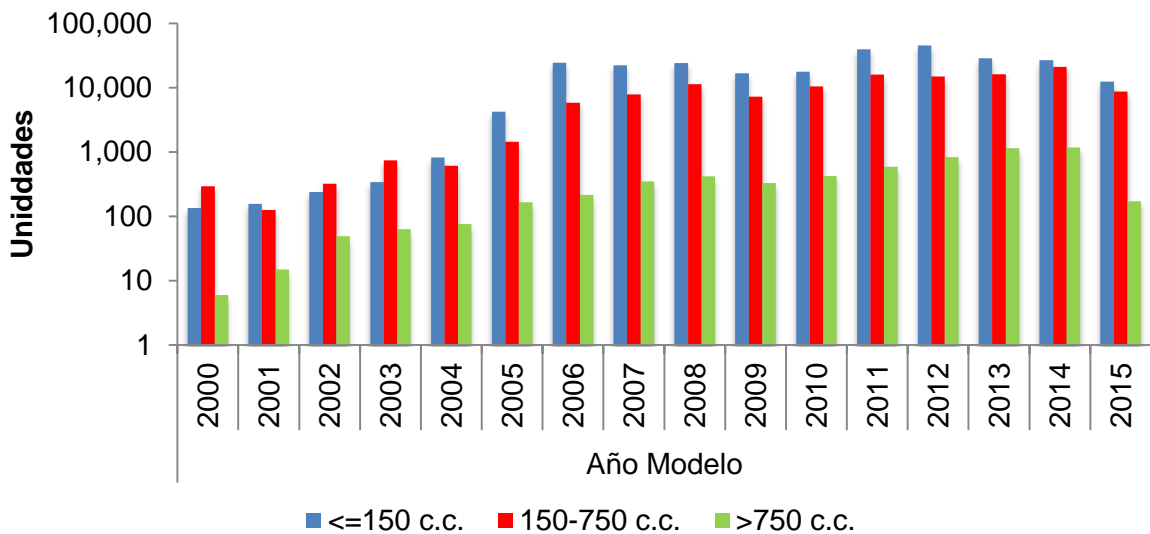
Se encuentran seis marcas, con el 85.3 % de la flota de motocicletas en la ciudad. La distribución de estas marcas por año modelo se muestran en la siguiente gráfica.

**Figura C-3:** Marcas representativas de motocicletas según el año modelo (Fuente: esta investigación).



Predominan las cilindradas menores a 150 cm<sup>3</sup> (67.3 %), mientras que los mayores a 150 cm<sup>3</sup> corresponden al 32.7 %. En la siguiente gráfica se muestran las cilindradas de las motocicletas a partir del año 2000.

**Figura C-4:** Distribución del cilindrada en motocicletas según el año modelo (Fuente: esta investigación).



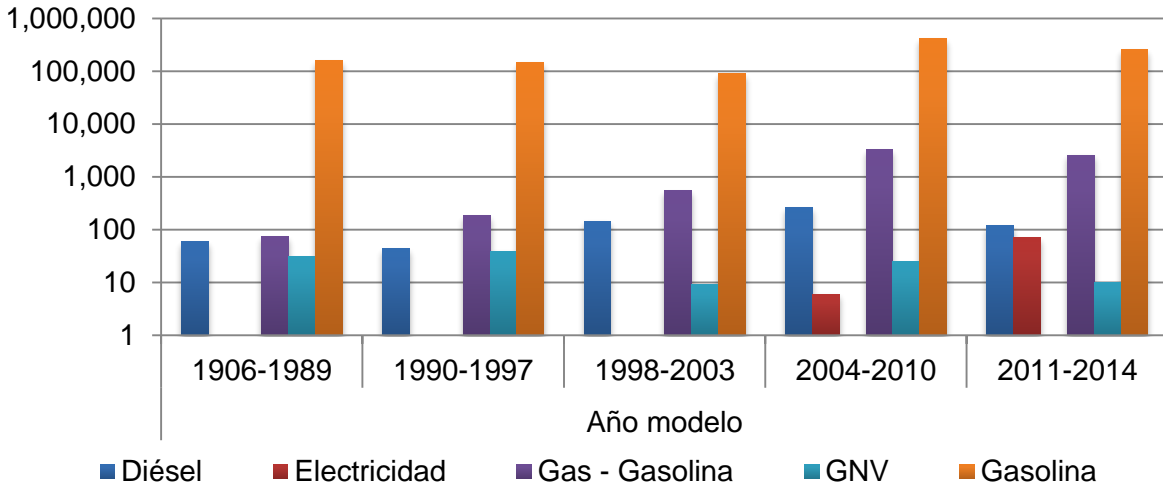
Debido a que en Bogotá a partir de junio de 2012 se prohibió matricular motocicletas de 2 tiempos, en el presente estudio se consideraron las motocicletas de 4 tiempos únicamente, aunque en la base de datos proporcionada por el registro distrital automotor no se hace distinción entre motocicletas 2T o 4T. Para evaluar las emisiones en la fase de operación y consumo de combustible de este tipo de vehículos, se tuvieron en cuenta las marcas de motocicletas más representativas de la ciudad (Bajaj, Akt, Yamaha y Honda), las cuales corresponden a las marcas evaluadas por el Grupo de Investigación en Biocombustibles, Energía, y Protección del Medio Ambiente, del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, a cuyos datos se tuvo acceso.

#### ▪ Automóviles

A diciembre de 2014 se halla un total de 1 077 306 automóviles activos en Bogotá, con registros desde 1906. El 63 % corresponde a modelos de 2011 en adelante; el 8.4 %, a modelos entre 2004 y 2010; el 13.4 %, a modelos entre 1990 y 1997; y el 15 %, a modelos anteriores a 1990. Los automóviles se clasifican por tipo de servicio: particular (94.9 %), público (4.9 %) y oficial (0.2 %). En este caso los automóviles públicos se refieren a taxis.

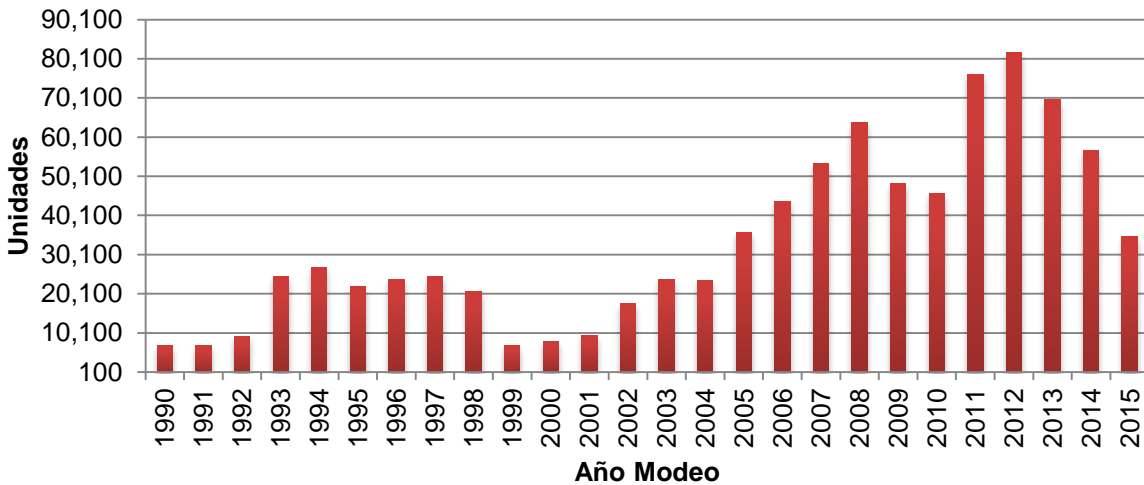
El 99.3 % de los vehículos opera con gasolina, el 0.6 % opera con gas-gasolina y el porcentaje restante se distribuye entre diésel, electricidad y gas natural vehicular (GNV). Se debe mencionar que la ciudad cuenta con 43 taxis eléctricos modelo 2012.

**Figura C-5:** Tipo de combustible de los automóviles según el año modelo (Fuente: esta investigación).



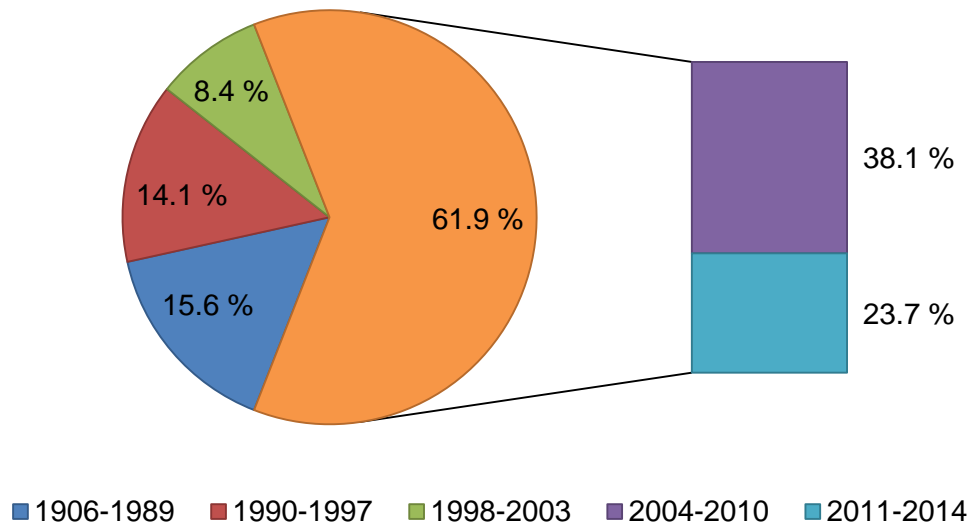
- Automóvil Particular

**Figura C-6:** Número de automóviles particulares según el año modelo desde el año 1990 (Fuente: esta investigación).



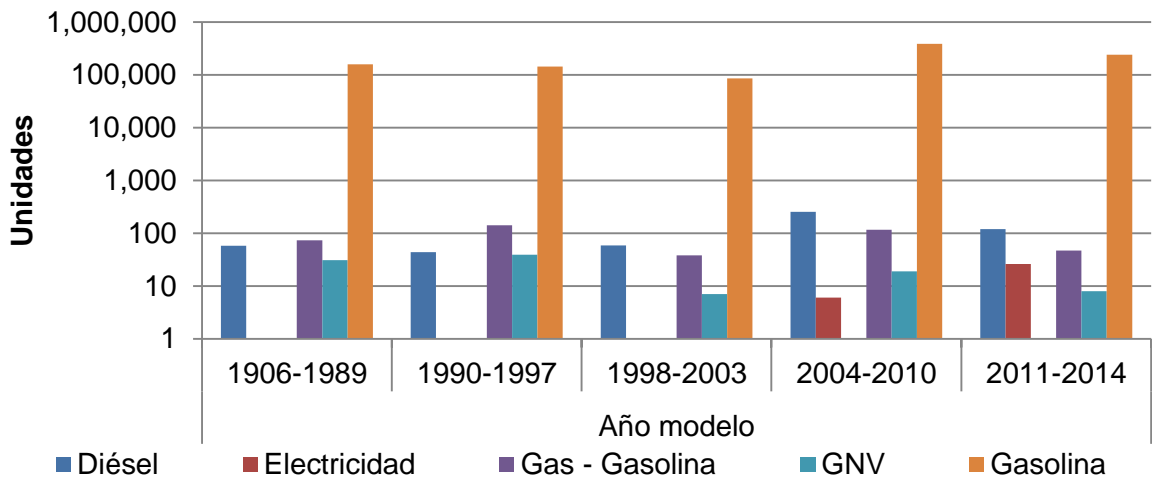
La siguiente gráfica muestra la distribución de los automóviles particulares según el año del modelo.

**Figura C-7:** Distribución de automóviles particulares según el año modelo (Fuente: esta investigación).



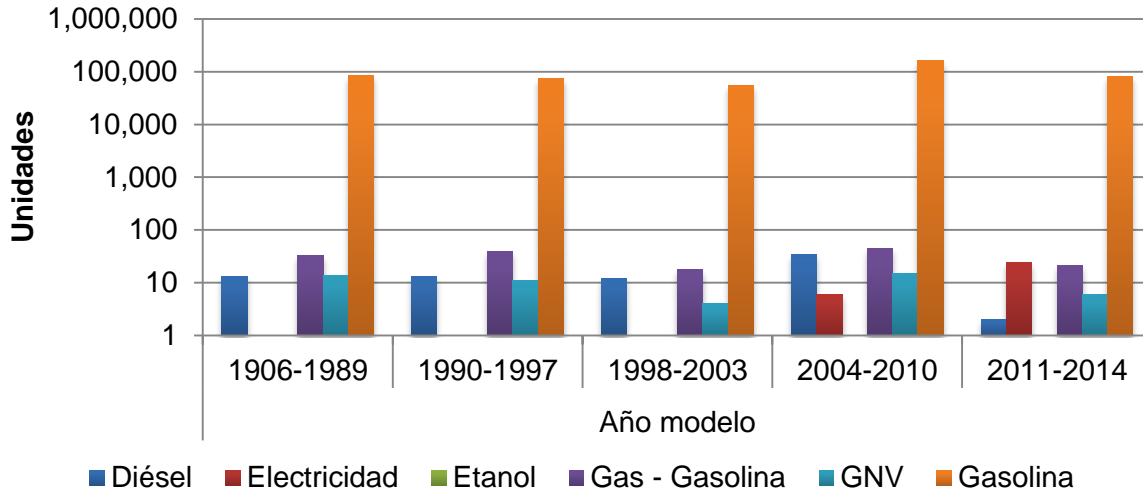
El 99.9 % de los automóviles particulares opera con gasolina, el porcentaje restante se distribuye entre diésel, electricidad, gas-gasolina y gas natural vehicular.

**Figura C-8:** Distribución de automóviles particulares según el tipo de combustible por año modelo (Fuente: esta investigación).

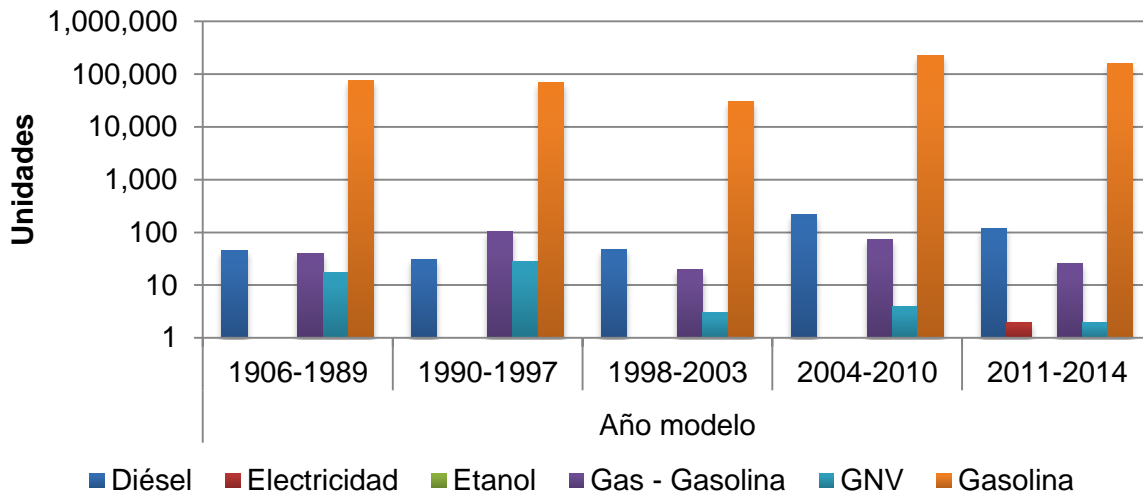


El 47.1 % de los automóviles son de cilindrada menor a 1400 cm<sup>3</sup>, de los cuales el 91.3 % corresponde a automóviles particulares.

**Figura C-9:** Distribución de automóviles particulares con cilindrada menor a 1400 cm<sup>3</sup> según el tipo de combustible por año del modelo (Fuente: esta investigación).

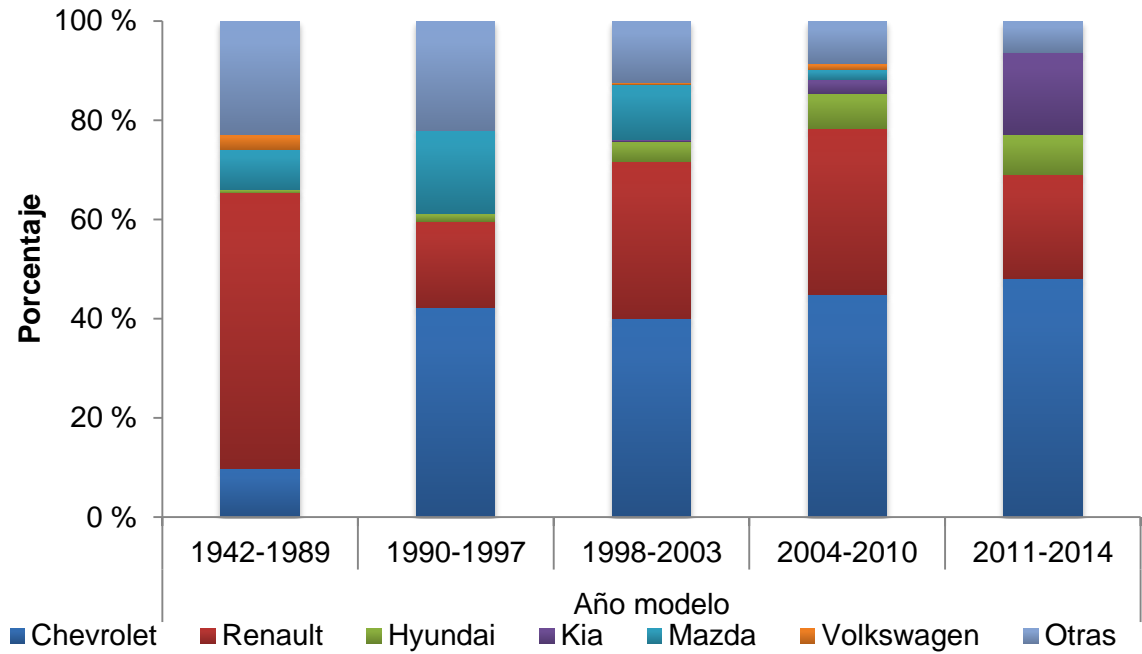


**Figura C-10:** Distribución de automóviles particulares con cilindrada mayor a 1400 cm<sup>3</sup> según el tipo de combustible por año del modelo (Fuente: esta investigación).

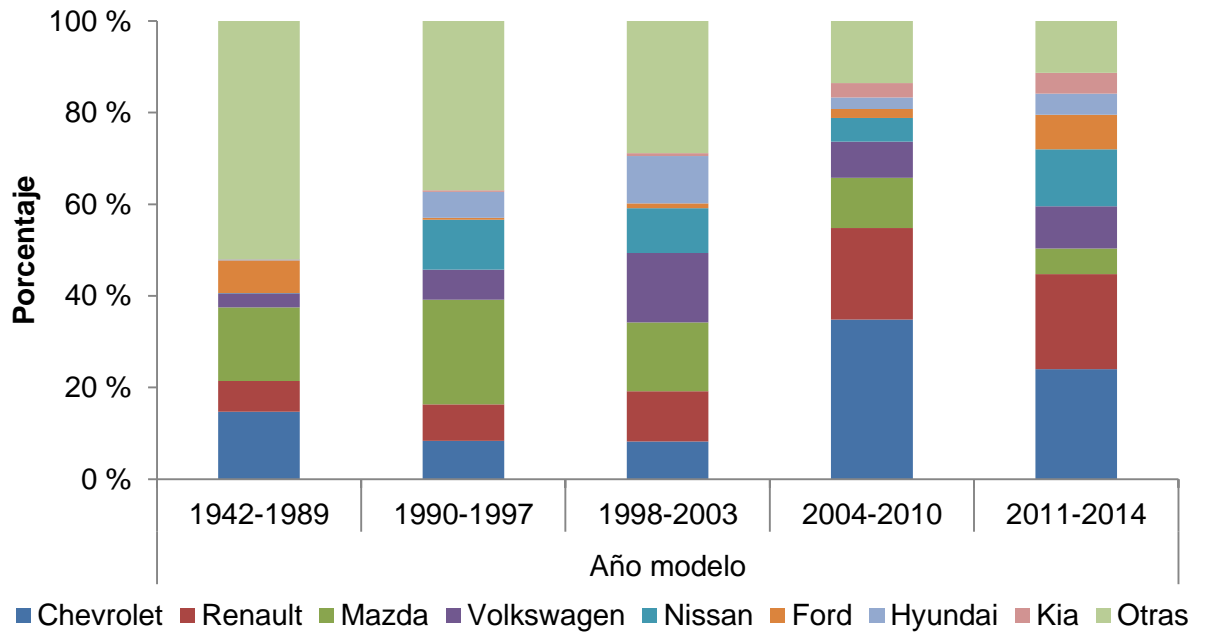




**Figura C-11:** Distribución de automóviles particulares con cilindrada menor a 1400 cm<sup>3</sup> según marca por año del modelo (Fuente: esta investigación).



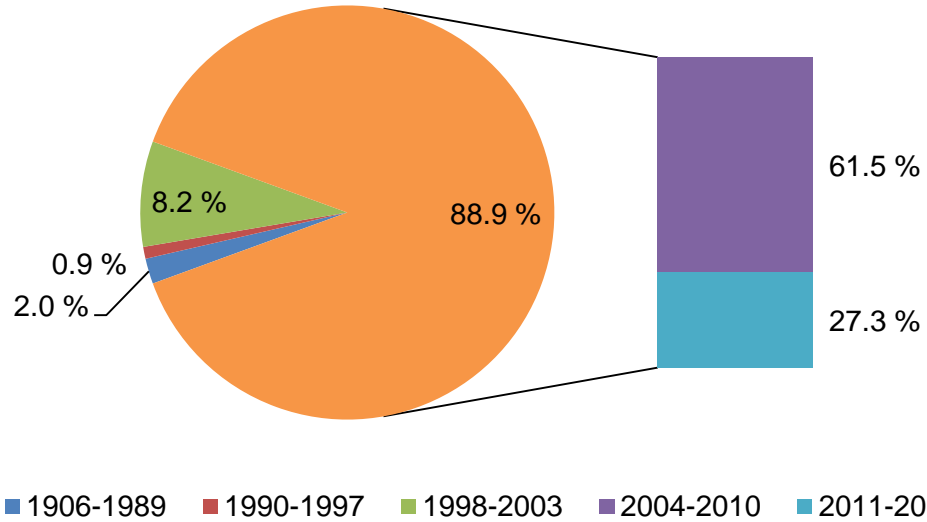
**Figura C-12:** Distribución de automóviles particulares con cilindrada mayor a 1400 cm<sup>3</sup> según marca por año del modelo (Fuente: esta investigación).



1.1 Automóvil Público

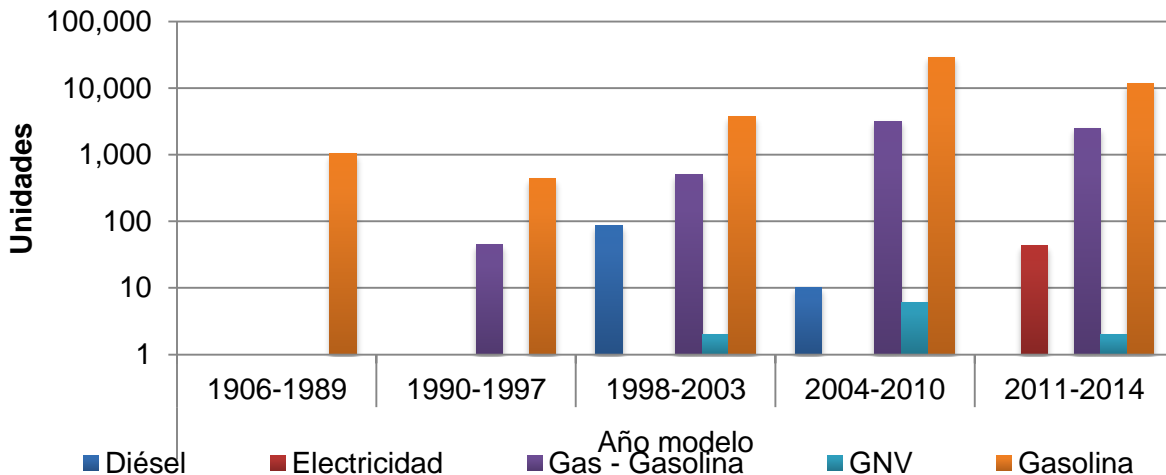
La siguiente gráfica muestra la distribución de los automóviles públicos según el año del modelo (Fuente: esta investigación).

**Figura C-13:** Distribución de automóviles públicos según el año del modelo (Fuente: esta investigación).

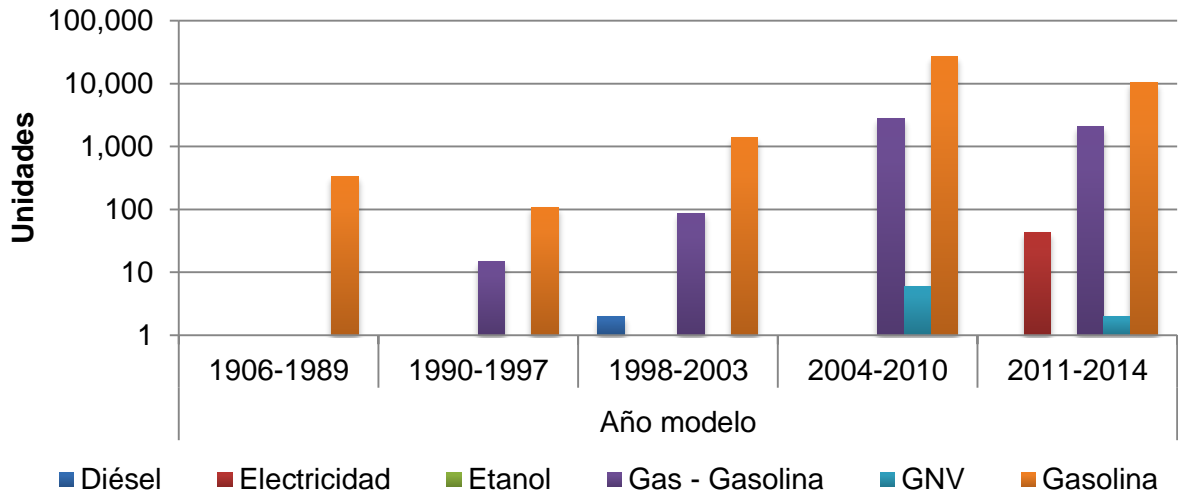


El 87.8 % de los automóviles de servicio público (taxis) opera con gasolina, el 11.9 % opera con gas-gasolina y el porcentaje restante se distribuye entre diésel, electricidad y gas natural vehicular.

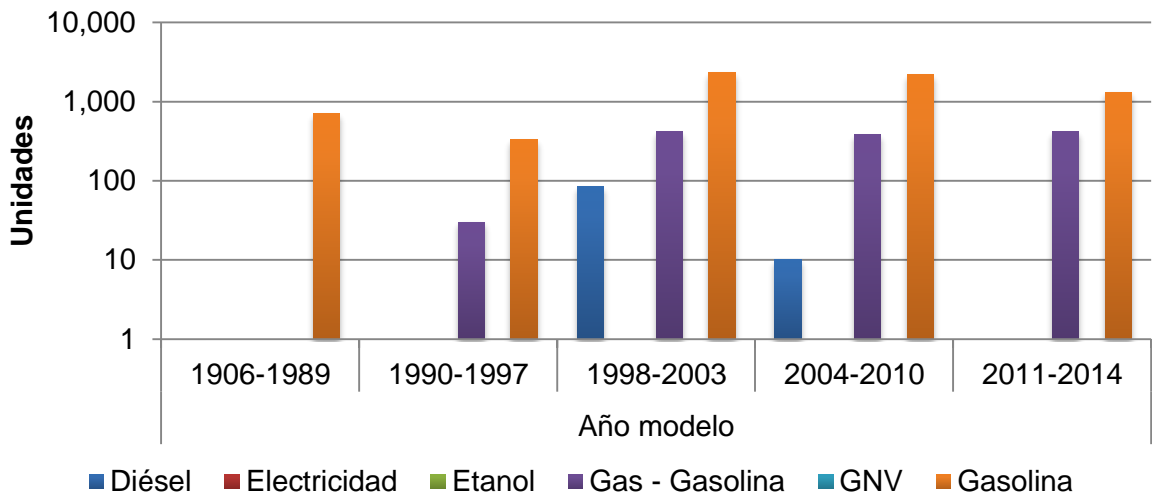
**Figura C-14:** Distribución de automóviles públicos según el tipo de combustible por año del modelo (Fuente: esta investigación).



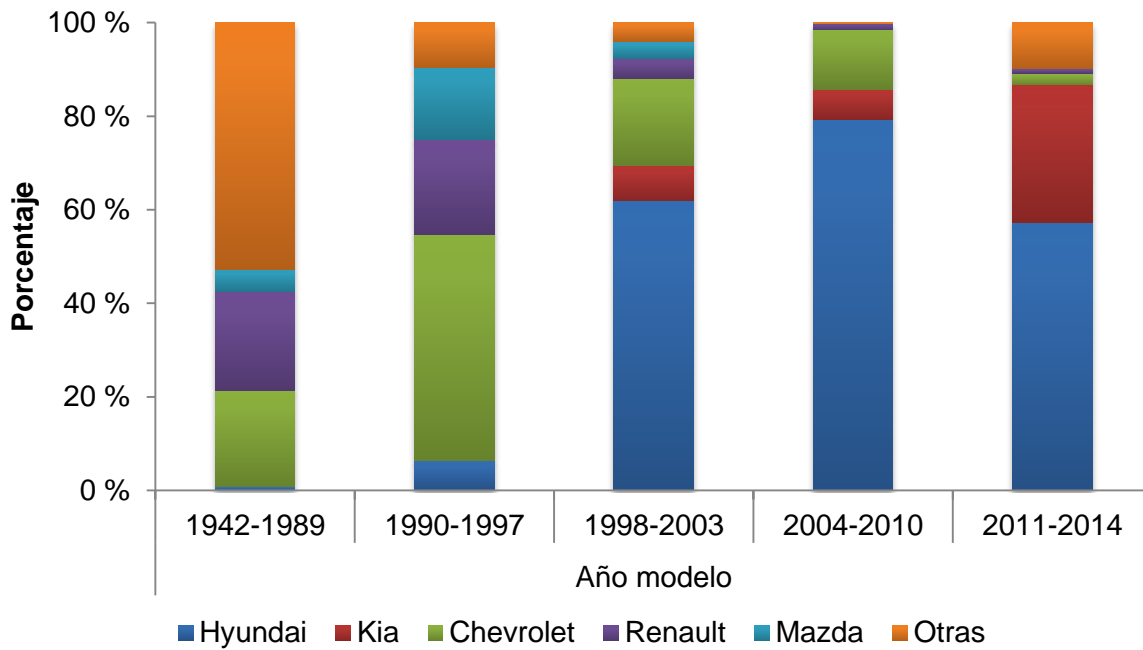
**Figura C-15:** Distribución de automóviles públicos con cilindrada menor a 1400 cm<sup>3</sup> según el tipo de combustible por año del modelo (Fuente: esta investigación).



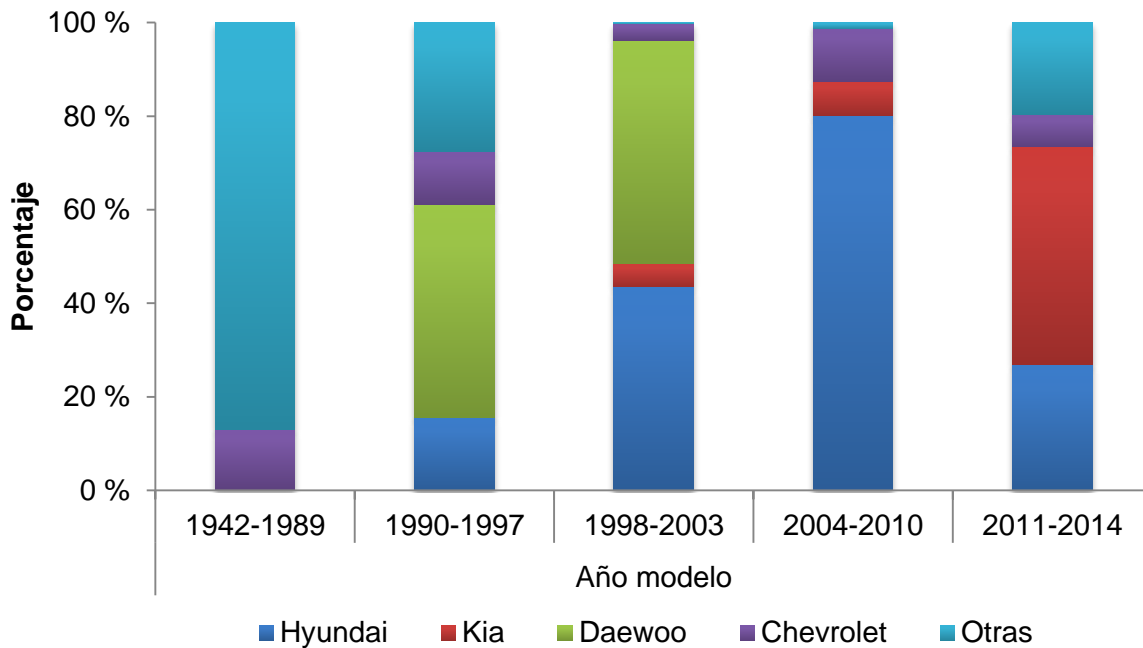
**Figura C-16:** Distribución de automóviles públicos con cilindrada mayor a 1400 cm<sup>3</sup> según el tipo de combustible por año del modelo (Fuente: esta investigación).



**Figura C-17:** Distribución de automóviles públicos con cilindrada menor a 1400 cm<sup>3</sup> según marca por año del modelo (Fuente: esta investigación).



**Figura C-18:** Distribución de automóviles públicos con cilindrada mayor a 1400 cm<sup>3</sup> según marca por año del modelo (Fuente: esta investigación).



En el presente estudio el consumo de combustible de los automóviles particulares y públicos fue calculado mediante el balance de masa de carbono (Anexo A, sección A-5), mientras que los factores de emisión para operación de estos vehículos se toman del Plan Decenal de Descontaminación del Aire de Bogotá [60].

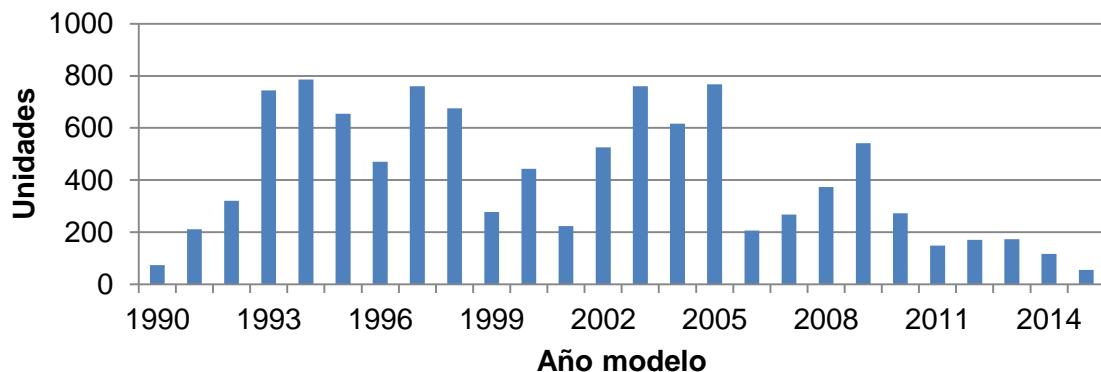
## C.2. Buses transporte de pasajeros

En esta categoría se clasifican los vehículos de transporte de pasajeros denominados microbuses, busetas, buses, articulados y biarticulados.

### ▪ Microbuses

En total los microbuses activos registrados en la ciudad son 12 188, de los cuales el 1.4 % es de servicio oficial; el 70 %, de servicio público; y el 28.5 %, de servicio particular. Se encuentran registros desde 1946, sin embargo, se observa un pico de registros a partir del año 1990, por lo cual, el 40.8 % y el 41 % de los microbuses activos corresponden a registros entre los años 1990-1999 y 2000-2010, respectivamente. Se encuentra una composición semejante para los microbuses de servicio público respecto a los años de los modelos activos: 43.5 % (1990-1999) y 50.3 % (2000-2010). En la siguiente gráfica se muestra la distribución de los registros a partir del año 1990.

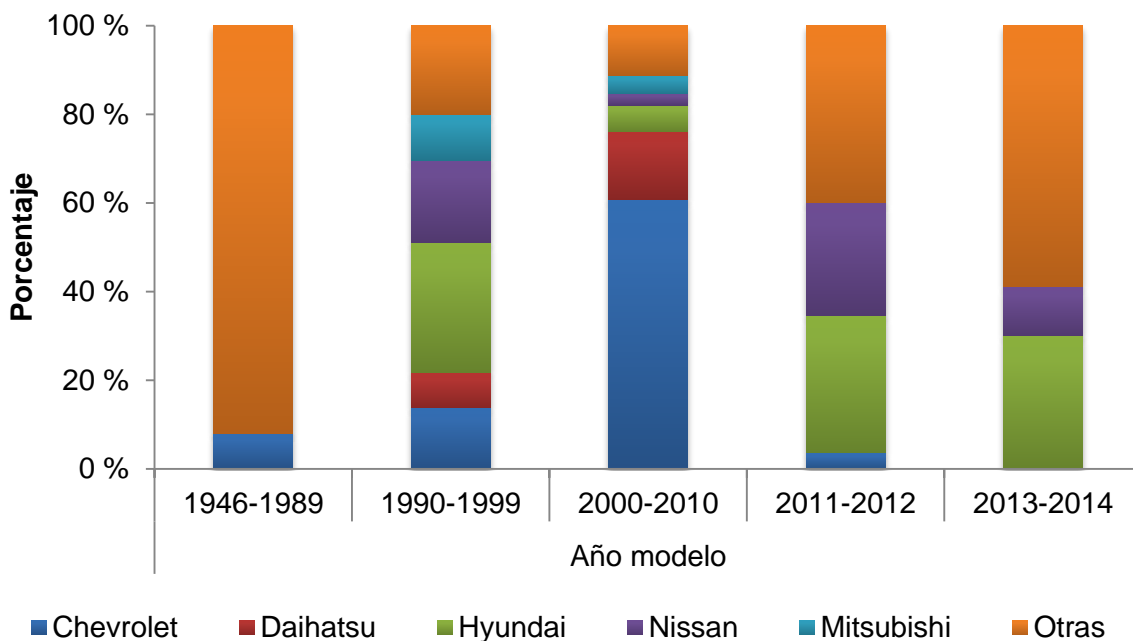
**Figura C-19:** Número de microbuses según el año del modelo desde el año 1990 (Fuente: esta investigación).



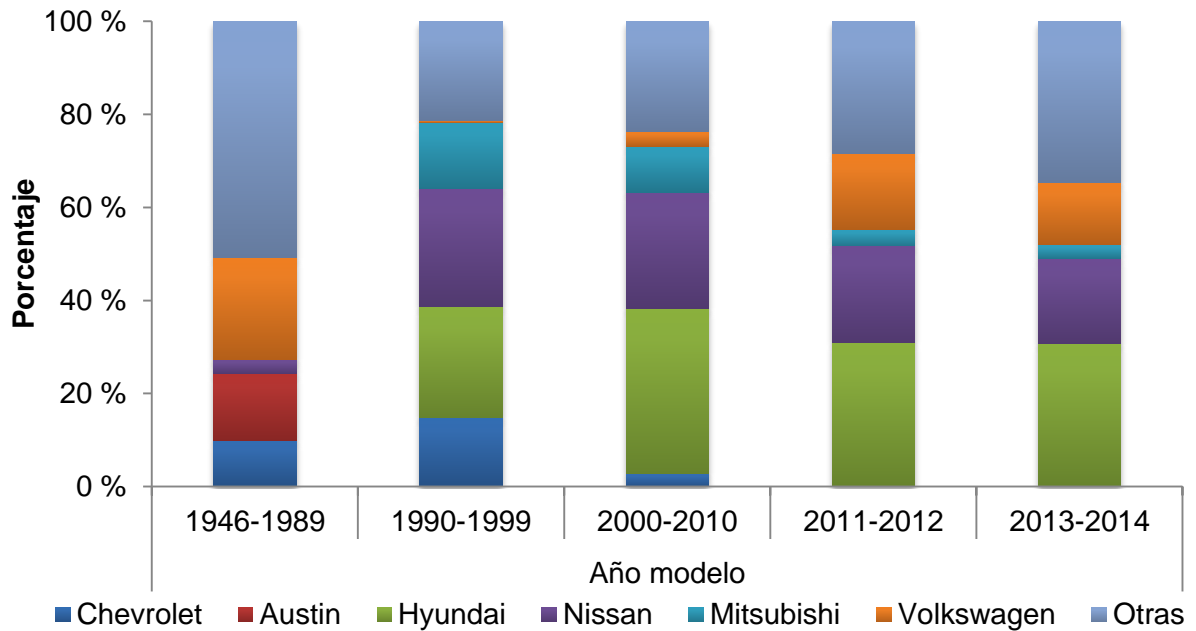
Con respecto al tipo de combustible usado, en los vehículos de servicio particular predomina la gasolina con el 83.5 % y el diésel con el 16.7 %, mientras que para el servicio público predomina el combustible diésel con el 64.9 %, seguido de la gasolina con el 33.7 %. En ambos casos el porcentaje restante se distribuye en gas - gasolina y gas natural vehicular.

Las marcas más representativas de los microbuses de servicio público son Chevrolet, Daihatsu, Hyundai, Nissan y Mitsubishi, las cuales abarcan el 82 % de esta flota. Por otra parte, las marcas más frecuentes para los vehículos de servicio particular son Chevrolet, Austin, Hyundai, Nissan, Mitsubishi y Volkswagen, con el 65.9 % de la flota.

**Figura C-20:** Distribución de microbuses de servicio público según marca por el año modelo (Fuente: esta investigación).



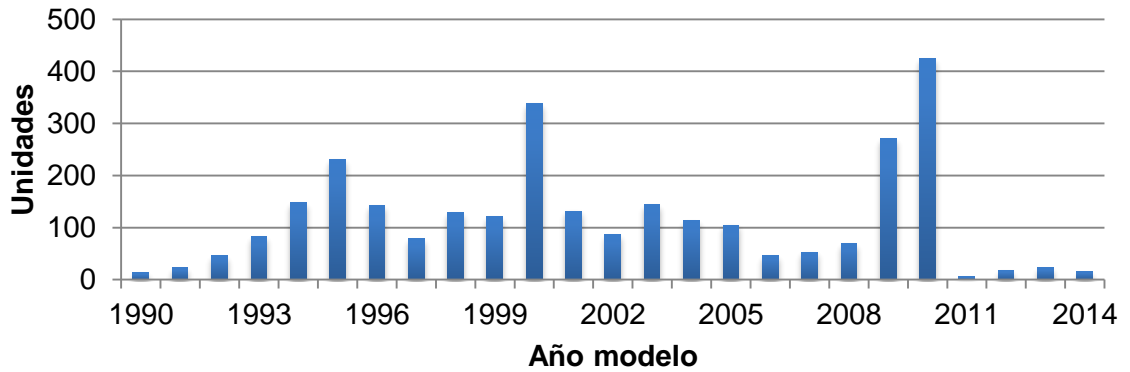
**Figura C-21:** Distribución de microbuses de servicio particular según marca por el año modelo (Fuente: esta investigación).



#### ▪ Busetas

El total de busetas activas registradas en la ciudad es de 3 555, de las cuales el 3.1 % es de servicio oficial, el 81.6 %, de servicio público y el 15.3 %, de servicio particular. Se encuentran registros desde 1936, sin embargo, se observa un pico de registros a partir del año 1990, por lo cual el 28.6 % y el 52.2 % corresponden a los registros entre los años 1990-1999 y 2000-2010, respectivamente. Se encuentra una composición semejante para los microbuses de servicio público respecto a los años de los modelos activos: 31.7 % (1990-1999) y 56.6 % (2000-2010). En la siguiente gráfica se muestra la distribución de los registros a partir del año 1990.

**Figura C-22:** Número de busetas según año del modelo desde el año 1990 (Fuente: esta investigación).

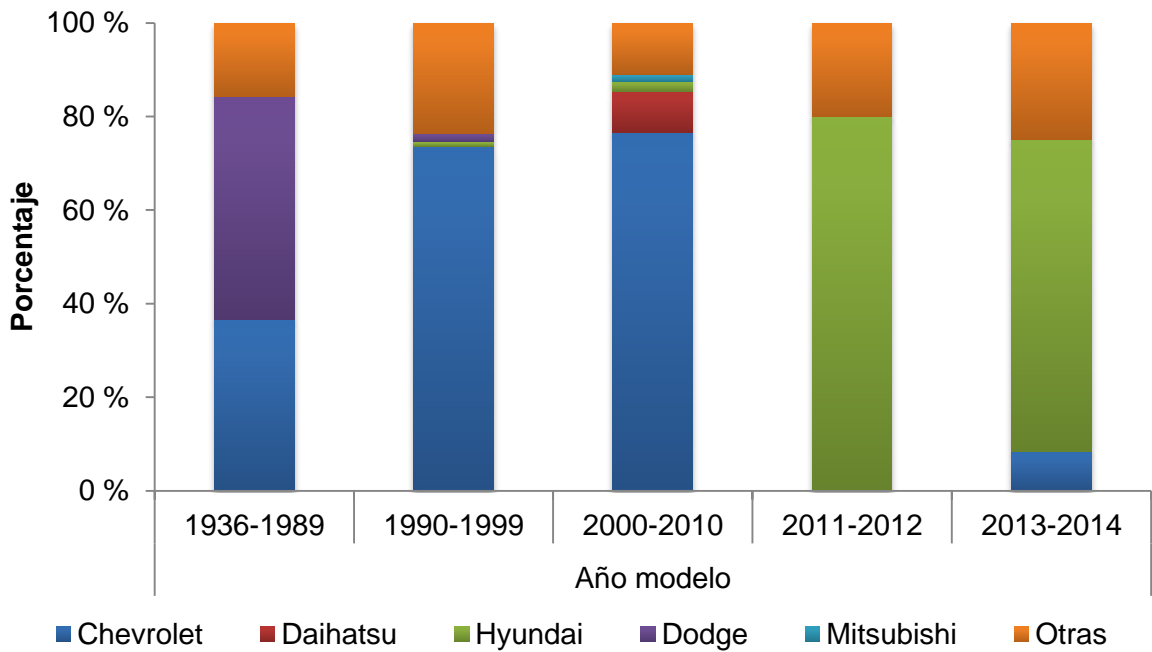


Con respecto al tipo de combustible usado en las busetas de servicio particular, predomina la gasolina con el 79.1 % y el diésel con el 20.7 %; mientras que para el servicio público predomina el combustible diésel con el 86.5 %, seguido de la gasolina con el 13 %. En ambos casos el porcentaje restante se distribuye en gas - gasolina y gas natural vehicular.

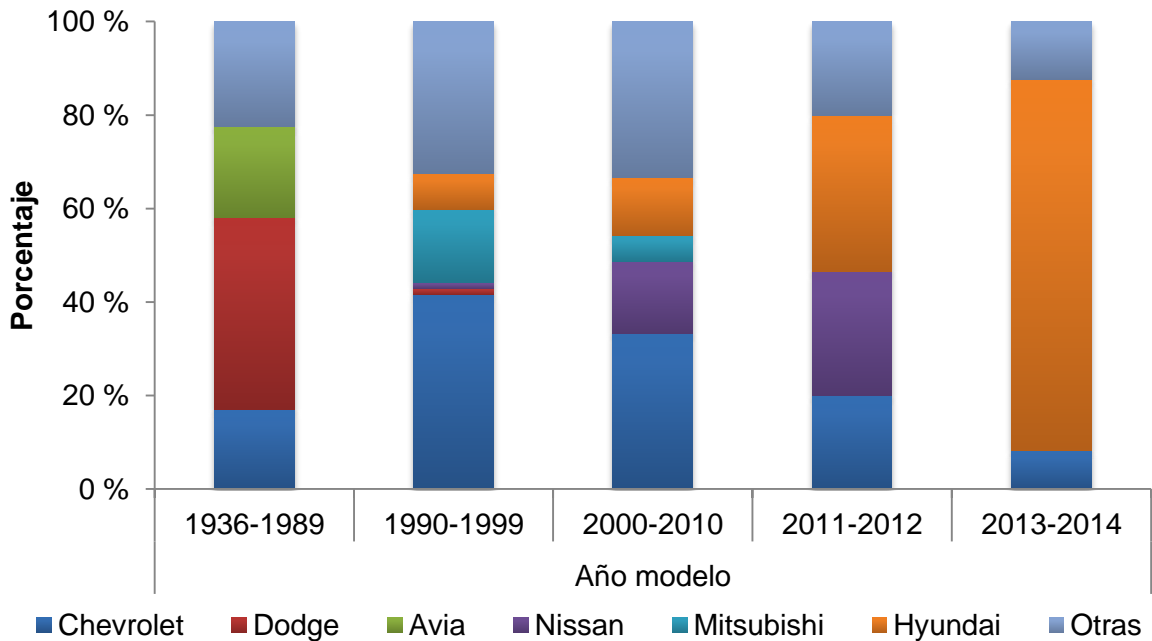
Las marcas más representativas de los microbuses de servicio público son Chevrolet, Daihatsu, Hyundai, Dodge y Mitsubishi, las cuales abarcan el 84 % de esta flota. Por otra parte, las marcas más frecuentes para los microbuses de servicio particular son Chevrolet, Dodge, Avia, Nissan, Mitsubishi y Hyundai, con el 75.2 %.



**Figura C-23:** Distribución de busetas de servicio público según marca por el año del modelo (Fuente: esta investigación).



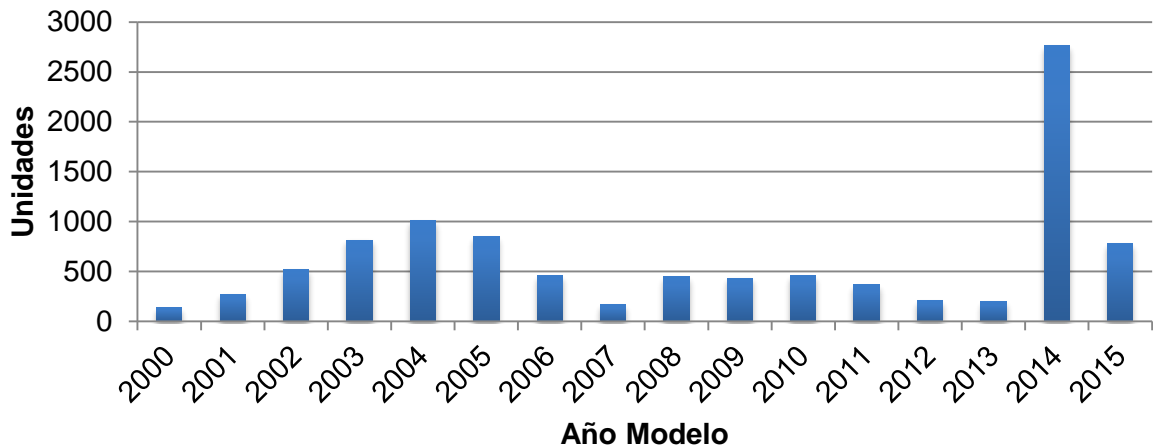
**Figura C-24:** Distribución de busetas de servicio particular según marca por el año del modelo (Fuente: esta investigación).



### ▪ Buses

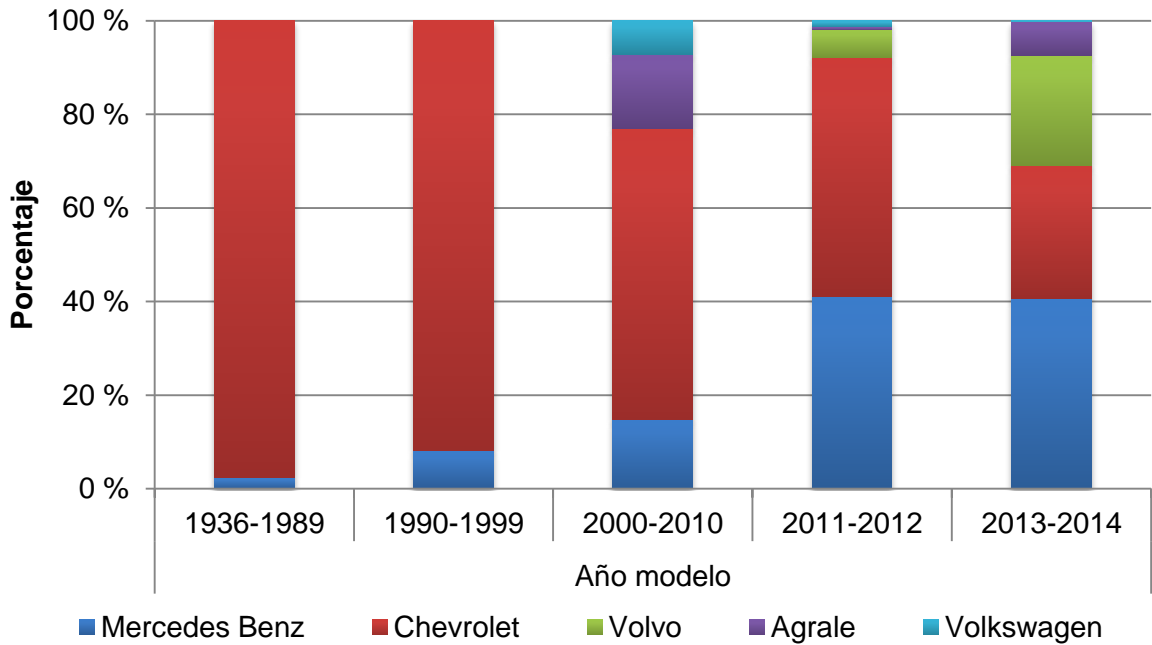
En total los buses activos registrados en la ciudad son 13 840, de los cuales el 1.6 % es de servicio oficial, el 82.9 %, de servicio público y el 15.5 %, de servicio particular. Se encuentran registros desde 1945, sin embargo, se observa un pico de registros a partir del año 2000, por lo que el 40.4 % y el 27.0 % de los buses activos corresponden a registros entre los años 2000-2010 y 2013-2014, respectivamente. Se encuentra una composición semejante para los buses de servicio público respecto a los años de los modelos activos: 43.5 % (1990-1999) y 50.3 % (2000-2010). Adicionalmente, se encuentra que un 22.6 % de los registros corresponden a años anteriores a 1990, sin embargo, estos son en su mayoría de servicio particular (74.7 %). En la siguiente gráfica se muestra la distribución de los registros a partir del año 2000.

**Figura C-25:** Número de buses según el año del modelo desde el año 2000 (Fuente: esta investigación).

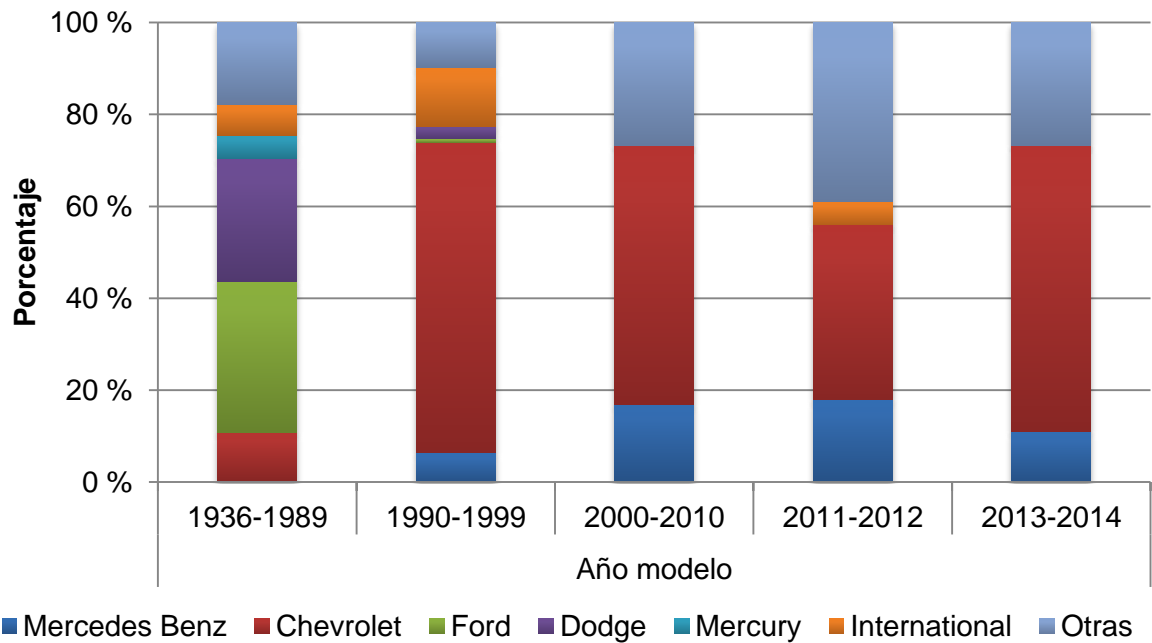


Con respecto al tipo de combustible usado, en los vehículos de servicio particular predomina la gasolina con el 80.9 %, y el diésel con el 19 %; mientras que para el servicio público predomina el combustible diésel con el 88.7 %, seguido de la gasolina con el 9.6 %. Se hallan también 199 vehículos híbridos registrados con año modelo 2014 (diésel – eléctrico). El porcentaje restante se distribuye en gas - gasolina y gas natural vehicular. Las marcas más representativas de los microbuses de servicio público son Mercedes Benz, Chevrolet, Volvo, Agrale y Volkswagen, las cuales abarcan el 78 % de esta flota. Por otra parte, para los microbuses de servicio particular las marcas más frecuentes son Chevrolet, Ford, Dodge, International y Mercury, con el 80.4 %.

**Figura C-26:** Distribución de buses de servicio público según marca por año del modelo (Fuente: esta investigación).



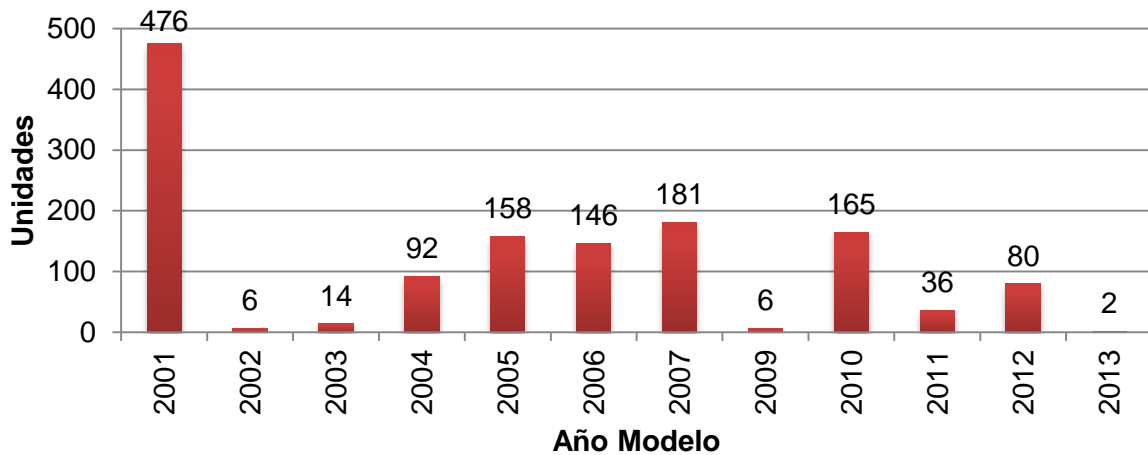
**Figura C-27:** Distribución de buses de servicio particular según marca por año del modelo (Fuente: esta investigación).



### ▪ Buses articulados *TransMilenio*

Los buses articulados activos registrados en la ciudad son 1 362, los cuales están dedicados al servicio público en su totalidad, y se encuentran registros desde el 2001, que corresponde al año de la entrada en operación del sistema. El 34.9 % de la flota es del año modelo 2001, y adicionalmente, el 54.9 % de los buses corresponde a registros entre los años 2004 y 2010. En la siguiente gráfica se muestra la distribución del número de unidades registradas a partir del año 2001.

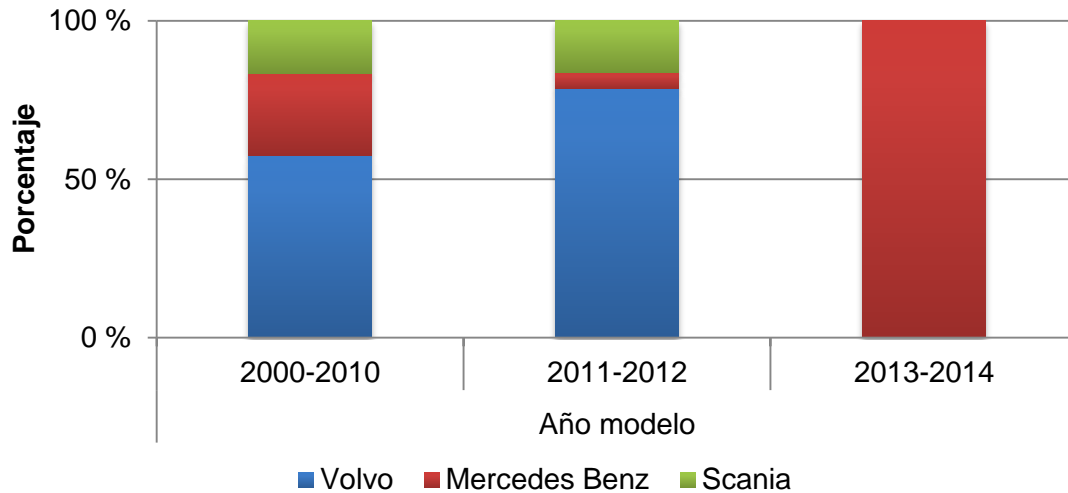
**Figura C-28:** Número de buses articulados *TransMilenio* según el año del modelo desde el año 2001 (Fuente: esta investigación).



El 99.9% de los buses articulados de servicio público utilizan combustible diésel; el porcentaje restante corresponde al registro de un vehículo a gas natural del año 2002.

Las marcas representativas de los articulados de *TransMilenio* son Volvo (59 %), Mercedes Benz (24 %) y Scania (17 %). En la siguiente gráfica se muestra la distribución de las marcas según el año del modelo.

**Figura C-29:** Distribución de la flota de buses articulados *TransMilenio* según marca por año modelo (Fuente: esta investigación).



Para las emisiones de la fase de operación y consumo de combustible de los buses articulados de *TransMilenio* se usaron los datos proporcionados por el Grupo de Investigación en Biocombustibles, Energía, y Protección del Medio Ambiente, del Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá.

En el caso de los vehículos de transporte público tradicionales (buses, busetas, microbuses), los factores de emisión considerados para la fase de operación fueron tomados del Plan Decenal de Descontaminación del Aire de Bogotá [60], mientras que el consumo de combustible fue calculado mediante el balance de masa de carbono (Anexo A, sección A-5).



## Bibliografía

- [1] International Organisation for Standardisation (ISO), “NTC-ISO 14040 Gestión ambiental. Análisis del ciclo de vida. Principios y marco de referencia.” Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC), Bogotá D.C., 2007.
- [2] E. Gnansounou, A. Dauriat, J. Villegas, y L. Panichelli, “Life cycle assessment of biofuels: Energy and greenhouse gas balances,” *Bioresour. Technol.*, vol. 100, nro. 21, pp. 4919–4930, 2009.
- [3] E. I. Wiloso y R. Heijungs, “Key Issues in Conducting Life Cycle Assessment of Bio-based Renewable Energy Sources,” en *Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources*, A. Singh, D. Pant, y S. I. Olsen, Eds. London: Springer London, 2013, pp. 13–36.
- [4] IEA, “World outlook, Resumen ejecutivo- Spanish translation,” 2013.
- [5] DNP, “Documento Conpes 3700, Estrategia institucional para la articulación de políticas y acciones en materia de cambio climático en Colombia,” Bogotá D.C., 2011.
- [6] CEPAL División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos, “Panorama del cambio climático en Colombia,” *Medio Ambient. y Desarro.*, nro. 146, p. 103, 2013.
- [7] J. M. Bergthorson y M. J. Thomson, “A review of the combustion and emissions properties of advanced biofuels and their impact on existing and future engines,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 42, pp. 1–46, 2014.
- [8] F. L. Dryer, “Chemical kinetic and combustion characteristics of transportation fuels,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 35, nro. 1, pp. 117–144, 2015.
- [9] G. T. Kalghatgi, “Developments in internal combustion engines and implications for combustion science and future transport fuels,” *Proc. Combust. Inst.*, vol. 35, nro. 1, pp. 101–115, 2014.
- [10] I. Dinçer y C. Zamfirescu, “Life-Cycle Assessment,” en *Sustainable Energy Systems and Applications*, Springer, Ed. New York, 2011, pp. 663–700.
- [11] ISO, “ISO 14040: Environmental Management —Life Cycle Assessment— Principles and Framework.” ISO, Ginebra, 2006.
- [12] K. Aguirre, L. Eisenhardt, C. Lim, B. Nelson, A. Norring, P. Slowik, y N. Tu, “Lifecycle Analysis Comparison of a Battery Electric Vehicle and a Conventional Gasoline Vehicle,” 2012.
- [13] R. Faria, P. Marques, P. Moura, F. Freire, J. Delgado, y A. T. de Almeida, “Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles,”

- Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 24, pp. 271–287, Aug. 2013.
- [14] L. Gao y Z. C. Winfield, “Life cycle assessment of environmental and economic impacts of advanced vehicles,” *Energies*, vol. 5, nro. 12, pp. 605–620, Mar. 2012.
- [15] J. A. García Sánchez, J. M. López Martínez, J. Lumbreras Martín, M. N. Flores Holgado, y H. Aguilar Morales, “Impact of Spanish electricity mix, over the period 2008–2030, on the Life Cycle energy consumption and GHG emissions of Electric, Hybrid Diesel-Electric, Fuel Cell Hybrid and Diesel Bus of the Madrid Transportation System,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 74, pp. 332–343, Oct. 2013.
- [16] H. Ma, F. Balthasar, N. Tait, X. Riera-Palou, y A. Harrison, “A new comparison between the life cycle greenhouse gas emissions of battery electric vehicles and internal combustion vehicles,” *Energy Policy*, vol. 44, pp. 160–173, May 2012.
- [17] M. Messagie, F.-S. Boureima, T. Coosemans, C. Macharis, y J. Mierlo, “A Range-Based Vehicle Life Cycle Assessment Incorporating Variability in the Environmental Assessment of Different Vehicle Technologies and Fuels,” *Energies*, vol. 7, nro. 3, pp. 1467–1482, Mar. 2014.
- [18] F. Cherubini, N. D. Bird, A. Cowie, G. Jungmeier, B. Schlamadinger, and S. Woess-Gallasch, “Energy- and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 53, pp. 434–447, 2009.
- [19] E. Furuholt, “Life cycle assessment of gasoline and diesel,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 14, nro. November 1992, pp. 251–263, 1995.
- [20] E. D. Larson, “A review of life-cycle analysis studies on liquid biofuel systems for the transport sector,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 10, nro. 2, pp. 109–126, 2006.
- [21] M. Valencia, “Assessment of greenhouse gases emissions associated to Colombian Biofuels Lifecycle,” Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, 2012.
- [22] CUE, “‘Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia’. Capítulo II: Estudio ACV – Impacto Ambiental,” en *Evaluación del ciclo de vida de la cadena de producción de biocombustibles en Colombia*, Medellín: BID, Banco Interamericano de Desarrollo Mmec, Ministerio de Minas y Energía, República de Colombia, 2012, p. 203.
- [23] É. Geraldés, H. Acevedo, y F. Freire, “Greenhouse gas intensity of palm oil produced in Colombia addressing alternative land use change and fertilization scenarios,” *Appl. Energy*, vol. 114, pp. 958–967, Feb. 2013.
- [24] R. Buitrago y L. C. Belalcázar, “Análisis del ciclo de vida para la producción de bioetanol en Colombia por medio de OpenLCA,” *épsilon*, nro. 21, pp. 145–156, 2013.
- [25] O. Sánchez, C. A. Cardona, y D. Sánchez, “Análisis de Ciclo de Vida,” *Rev. Univ. EAFIT*, vol. 43, nro. 146, pp. 59–79, 2007.
- [26] J. F. Saavedra y O. R. Vargas, “Estimación del impacto ambiental del cultivo de caña de azúcar utilizando la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV),” *Rev. Ing. Univ. los Andes*, vol. 12, pp. 61–67, 2000.
- [27] T. Deng y J. D. Nelson, “Recent Developments in Bus Rapid Transit: A Review of the Literature,” *Transp. Rev.*, vol. 31, nro. 1, pp. 69–96, Ene. 2011.



- [28] D. Hidalgo y L. Gutiérrez, "BRT and BHLS around the world: Explosive growth, large positive impacts and many issues outstanding," *Res. Transp. Econ.*, vol. 39, nro. 1, pp. 8–13, 2013.
- [29] S. Mejía-Dugand, O. Hjelm, L. Baas, y R. A. Ríos, "Lessons from the spread of Bus Rapid Transit in Latin America," *J. Clean. Prod.*, vol. 50, pp. 82–90, 2013.
- [30] L. Wright, "Bus Rapid Transit," en *Sustainable Transport: A Sourcebook for Policy-makers in Developing Cities*, K. Fjellstrom, Ed. Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), 2002, p. 48.
- [31] S. Zimmerman y H. Levinson, "The Facts About BRT," *Planning*, vol. 72, nro. 5, pp. 34–35., 2006.
- [32] F. Duarte y F. Rojas, "Intermodal Connectivity to BRT : A Comparative Analysis of Bogotá and Curitiba," *J. Public Transp.*, vol. 15, nro. 2, pp. 1–18, 2012.
- [33] L. Wright y L. Fulton, "Climate Change Mitigation and Transport in Developing Nations," *Transp. Rev.*, vol. 25, nro. 6, pp. 691–717, Nov. 2005.
- [34] M. S. Baghini, A. Ismail, y M. H. Hafezi, "Bus Rapid Transit ( BRT ) System Impacts to Environmental Quality," *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, vol. 7, nro. 7, pp. 1158–1164, 2014.
- [35] ISO, "ISO 14044 Environmental Management —Life Cycle Assessment— Requirements and Guidelines." ISO, Ginebra, 2006.
- [36] European Commission, Joint Research Centre, and Institute for Environment and Sustainability, *International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance*, First edit. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2010.
- [37] European Commission, Joint Research Centre, and Institute for Environment and Sustainability, *Characterisation factors of the ILCD Recommended Life Cycle Impact Assessment methods. Database and supporting Information*, First edit. Luxemburgo: Publications Office of the European Union, 2012.
- [38] A. P. Acero, C. Rodríguez, y A. Cirot, "LCIA methods Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories." Berlin, pp. 1–23, 2014.
- [39] M. a J. Huijbregts, W. Gilijamse, A. M. J. Ragas, y L. Reijnders, "Evaluating uncertainty in environmental life-cycle assessment. A case study comparing two insulation options for a Dutch one-family dwelling," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 37, nro. 11, pp. 2600–2608, 2003.
- [40] Y. Y. Restianti y S. H. Gheewala, "Life cycle assessment of gasoline in Indonesia," *Int. J. Life Cycle Assess.*, vol. 17, nro. 4, pp. 402–408, Ene. 2012.
- [41] R. Faria, P. Moura, J. Delgado, y A. T. de Almeida, "A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system," *Energy Convers. Manag.*, vol. 61, pp. 19–30, Sep. 2012.
- [42] J. Lang, S. Cheng, Y. Zhou, B. Zhao, H. Wang, y S. Zhang, "Energy and Environmental Implications of Hybrid and Electric Vehicles in China," *Energies*, vol. 6, nro. 5, pp. 2663–2685, May 2013.
- [43] J. Lang, S. Cheng, Y. Zhou, B. Zhao, H. Wang, y S. Zhang, "Energy and Environmental Implications of Hybrid and Electric Vehicles in China," *Energies*, vol.

- 6, nro. 5, pp. 2663–2685, May 2013.
- [44] R. Buitrago, “Evaluación de los efectos ambientales de la gasolina, diésel, biodiesel y etanol carburante en Colombia por medio del Análisis de Ciclo de Vida,” Universidad Nacional de Colombia Sede Bogotá, 2014.
- [45] R. Schenk y T. Gordy, *2011 Directory of Sustainability Life Cycle Assessment Tools*. Portland, OR: International Society of Sustainability Professionals, 2011.
- [46] M. A. Curran y P. Notten, “Summary of Global Life Cycle Inventory Data Resources,” *Society of Environmental Toxicology and Chemistry*,. pp. 1–34, 2006.
- [47] ADEME — Agence de l’Environnement et de la Maîtrise de l’Énergie, “L’évaluation environnementale en agriculture,” *L’outil Agribalyse / Agribalyse program*, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.ademe.fr/expertises/produire-autrement/production-agricole/passer-a-laction/dossier/evaluation-environnementale-agriculture/loutil-agribalyse-agribalyse-program>. [fecha de consulta : 01-Mar-2015].
- [48] NREL- National Renewable Energy Laboratory, “U.S. Life Cycle Inventory Database,” *NREL- National Renewable Energy Laboratory*, 2013. [En línea]. Disponible en : <http://www.nrel.gov/lci/>. [fecha de consulta : 01-Mar-2015].
- [49] P. E. Grohnheit, “NEEDS - New Energy Externalities Developments for Sustainability,” *Danmarks Tekniske Universitet*, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.sys.man.dtu.dk/Research/Energy-Systems-Analysis/Research-projects/More-completed-projects/NEEDS>. [fecha de consulta : 01-Mar-2015].
- [50] Joint Research Center, “EPLCA - European reference Life-Cycle Database,” *Joint Research Center*. [En línea]. Disponible en : <http://eplca.jrc.ec.europa.eu/ELCD3/>. [fecha de consulta: 01-Mar-2015].
- [51] Argonne National Laboratory, “GREET Model,” *Transportation Technology R&D Center*, 2014. [En línea]. Disponible en : <https://greet.es.anl.gov/>. [fecha de consulta: 13-Mar-2014].
- [52] Ecoinvent Association, “The ecoinvent Database,” *Ecoinvent Centre*. [En línea]. Disponible en : <http://www.ecoinvent.org/database/>. [Fecha de consulta : 01-Mar-2015].
- [53] PE INTERNATIONAL, “GaBi LCA Databases,” *thinkstep GaBi*. [En línea]. Disponible en : <http://www.gabi-software.com/databases/gabi-databases/>. [Fecha de consulta : 01-Mar-2015].
- [54] Swiss Centre for Life Cycle Inventories, “ecoinvent data 2.2,” 2010. [En línea]. Disponible en : <http://www.ecoinvent.org/>. [Fecha de consulta : 10-Oct-2014].
- [55] Green Delta, “OpenLCA.” <http://www.greendelta.com/>, 2014.
- [56] Ecopetrol S. A., “Reporte integrado de gestion sostenible,” Bogotá D.C., 2013.
- [57] Subdirección de Energía Eléctrica - Grupo de Generación, “Informe mensual de variables de generación y del mercado eléctrico colombiano – Junio de 2014,” 2014.
- [58] Concejo de Bogotá D.C., *Proyecto de acuerdo 161 de 2012*. Bogotá D.C., 2012.
- [59] Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), “Anexo 1. Listado de categorías vehiculares con los criterios de clasificación, los factores de actividad y los factores de emisión

- asociados,” en *Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá*, Bogotá D.C.: secretaría Distrital de Ambiente, 2010, pp. 299–300.
- [60] SDA, “Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá.” Bogotá D.C., p. 324, 2010.
- [61] UPME, “FACTORES DE EMISIÓN DE LOS COMBUSTIBLES COLOMBIANOS (FECOC).” SIAME - Sistema de Información Ambiental Minero Energético, 2003.
- [62] BYD Motor Colombia SAS, “BYD 100% Buses Eléctrico para Transporte Masivo.” BYD Motor Colombia SAS, Bogotá D.C., p. 2.
- [63] T. Donateo, F. Ingrosso, F. Licci, y D. Laforgia, “A method to estimate the environmental impact of an electric city car during six months of testing in an Italian city,” *J. Power Sources*, vol. 270, pp. 487–498, 2014.
- [64] D. Weisser, “A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies,” *Energy*, vol. 32, pp. 1543–1559, 2007.
- [65] M. Demarty y J. Bastien, “GHG emissions from hydroelectric reservoirs in tropical and equatorial regions: Review of 20 years of CH<sub>4</sub> emission measurements,” *Energy Policy*, vol. 39, nro. 7, pp. 4197–4206, 2011.
- [66] A. C. Rocha Lessa, M. A. dos Santos, J. E. Lewis Maddock, y C. Dos Santos Bezerra, “Emissions of greenhouse gases in terrestrial areas pre-existing to hydroelectric plant reservoirs in the Amazon: The case of Belo Monte hydroelectric plant,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 51, pp. 1728–1736, 2015.
- [67] L. Yang, F. Lu, X. Zhou, X. Wang, X. Duan, y B. Sun, “Progress in the studies on the greenhouse gas emissions from reservoirs,” *Acta Ecol. Sin.*, vol. 34, nro. 4, pp. 204–212, 2014.
- [68] A. Dale, A. Pereira de Lucena, J. Marriott, B. Borba, R. Schaeffer, y M. Bilec, “Modeling Future Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions and Environmental Impacts of Electricity Supplies in Brazil,” *Energies*, vol. 6, nro. 7, pp. 3182–3208, Jul. 2013.
- [69] ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, “Matriz de Energia Elétrica,” ANEEL. [En línea]. Disponible en : <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm>.