



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

**ESTUDIO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO  
INVERNADERO RELACIONADAS CON LA  
IMPLEMENTACIÓN DE AUTOBUSES ELÉCTRICOS EN  
LA FLOTA DE TRANSPORTE URBANO COLECTIVO DE  
LA CIUDAD DE IBAGUÉ**

**Laura Patricia Rico Ospina**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de ingeniería civil y agrícola  
Bogotá, Colombia

2021

**ESTUDIO DE EMISIONES DE GASES DE EFECTO  
INVERNADERO RELACIONADAS CON LA  
IMPLEMENTACIÓN DE AUTOBUSES ELÉCTRICOS EN  
LA FLOTA DE TRANSPORTE URBANO COLECTIVO DE  
LA CIUDAD DE IBAGUÉ**

**Laura Patricia Rico Ospina**

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al título

de:

**Magister en Transporte**

Director (a):

Sonia C. Mangones M. Ph.D

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de ingeniería civil y agrícola  
Bogotá, Colombia

2021

*A Dios por ser el guía en mi camino de la vida,  
a mis padres, mi hermano y Felipe, por su  
constante apoyo y amor.*



## Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



---

Laura Patricia Rico Ospina

Fecha 10/10/2021

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional de Colombia por permitirme el honor de ser parte de ella, a la directora del trabajo de grado Sonia Mangones por su dedicación, su tiempo, apoyo y orientación en el camino para lograr la culminación de este trabajo.

A Erika Trejos estudiante de maestría por el tiempo dedicado a la orientación y revisión de la metodología llevada a cabo en el modelo COPERT IV, que aportó para la corrección de resultados; y a la empresa SITSA en Ibagué por permitirme el acceso a datos que fueron fundamentales para el desarrollo del presente trabajo.

## Resumen

### **Estudio de emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la implementación de autobuses eléctricos en la flota de transporte urbano colectivo de la ciudad de Ibagué**

La emisión desmesurada de gases de efecto invernadero a la atmosfera derivadas de la actividad del ser humano ha hecho que se llegue a un punto insostenible y crítico para el planeta, uno de los sectores representativos y de mayor crecimiento en los últimos años es el del transporte, aportando más del 14% de las emisiones globales, es responsabilidad de todos el buscar y aplicar alternativas que ayuden a disminuir los impactos y que se puedan implementar a gran escala, una de estas es la utilización de vehículos eléctricos que su vida útil reducen las emisiones considerablemente en comparación con los vehículos convencionales.

Los inventarios de emisiones son una herramienta de gran importancia para la gestión de planes y medidas de control para la mitigación del cambio climático y mejora en calidad del aire, por medio de esta herramienta este estudio busca analizar la reducciones de emisiones que se obtendrían al implementar buses eléctricos en la flota de transporte público de la ciudad de Ibagué, mostrando resultados positivos por medio de la implementación del software COPERT IV en cuanto a los gases de efecto invernadero, casos de implementación en otras ciudades, comparación con otros inventarios, posibles alternativas de implementación de este tipo de buses y su costo.

**Palabras clave:** Buses eléctricos, inventario de emisiones, transporte público, gases de efecto invernadero, calentamiento global.

## Abstract

### **Study of greenhouse gas emissions related to the implementation of electric buses in the collective urban transport fleet of the city of Ibagué**

The excessive emission of greenhouse gases into the atmosphere derived from human activity has caused an unsustainable and critical point for the planet. It is everyone's responsibility to seek and apply alternatives that help reduce climate change impacts. One of every country's most important and fastest-growing economic sectors is transport, contributing more than 14% of global emissions. Strategies can be implemented on a large scale through electric vehicles, which promise to reduce emissions considerably compared to conventional vehicles.

Emission inventories are an important tool to manage plans and measurements for the mitigation of climate change and improvement in air quality. This study seeks to analyze the emission reductions that would be obtained when implementing electric buses in the public transport fleet of the city of Ibagué, Colombia. We report positive results in the reduction of greenhouse gas emissions. We used COPERT IV (Calculation of Emissions from Road Transport) to estimate greenhouse gas reductions and discussed cases in other cities. Finally, we compared our findings with other emission inventories, discussed possible alternatives of implementation and costs of electric buses.

**Keywords: Electric buses, emissions inventory, public transport, greenhouse gases, global warming.**

## Contenido

|   |            |
|---|------------|
| <b>1. Introducción .....</b>  | <b>14</b>  |
| 1.1. Justificación.....   | 16         |
| 1.2. Alcance y metodología .....  | 18         |
| <b>2. Marco de referencia .....</b>   | <b>21</b>  |
| 2.1. Conceptualización de los Gases de Efecto Invernadero.....                            | 22         |
| 2.2. Aporte del transporte en las emisiones de GEI.....                                   | 23         |
| 2.2.1. Emisiones de GEI por el transporte escala mundial.....                             | 23         |
| 2.2.2. Emisiones de GEI del transporte escala nacional .....                              | 27         |
| 2.3. Consecuencias a corto y largo plazo de la emisión desmesurada de GEI.....            | 31         |
| 2.3.1. Consecuencias a la salud humana .....  | 31         |
| 2.3.2. Consecuencias al planeta.....  | 33         |
| 2.4. Reducción de emisiones de GEI .....  | 34         |
| 2.4.1. Compromisos internacionales.....   | 34         |
| 2.4.2. Compromisos Nacionales .....   | 35         |
| 2.4.3. Compromisos municipales.....   | 42         |
| 2.5. Vehículos eléctricos .....   | 43         |
| 2.5.1. Ventajas .....   | 46         |
| 2.5.2. Desventajas.....   | 48         |
| 2.5.3. Políticas nacionales e internacionales para la electrificación del transporte...49 |            |
| 2.5.4. Casos exitosos de implementación de buses eléctricos.....                          | 51         |
| <b>3. Estudio de caso en Ibagué .....</b>   | <b>59</b>  |
| 3.1. Descripción del área de estudio .....  | 60         |
| 3.2. Estimación del Inventario de Emisiones .....   | 63         |
| 3.3. Modelo COPERT.....   | 65         |
| 3.4. Estimación de Emisiones de GEI en Ibagué.....  | 67         |
| 3.4.1. Datos iniciales .....  | 68         |
| 3.4.2. Resultados.....  | 76         |
| 3.4.3. Discusión de los resultados .....  | 81         |
| 3.4.4. Análisis de sensibilidad de los resultados frente al factor emisión.....           | 84         |
| 3.4.5. Comparación con otros estudios.....  | 86         |
| <b>4. Recomendaciones para la implementación y sus costos .....</b>                       | <b>91</b>  |
| 4.1. Costos.....  | 92         |
| 4.2. Recomendaciones para la implementación .....   | 101        |
| <b>5. Conclusiones y recomendaciones.....</b>   | <b>117</b> |
| <b>A. Anexo 1: Caculo de emisiones en COPERT .....</b>                                    | <b>122</b> |
| <b>6. Bibliografía .....</b>  | <b>127</b> |

## Lista de figuras

|  |     |
|--|-----|
| Ilustración 1. Metodología general. Fuente: Elaboración propia.....  | 19  |
| Ilustración 2. Metodología general. Fuente: Elaboración propia.....  | 21  |
| Ilustración 3. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por sector económico. Fuente: IPCC (2014).....   | 24  |
| Ilustración 4. Emisiones por departamento. ....  | 29  |
| Ilustración 5. Tecnología de vehículos diésel según clase Fuente: Documento CONPES 3943 Política para el mejoramiento de la calidad del aire.....          | 31  |
| Ilustración 6. Mapa de rutas de transporte público colectivo en Ibagué. Fuente: Moovit App.....  | 62  |
| Ilustración 7. Metodología para realización del inventario de emisiones. Fuente: Elaboración propia.....   | 68  |
| Ilustración 8. Distribución de la flota por tecnología EURO. Fuente: Elaboración propia con base en datos SITSA S.A.....                                   | 72  |
| Ilustración 9. Distribución de actividad de la flota por tecnología. Fuente: Elaboración propia.....   | 75  |
| Ilustración 10. Aforos vehiculares. Fuente: Elaboración propia con base en aforos Ibagué. ....   | 76  |
| Ilustración 11. Distribución de emisiones de CO <sub>2</sub> por tecnología. Fuente: Elaboración propia.....   | 77  |
| Ilustración 12. Distribución de emisiones de CH <sub>4</sub> por tecnología. Fuente: Elaboración propia.....   | 78  |
| Ilustración 13. Distribución de emisiones de N <sub>2</sub> O por tecnología. Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV.....             | 79  |
| Ilustración 14. Mapa rutas contaminantes. Fuente: Elaboración propia.....  | 84  |
| Ilustración 15. Gráfica de emisiones de CO <sub>2</sub> vs velocidad. Fuente: Elaboración propia ..  | 86  |
| Ilustración 16. Metodología general. Fuente: Elaboración propia.....   | 91  |
| Ilustración 17. Precios de buses mercado internacional en dólares. Fuente:(Pierantonelli & Quintilla, 2019).....   | 93  |
| Ilustración 18. Características de buses chinos disponibles en el mercado latinoamericano. Fuente:.....  | 94  |
| Ilustración 19. Características buses eléctricos. Fuente: (Gil Velásquez, 2018).....   | 95  |
| Ilustración 20. Características de bus en estudio Ebus BYD. Fuente: (Ocampo González, 2019).....   | 96  |
| Ilustración 21. Costo instalación electrolinería. Fuente:(Gil Velásquez, 2018).....  | 97  |
| Ilustración 22. Comparación costos de operación. Fuente:(Ocampo González, 2019)....  | 98  |
| Ilustración 23. Características chasis bus convencional. Fuente: Chevrolet.....  | 99  |
| Ilustración 24. Carrocería de buses. Fuente: Busscar.....  | 100 |
| Ilustración 25. Elementos para la implementación de buses eléctricos en la ciudad de Ibagué. Fuente: Elaboración propia con base en (Li et al., 2019)..... | 111 |

---

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 26. Metodología general. Fuente: Elaboración propia. .... | 117 |
| Ilustración 27. Información meteorológica Ibagué.....                 | 123 |
| Ilustración 29. Características de viaje. ....                        | 123 |
| Ilustración 30. Especificaciones de combustible .....                 | 124 |
| Ilustración 31. Configuración de inventario .....                     | 125 |
| Ilustración 32. Datos de actividad .....                              | 125 |
| Ilustración 33. Datos de circulación. ....                            | 126 |

## Lista de tablas

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1. Características de operación de la flota. Fuente: Elaboración propia con base en datos SITSA S.A. ....        | 69          |
| Tabla 2. Normativa Euro. Fuente: Elaboración propia con base en (Autocrash, 2019)....                                  | 71          |
| Tabla 3. Clasificación de la flota por tecnología EURO. Fuente: Elaboración propia con base en datos SITSA S.A. ....   | 71          |
| Tabla 4. Datos ambientales Ibagué. Fuente: Elaboración propia con base en IDEAM. ...                                   | 73          |
| Tabla 5. Datos detallados de operación de la flota por tecnología. Fuente: Elaboración propia.....                     | 74          |
| Tabla 6. Datos de actividad de la flota de buses actual. Fuente: Elaboración propia. ....                              | 74          |
| Tabla 7. Resultados emisiones de CO <sub>2</sub> . Fuente: Elaboración propia con base en COPERT IV .....              | 77          |
| Tabla 8. Resultados emisiones CH <sub>4</sub> . Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV .....      | 77          |
| Tabla 9. Resultados emisiones N <sub>2</sub> O. Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV .....      | 78          |
| Tabla 10. Factor de emisión CO <sub>2</sub> . Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV .....        | 79          |
| Tabla 11. Factor de emisión CH <sub>4</sub> . Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV. ....        | 80          |
| Tabla 12. Factor de emisión N <sub>2</sub> O. Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV .....        | 80          |
| Tabla 13. Factores de emisión y emisiones de los GEI. Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV..... | 80          |
| Tabla 14. CO <sub>2</sub> emitido por ruta y tecnología. Fuente: Elaboración propia.....                               | 83          |
| Tabla 15. Factores de emisión por velocidad estudio de Manizales. Fuente: Elaboración propia.....                      | 85          |
| Tabla 16. Comparación de resultados. Fuente: Elaboración propia .....  | 86          |
| Tabla 17. Comparación factor de emisión con resultados Bogotá. Fuente: El autor.....                                   | 87          |
| Tabla 18. Comparación de emisiones con estudio Villavicencio. Fuente: El autor.....                                    | 88          |
| Tabla 19. Comparación de emisiones con estudio Valle de Aburrá. Fuente: El autor.....                                  | 89          |
| Tabla 20. Comparación de resultados emisiones estudio Manizales. Fuente: El autor....                                  | 90          |
| Tabla 21. Precio bus convencional. Fuente: El autor .....  | 100         |
| Tabla 22. Comparación de precios periodo 15 años. Fuente: El autor. ....   | 101         |
| Tabla 23. Implementación buses eléctricos en Ibagué. Fuente: Elaboración propia.....                                   | 116         |

## Lista de Símbolos y abreviaturas

### Símbolos con letras latinas

| <b>Símbolo</b> | <b>Término</b>  |
|----------------|---|
| <i>COPERT</i>  | Calculation of Emissions from Road Transport                      |
| <i>CCS</i>     | Estándar sobre Declaración de Contenido                           |
| <i>CMNUCC</i>  | Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático |
| <i>COP21</i>   | Conferencia sobre el Cambio Climático de París                    |
| <i>DANE</i>    | Departamento Administrativo Nacional de Estadística               |
| <i>EEA</i>     | Espacio Económico Europeo   |
| <i>GEI</i>     | Gas de Efecto Invernadero   |
| <i>GLP</i>     | Gas licuado de petróleo   |
| <i>HFC</i>     | Hidrofluorocarbonos   |
| <i>IPCC</i>    | Panel Intergubernamental del Cambio Climático                     |
| <i>ISSRC</i>   | International Sustainable Systems Research Center                 |
| <i>IVE</i>     | Modelo Internacional de Emisiones Vehiculares                     |
| <i>LEAP</i>    | Longe-range Energy Alternatives Planning System                   |
| <i>MOVES</i>   | Motor Vehicle Emission Simulator                                  |
| <i>PNUD</i>    | Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo                |
| <i>PPM</i>     | Partes por millón   |
| <i>SINGEI</i>  | Sistema de Inventarios Nacional de Gases de Efecto Invernadero    |
| <i>SITSA</i>   | Sistemas Integrados de Transporte SA                              |
| <i>SMBYC</i>   | Sistema de Monitorio de Bosque y Carbono                          |
| <i>USEPA</i>   | United States Environmental Protection Agency                     |

### Subíndices

| <b>Subíndice</b> | <b>Término</b>     |
|------------------|--------------------|
| $CO_2$           | Dióxido de carbono |
| $N_2O$           | Óxido nitroso      |
| $CH_4$           | Metano             |

# 1. Introducción

Con el pasar de los años el ser humano ha explotado un sin número de recursos que ofrece el planeta, esto junto con el aumento de la población empieza a causar estragos en el ambiente además de entrar en el fenómeno del calentamiento global y sus drásticas consecuencias que no solo afectan al medio ambiente sino a toda la población, esto como consecuencia de la gran cantidad de gases de efecto invernadero retenidos por la atmósfera que hacen que suba la temperatura de la tierra con cada año que pasa, causado principalmente por la combustión de fósiles que son carbón, petróleo y gas. A pesar de que la emisión de estos gases es un proceso natural los humanos lo hemos llevado a un punto insostenible, lo que permite visualizar la necesidad de brindar soluciones que permitan reducir sus efectos tanto a largo como a corto plazo (Ballesteros Benavides & Leon Aristizabal, 2007).

Son varios los sectores de la economía que aportan gran cantidad de emisiones a la atmósfera en todo el mundo, entre ellos destaca el sector del transporte que representa más del 14% de las emisiones de gases de efecto invernadero y que preocupa especialmente porque es el sector que crece con más rapidez y del cual se espera un aumento significativo para los próximos años. Una alternativa que se ha dado a esta problemática es potencializar el transporte público colectivo, incentivar a utilizar fuentes de transporte alternativos y la implementación de vehículos eléctricos que en su operación reducen hasta un 100% las emisiones de estos gases (Segura, 2007).

El caso de estudio se enfoca en la ciudad de Ibagué que está ubicada en el centro occidente de Colombia, que cuenta con un poco más de medio millón de habitantes, y destaca por su ubicación estratégica para la conexión de diferentes regiones en el país; el transporte público colectivo brindado actualmente se desarrolla en buses de menos de 15 toneladas que transportan a sus ciudadanos a diario, su flota cuenta con un poco más de 800 buses que cubren gran parte de la ciudad brindándole a la población la posibilidad de movilizarse, estos buses funcionan a diésel y su modelo es del año 2000 en adelante.

Para conocer la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que se emiten a la atmósfera por algún tipo de flota o de vehículos de determinado territorio es necesaria la realización de un inventario de emisiones, esto conociendo las características de la flota y otros datos de su respectivo lugar de estudio, generalmente se realiza por medio de modelos o software que se encargan de realizar las operaciones correspondientes para conocer la cantidad de emisiones y con esto poder realizar análisis que permitan no solo informar sino también realizar planes con lo que se logre la reducción de estas.

En general, este tipo de proyectos no cuentan con suficiente auge a nivel mundial, pero se conocen casos exitosos específicos de países como China que impulsaron hace un poco más de una década este tipo de proyectos y que hoy en día pueden dar fe de su éxito, y que permiten conocer aspectos importantes para la implementación en otras ciudades (Vived, 2018).

Inicialmente se plantea la conceptualización de la problemática del calentamiento global teniendo en cuenta el aporte de emisiones tanto a escala mundial como local, consecuencias tanto a la salud humana como al planeta, compromisos nacionales e internacionales para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y la conceptualización de los vehículos eléctricos con sus ventajas y desventajas generales en el capítulo 2, asimismo, casos exitosos de implementación de este tipo de vehículos y políticas en pro de la reducción de emisiones e implementación de nuevas tecnologías al transporte.

Basados en los objetivos planteados para el presente estudio, inicialmente se tiene la realización de la estimación del inventario de emisiones de GEI que es producido actualmente por la flota de transporte público, este tema es abordado en el capítulo 3 donde inicialmente se conceptualiza sobre el lugar de estudio y el software utilizado, para finalmente conocer los datos iniciales característicos de la flota actual necesarios para la realización del inventario de emisiones, su desarrollo y análisis de resultados, con esto es posible conocer la cantidad de gases de efecto invernadero que dejarían de emitirse a la atmósfera en el caso hipotético de esta implementación; finalmente, el capítulo 4 permite mostrar un estudio de costos de estos buses de nuevas tecnologías y adicional a esto, plantear recomendaciones de alternativas de implementación paulatina de este tipo de vehículos en la ciudad de Ibagué.

En el caso de las metodologías europeas se manejan niveles de complejidad para la estimación de emisiones basados en la cantidad y calidad de la información con la que se cuenta para la realización de estos cálculos y el alcance que se espera, estos niveles se conocen como Tier, para el caso de estudio se utiliza la metodología Tier 3 la cual calcula las emisiones teniendo en cuenta datos confiables y el factor de actividad tiene en cuenta aspectos de operación del motor en frío y en caliente, es decir, en este caso se conocen datos como el kilometraje, la velocidad y la tecnología vehicular por lo cual se aplica la tecnología mencionada (Gaitán & Cárdenas, 2017).

Es importante resaltar la necesidad de implementar nuevas alternativas de transporte en todo el planeta que permita la reducción de emisiones a nivel global, se espera que este estudio aporte y motive a la utilización de nuevas tecnologías en el transporte, y a la realización de estudios e inventarios que permitan conocer el impacto actual de los vehículos convencionales al calentamiento global.

## **1.1. Justificación**

El desarrollo humano y las diferentes actividades diarias de las personas implican desplazamientos inevitables ya sea para acciones de producción, prestación de servicios, educación u otros motivos que junto con el aumento en la población implican el uso desmesurado de medios de transporte indispensables para el progreso pero que no cuenta con un correcto control de sus emisiones (Fernández & Gutiérrez, 2013). El sector transporte trae consigo variedad de externalidades que por lo general no se ven reflejados en los precios de mercado ya que no son tenidos en cuenta como costos a la sociedad y el ambiente, externalidades como congestión, accidentes y daños medio ambientales son factores que no se tienen en cuenta; es importante reconocer que la solución a estas externalidades no es directamente la erradicación del transporte sino el hacer posible que este sea de la forma más eficiente y logre un punto de equilibrio de sus costos con sus beneficios.(Fernández Fernández & Blanco, 2002)

Las externalidades ambientales del transporte tienen que ver con la contaminación atmosférica y acústica, tiene tres tipos de escala que son local, representado por el plomo, SO<sub>2</sub> y las partículas, escala regional que se evidencia con fenómenos como la acidificación y el ozono troposférico y a escala global que es la acumulación de GEI, que en conjunto afectan no solo el medio ambiente sino también la salud humana (Fernández Fernández & Blanco, 2002). Es importante reconocer las consecuencias de los gases de efecto invernadero tanto a corto como a largo plazo es por esto que se deben tener en cuenta no solo los contaminantes como el CO<sub>2</sub> que puede permanecer en la atmosfera con el pasar de los siglos y milenios, sino también los Contaminantes Climáticos de Vida Corta como el metano y los HFC cuya reducción resultaría como un aporte importante en evitar el aumento de la temperatura global (Hoffmann, 2016).

La emisión de contaminantes a la atmosfera no solo representa un peligro para el medio ambiente, sino también para la salud humana de todas las personas, y una de sus principales causas es la quema de combustibles fósiles, se ha demostrado que las emisiones de contaminantes en el aire se han elevado a nivel mundial un 8 % esto entre el año 2008 y 2013, se calcula que para el 2050 la principal causa de muerte infantil será debido a la inhalación de material articulado. La OMS afirma que más del 92% de la población en el mundo vive en lugares donde no se cuenta con la calidad de aire determinada por los límites establecidos, debido a esto se calcula que para el año 2015 más de 4 millones de personas murieron por enfermedades causadas con la mala calidad del aire (Duque, 2016).

El sector económico donde más rápido crecen las emisiones de efecto invernadero es el del transporte y se prevé que pronto se ubique en los principales contaminantes teniendo en cuenta el crecimiento del parque automotor, este es un tema complicado para abordar debido a que tiene varios implicados entre los cuales están los usuarios particulares, las administraciones políticas, la infraestructura, el transporte público entre otros, es por esto que se plantea que el principal problema del sector no es solo el crecimiento de la demanda y adquisición de vehículos sino también la necesidad de mitigar los efectos negativos de estos. Esto es un gran desafío teniendo en cuenta las tendencias del mercados que son motivadas por los fabricantes que hacen que se prefieran los vehículos convencionales tanto por su costo como su necesidad de infraestructura (Segura, 2007).

Para el año 2019 la venta de vehículos eléctricos represento solo el 2.5% de las ventas mundiales, y en el 2020 logro alcanzar el 4.2% (Mena Roa, 2021). Actualmente se calcula que la cantidad de vehículos en el planeta supera los 1.4 billones, de los cuales solo un poco más de 16 millones serían eléctricos, una muy pequeña parte en comparación, el combustible quemado anualmente en el transporte es igual en contaminación a quemar todo el carbón en un tren extendido a 304000 millas solo en un año, esto equivale a más de 2.8 billones de libras por año de dióxido de carbono (Kogan, 2019).

## **1.2. Alcance y metodología**

Como se planteó previamente en los objetivos del estudio generalmente se busca estimar el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero causadas por la operación del sistema de transporte público colectivo de la ciudad de Ibagué y evaluar las potenciales reducciones de emisiones con la implementación de una flota de buses 100% eléctricos. Este estudio espera impactar positivamente las decisiones que se toman en la planeación de programas de reducción de emisiones no solo en la ciudad de Ibagué sino en todo el territorio colombiano, que permitan visualizar y comparar los beneficios al medio ambiente y la salud humana que conlleva el implementar nuevas tecnologías al sistema de transporte público, trabajando en pro de los objetivos de la ley 1964 de 2019 que impone un plazo para la implementación de vehículos eléctricos o cero emisiones cuando se aumente la capacidad de las flotas de ciudades que cuenten con sistemas de transporte masivo empezando con un 10% de estos en la flota en 2025 alcanzando el 100% de estos para año 2035.

A continuación, por medio de la ilustración 1 se explica el desarrollo del presente estudio en una secuencia metodológica por capítulos, iniciando con la introducción en el primero donde se direcciona el alcance del estudio y su justificación, después de esto se conceptualiza el marco de referencia donde se tienen en cuenta aspectos generales del estudio de emisiones, sus consecuencias, compromisos a nivel nacional e internacional y conceptualización de los vehículos eléctricos con ejemplos de casos exitosos de implementación en otras ciudades.



Ilustración 1. Metodología general. Fuente: Elaboración propia.

Seguidamente se desarrolla el estudio conceptualizando sobre la ciudad de Ibagué y su actual flota de transporte público colectivo, esto con el fin de realizar la estimación del inventario de emisiones de GEI producido por la actual flota de transporte público colectivo teniendo en cuenta con esto el primer objetivo específico planteado para el presente estudio, para esto se tienen en cuenta datos representativos de la ciudad, entre estos su temperatura y horas pico; por otro lado se recolecta y organiza la información obtenida de la flota actual de buses, con sus despachos, cantidad de buses, tecnología, frecuencia, kilometraje recorrido en determinado lapso de tiempo, entre otros, que permiten conocer el factor de actividad necesario para la utilización del modelo COPERT IV, el cual finalmente brinda los resultados de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero producidos por la flota de buses de transporte público en la ciudad de Ibagué en el lapso de un año; con los datos obtenidos se hace una comparación de resultados con estudios realizados en otras ciudades, adicionalmente con estos resultados se conoce la reducción de emisiones de GEI que se tendría en operación en el caso hipotético de la

implementación de una flota eléctrica al sistema de transporte público colectivo de la ciudad, lo cual forma parte del segundo objetivo planteado para el estudio.

Posteriormente se analiza por medio de diferentes estudios el costo aproximado de la flota de buses eléctricos teniendo en cuenta datos de adquisición y de operación comparándolos con los costos de un bus convencional concluyendo con esto el alcance del segundo objetivo específico del estudio; por otro lado, se proponen una serie de recomendaciones para la implementación de este tipo de tecnología a la flota actual, finalmente se presentan conclusiones y recomendaciones del estudio actual; con estos aspectos definidos se confirma el cumplimiento de los objetivos planteados previamente para el estudio.

## 2.Marco de referencia

Para un correcto desarrollo del presente estudio se considera necesario realizar una investigación profunda de temas relevantes como lo son los Gases de Efecto invernadero y la conceptualización sobre vehículos eléctricos, este segundo capítulo pretende explicar lo que significa la emisión de estos gases y su efecto y relación con el cambio climático, la situación actual respecto al aporte del sector transporte al total de emisiones global y nacional; junto con esto se explica basado en diferentes estudios las consecuencias a corto y largo plazo que generan estos fenómenos no solo al medio ambiente sino también a la salud humana, causando no solo enfermedades sino también muertes prematuras a varias personas; estos son temas de gran significancia para lograr entender la necesidad de generar cambios considerables que permitan reducir la emisión de contaminantes.



Ilustración 2. Metodología general. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, es importante conocer que se está haciendo actualmente con el fin de controlar estas emisiones desmesuradas causadas por el sector transporte, conociendo los compromisos y planes gestionados tanto nacional como internacionalmente.

Habiendo conceptualizado el tema de emisiones y la necesidad de generar cambios, se llega al tema de alternativas como la promoción e implementación de vehículos eléctricos, es por ello que se hace una conceptualización de estos, dejando ver tanto sus ventajas como desventajas, se conocen también las políticas relacionadas con este tema y su aplicación, y finalmente se analiza el desarrollo de proyectos de buses eléctricos incorporados en la flota de transporte público llevados a cabo en cuatro ciudades del mundo las cuales han obtenido resultados positivos en materia de reducción de emisiones y ahorro de dinero a largo plazo.

## **2.1. Conceptualización de los Gases de Efecto Invernadero**

Una de las problemáticas más importantes a las que conlleva el uso del transporte en el mundo es la emisión de gases de efecto invernadero a la atmósfera, que impactan el planeta con el aumento de los efectos del calentamiento global. Es necesario reconocer también que los efectos de la emisión de estos gases se reflejan negativamente en problemas en la salud de los habitantes tanto a corto como a largo plazo y que hace necesaria la implementación de cambios en la forma en que nos transportamos (Ballesteros Benavides & Leon Aristizabal, 2007).

A pesar de las externalidades negativas que representa el transporte, este vive en constante aumento por la necesidad de desplazamiento de las personas y el aumento progresivo de la población, y con esto la necesidad de brindar alternativas de transporte que en Colombia se traducen en el aumento del parque automotor, factor importante para el aumento de emisiones de Gases de Efecto Invernadero debido a que estos son producidos por la combustión de fósiles utilizados en casi todos los vehículos que circulan hoy en el país (Espíndola & Valderrama, 2012).

Una de las principales causas de contaminación del aire es la combustión de fósiles donde la proveniente de los automóviles es la responsable de más del 60% de la concentración de estos contaminantes en el aire, esto ocurre cuando se enciende el motor de un vehículo

donde al interactuar la gasolina y el oxígeno generan tanto calor como dióxido de carbono y vapor de agua, que sumado a distintos factores se originan mayor cantidad de contaminantes en los gases expulsados que afectan tanto el ambiente como la salud humana (Ballesteros Benavides & Leon Aristizabal, 2007).

Para el caso de estudio actual se tendrá en cuenta el cambio climático relacionado directamente con las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), que son más específicamente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), óxido de nitrógeno ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Que son aquellos gases presentes en la atmosfera encargados de absorber la radiación infrarroja proveniente del sol, y que hace que se mantenga el calor en la tierra. A pesar de que el efecto invernadero es un proceso natural de la tierra e indispensable para la vida en esta, el problema radica en el aumento de las emisiones de forma desproporcionada, que hace que la tierra aumente su temperatura reteniendo más calor del necesario, esto producido por muchos procesos relacionados con el transporte, la electricidad, industria, agricultura, entre otros, consolidado además con el aumento desmesurado de la población que hace que aumenten los procesos de producción, explotación de recursos y la deforestación ya que los árboles son los encargados de disminuir el efecto de estos gases. Con esto se ha logrado que la temperatura de la tierra aumente en promedio  $0,18^\circ\text{C}$  por década y es la causa de fenómenos naturales como el deshielo de los polos y con esto el aumento de los niveles del mar, inundaciones, incendios forestales y desertificación (*Glosario Ambiental: ¿Qué Son Los Gases de Efecto Invernadero (GEI)?* | WWF, 2018)

## **2.2. Aporte del transporte en las emisiones de GEI**

### **2.2.1. Emisiones de GEI por el transporte escala mundial**

La quema desmesurada de combustibles fósiles ha hecho que se llegue a niveles insostenibles de emisiones y contaminación, haciendo que la concentración de gases de efecto invernadero alcance la cifra de 400 ppm, cifra nunca antes vista en 650.000 años, esto conlleva a un aumento de temperatura global de  $1^\circ\text{C}$ , que trae consecuencias

irreversibles tanto para el planeta como para la salud humana (Organización Meteorológica Mundial, 2019).

Se ha calculado que las emisiones de GEI causadas específicamente por acciones de la población humana alcanzo en el año 2017 un total de 50 mil millones de toneladas al año, 50 GtCO<sub>2</sub>e, de esta cantidad el sector transporte es responsable de aproximadamente 7 mil millones de toneladas, lo que representa el 14%, de este porcentaje, este se divide un 60% causado por el transporte de pasajeros y el 40% restante por el transporte de carga, sobre este el ultimo el transporte férreo aporta el 6%, el aéreo el 9%, el marítimo 17% y finalmente el terrestre emite el 57% (US EPA, n.d.).

#### EMISIONES GLOBALES POR SECTOR

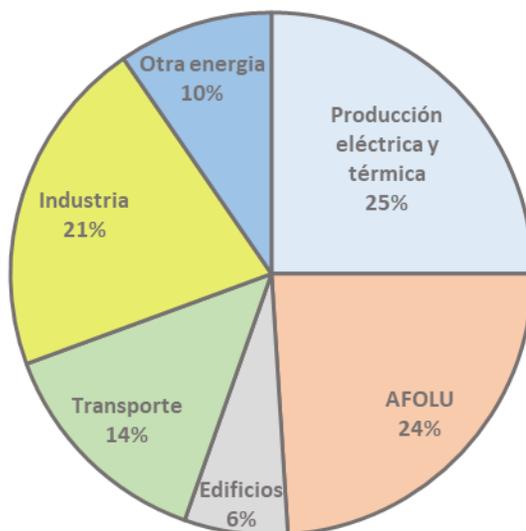


Ilustración 3. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero por sector económico. Fuente: IPCC (2014)

Según el informe del Centro Común de Investigación (JRC) sobre emisiones de CO<sub>2</sub> fósil y gases de efecto invernadero de todos los países del mundo se concluyó que para el año 2015 el mayor emisor de CO<sub>2</sub>eq a la atmosfera fue China con más de 13 millones de kilo toneladas, doblando al segundo lugar de la lista que es Estados Unidos seguido por la Unión europea, India y Rusia (*Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Por País y Sector (Infografía) | Noticias | Parlamento Europeo, 2018*).

Para el año 2017 según la AEMA, se pudo concluir que en la unión europea el mayor emisor de CO<sub>2</sub>eq fue Alemania alcanzando la cifra de 906.611 kilotoneladas de estos contaminantes para ese año, casi doblando el total de las emisiones del segundo país que más emitió CO<sub>2</sub>eq que fue Reino Unido seguido por Francia. El sector que más se destaca es el de la energía responsable de más del 80% de las emisiones, seguido por la industria, agricultura y por último la gestión de residuos; un tercio de las emisiones del sector de energía son producidas por el sector transporte es decir más del 20%. En este mismo estudio se pudo concluir que del total de las emisiones según el tipo de gas de efecto invernadero el 81% son de CO<sub>2</sub>, el 11% de metano, el 5% de N<sub>2</sub>O y solo el 2% de hidrofluorocarburos (*Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Por País y Sector (Infografía) | Noticias | Parlamento Europeo, 2018*).

Según el Índice de Desempeño frente al Cambio Climático presentado en el año 2020, donde se monitorea de manera independiente gran cantidad de países revisando su progreso o retroceso y comparando sus acciones en pro del cambio climático y con esto exigir acción de los gobiernos, se pudo concluir que ningún país tiene un desempeño muy bueno, el que mejor maneja temas del cambio climático pero que no alcanza esta clasificación es Suecia, seguido de Dinamarca, esto basándose principalmente en las emisiones de GEI, teniendo en cuenta también pero con menos porcentaje la utilización de energías renovables, el uso de energía y las políticas llevadas a cabo. Por otro lado, los países de peor desempeño son Taiwán, Arabia Saudita y Estados Unidos (Burck et al., 2020).

El aumento de concentración de los gases de efecto invernadero en la atmosfera ha sido desmesurado y preocupante, según la organización Meteorológica Mundial, para el año 2018 estas concentraciones alcanzaron niveles record, aumentando el CO<sub>2</sub> un 147%, el metano 259% y el N<sub>2</sub>O 123%, se han excedido niveles que se consideraban críticos, informando también que de no reducir estas emisiones las consecuencias en la tierra serían de gran magnitud (*Se Alcanzan Niveles Récord de Concentración de Gases de Efecto Invernadero En La Atmósfera | Noticias ONU, 2019*).

Según un informe del banco mundial, actualmente el sector transporte representa el 23% de las emisiones mundiales de GEI provenientes de combustibles fósiles, que podría llegar al 30% si se siguen con las tendencias de crecimiento y uso de vehículos convencionales,

la importancia del transporte no solo se basa en su operación sino en el papel indispensable que cumple en temas de desarrollo humano, social y económico, es por esto que logrando objetivos de movilidad sostenible supondría para el año 2050 un ahorro de 70 billones de dólares tanto en costos de transporte, combustible, operación, congestión, entre otros (BANCO MUNDIAL, 2021).

La ONU asegura que es necesaria una acción inmediata basada en procesos de eficiencia energética, uso de tecnologías innovadoras, reducción en la explotación de recursos, y específicamente en el tema del transporte hace énfasis en las ciudades y su necesidad de cambiar su planificación, basándolas en las personas y no en base a los vehículos como se ha hecho a través del tiempo, propone también la importancia de tener en cuenta el transporte público invirtiendo en su electrificación, incentivar las rutas peatonales y proteger y aumentar los carriles para bicicletas, como dato importante se menciona una posible reducción de hasta 250 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> para el año 2030 si se logra la electrificación del transporte público, además de las mejoras en salud para los ciudadanos (Naciones Unidas, 2019).

Un nuevo informe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente asegura que la tierra está de camino a una catástrofe climática superior a los 3 grados centígrados, es por esto que sugiere soluciones inmediatas basadas en una recuperación verde que implica la reducción de subsidios a combustibles fósiles, eliminación de plantas de carbón y trabajo conjunto en tecnologías y nuevas infraestructuras, además de un importante trabajo de reforestación (Naciones Unidas, 2020).

Para el año 2018 las emisiones de GEI a nivel mundial alcanzaron los 41.000 millones de Mton de CO<sub>2</sub>eq, ocupando Colombia el puesto 34 entre los 184 países monitoreados, aportando el 0,57% de las emisiones mundiales y ocupando el quinto lugar en el ranking de América Latina siguiendo a Brasil, México, Argentina y Venezuela (IDEAM et al., 2016).

En general en los informes se resalta la importancia de tomar acciones de mejora de forma inmediata para el sector transporte, ya que a pesar de no ser el principal emisor de GEI es quien tiene más rápido crecimiento, y que además las consecuencias del uso de vehículos convencionales no solo se limitan a afectaciones al medio ambiente, sino que tiene implicación relevante relacionada con enfermedades y afecciones para la salud humana. Es por esto que ya varios países especialmente europeos prevén para entre 2030 y 2040

prohibir la compra de vehículos a base de combustión de fósiles y desde ya motivan a la compra y uso de vehículos eléctricos, además de implementarlos en sus flotas de transporte público colectivo (*Why Does Electric Mobility Matter? | UNEP - UN Environment Programme*, n.d.).

### **2.2.2. Emisiones de GEI del transporte escala nacional**

Para el año 2016 se realizó el inventario de emisiones en Colombia construido con estándares internacionales del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC), en el cual se hace un análisis general y departamental de las emisiones de GEI, esto con el fin de lograr elaborar planes de acción para mitigarlos y aportar a la meta global de evitar llegar a un incremento de 2°C en la temperatura media del planeta, allí se contemplaron 4 módulos propuestos por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC): energía, residuos, Procesos Industriales y Uso de Productos (IPPU) , y AFOLU (Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la tierra). Nuestro país de acuerdo con las emisiones reportadas ocupó el puesto número 40 de los 184 países que monitorea el Instituto Mundial de Recursos del Banco Mundial (WRI) y el 5 lugar en América latina (IDEAM et al., 2016).

En un comunicado reciente del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (UNEP) se plantea que para lograr los objetivos planteados en el acuerdo de Paris en el año 2015 y evitar consecuencias catastróficas es necesario reducir las emisiones 7,6% anual implementar políticas, proyectos y demás acciones que permitan como objetivo principal reducir las emisiones de GEI y a su vez preservar y aumentar los ecosistemas que absorben CO<sub>2</sub>; ya que no se está cumpliendo con los compromisos adquiridos y cada vez la cantidad de emisiones sigue aumentando en el planeta (ONU, 2019b).

Las emisiones per cápita para el país en el año 2016 fueron de 4 toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente por habitante y con esto ocupa el puesto 105 a nivel global en este tipo de emisiones por persona (IDEAM et al., 2016). Para el año 2017 el mayor consumidor de la energía del país fue el transporte con un 39.8% suministrado en un casi 94% por los derivados del petróleo, seguido por los sectores de la industria, el sector residencial entre

otros de menor incidencia (DNP, 2017). La influencia del transporte en las emisiones se ve representada principalmente en el módulo de energía quien tiene un incremento anual del 3%, y con menos porcentaje en el módulo de los IPPU, emitiendo CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> Y N<sub>2</sub>O en la quema de combustibles para todo tipo. Este sector del transporte junto con el forestal y el agropecuario son quienes más aportan a las emisiones de GEI, entre estos el agropecuario genera a su vez las mayores absorciones y el sector forestal desde el 2005 ha reducido sus emisiones, mientras que el sector del transporte no ha tenido ningún avance positivo (IDEAM et al., 2016).

A nivel departamental en Colombia el departamento que más aporta emisiones de GEI es el de Antioquia, mientras que el departamento del Tolima se ubica en el puesto número 14 a nivel nacional con 6,97 Mton CO<sub>2</sub> eq; entre los 3 sectores que más aportan se encuentra en primer lugar las industrias manufactureras y de la construcción, seguido de las remociones de leña y carbono de los suelos en bosques naturales y en tercer lugar el uso de combustibles en transporte terrestre aportando el 13,35% de las emisiones en el departamento, a su vez el Tolima tiene gran cantidad de absorciones de CO<sub>2</sub> esto es debido a los cultivos permanentes que allí se encuentran, ya que el Tolima tiene en su territorio cultivado el 12% del área nacional del cultivo de café (IDEAM et al., 2016).

El transporte a nivel nacional en el módulo de energía es el que aporta mayor número de emisiones juntando el 38% del total de este módulo, seguido por las industrias de la energía con un 23%; en el grupo del transporte el mayor emisor es el transporte terrestre consumidor de diésel o gasolina sin distinguir de tamaño ni función; para el 2012 las emisiones por parte del transporte terrestre fueron en promedio el 91% de las emisiones totales del transporte en general, seguido por el sector de la aviación, el marítimo, el fluvial y de ferrocarriles (IDEAM et al., 2016).

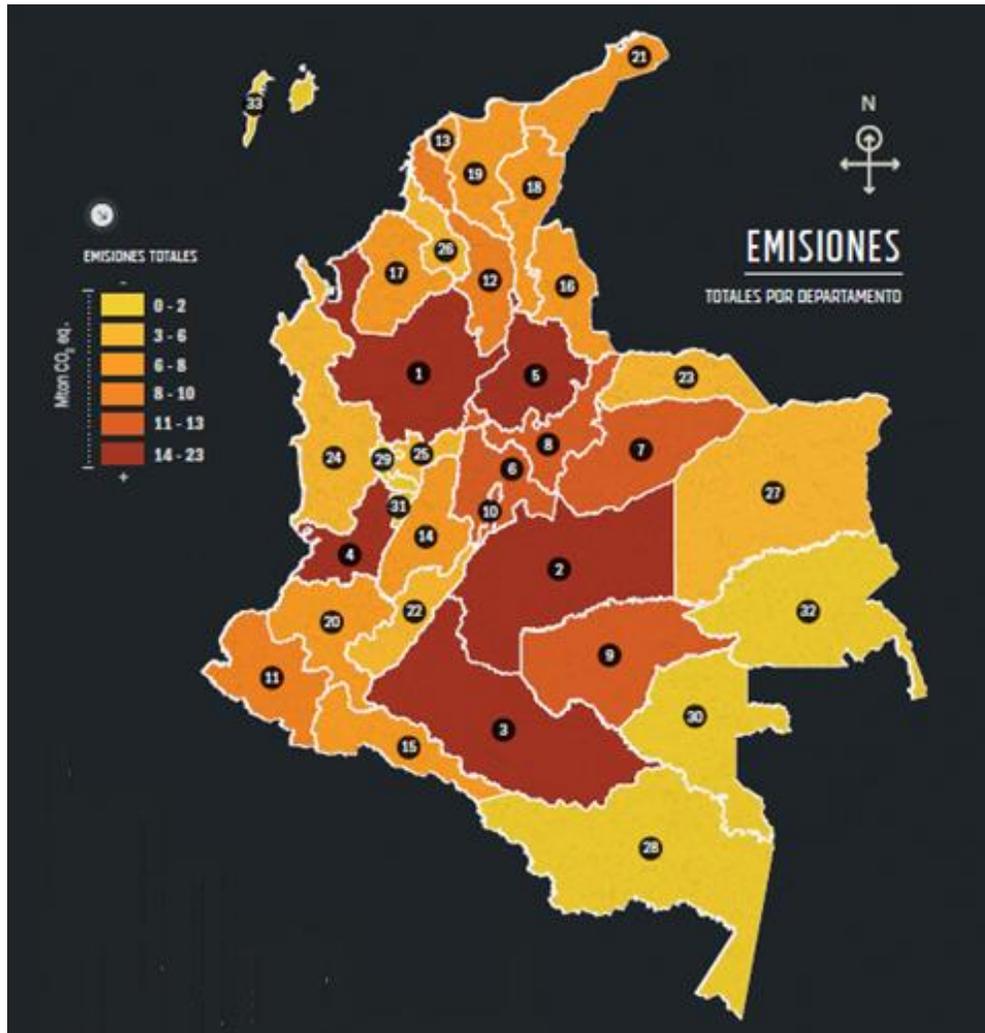


Ilustración 4. Emisiones por departamento.

Fuente: IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA. (2016). *Inventario nacional y departamental de Gases Efecto Invernadero – Colombia*. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá D.C., Colombia.

A nivel nacional como se observa en el mapa de emisiones los cuatro departamentos que más emiten gases de efecto invernadero a la atmósfera, entre 14 y 23 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq, son en primer lugar Antioquia con 22,94 millones de toneladas, seguido de meta, Caquetá y valle del cauca, los departamentos que menos emiten gases de este tipo a la atmósfera son el archipiélago de san Andrés y providencia, Guainía,

Quindío y Vaupés. Estos datos son de emisiones provenientes de todo tipo de fuentes, totalizándolas (IDEAM et al., 2016).

A nivel local a pesar de que el departamento que más emite gases de efecto invernadero a nivel nacional es Antioquia, al analizar solo el sector transporte la ciudad más contaminante en este aspecto es Bogotá con 6,14 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq, doblando en cantidad de gases al departamento de Antioquia que ocupa el segundo lugar de este listado; Mientras que los departamentos que menos emiten son en primer lugar Vaupés con menos de 0,01 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq, seguido por Guainía y Vichada (IDEAM et al., 2016).

Actualmente se han hecho algunos avances en cuanto aplicación de nuevas tecnologías menos contaminantes en distintas ciudades principales del país que le han apostado a la utilización de buses híbridos que reducen las emisiones en un 30% en comparación con los convencionales y algunos apostándole a los buses eléctricos que en operación disminuyen el 100% de las emisiones y que además reducen los gastos en combustible (Motoa Franco, 2018).

Por otro lado, en lo referente a los planes para la implementación de vehículos de cero y bajas emisiones, solo menos del 0,5% del parque automotor utilizan este tipo de tecnologías, se puede decir que los incentivos económicos y tributarios no son suficientes ya que este tipo de vehículos son hasta 3 veces más costosos en su compra que los tradicionales, adicional a esto, se tienen límites de cupos anuales para este tipo de importación por lo que se impide la compra de grandes cantidades, entre otros. Esto se evidencia en la mínima cantidad de estos vehículos que se encuentra en circulación (DNP, 2018).

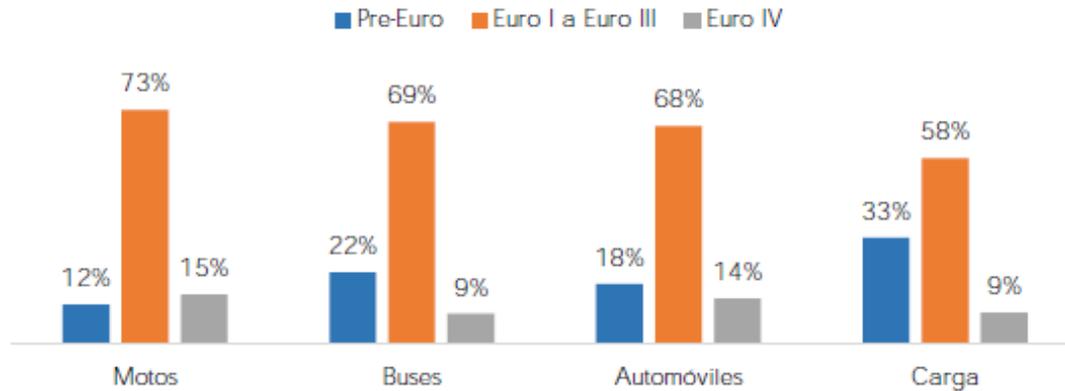


Ilustración 5. Tecnología de vehículos diésel según clase Fuente: Documento CONPES 3943 Política para el mejoramiento de la calidad del aire.

Según el documento CONPES 3943, a pesar de los avances que se han hecho para mejorar la calidad de los combustibles para reducir la concentración de azufre tanto en el diésel como en la gasolina no se han logrado los objetivos propuestos debido a que el transporte de estos combustibles no es el adecuado y hace que pierda calidad en el trayecto y además de que la tecnología de los automotores no es la suficiente ya que son muy pocos los que cumplen con la tecnología Euro IV o superiores.

## 2.3. Consecuencias a corto y largo plazo de la emisión desmesurada de GEI

### 2.3.1. Consecuencias a la salud humana

La contaminación atmosférica trae consecuencias para la salud humana, aumenta el riesgo de padecer enfermedades respiratorias agudas como la neumonía, crónicas como el cáncer de pulmón y enfermedades cardio-vasculares; en 2012 les fueron atribuibles la muerte prematura de 7 millones de personas, 1 de cada 8 muertes en el mundo. El 91%

de estas muertes se producen en países de bajos y medios ingresos y podrían evitarse tomando medidas para la reducción de este tipo de contaminación (OMS, 2016), como recomendación al sector transporte por parte de la OMS se propone la adopción de métodos limpios de generación de electricidad, prioridad del transporte en sendas peatonales y bicicletas, el modo férreo para transporte de carga y pasajeros, y la implementación de vehículos con combustibles de bajas emisiones (OMS, 2018).

Según un reciente informe de la ONU con el pasar de los años y el aumento del cambio climático las personas que se van a ver más perjudicadas por este son las de las comunidades más pobres, se calcula que en todo el mundo hay aproximadamente 880 millones de personas en esta situación, las cuales serán las más afectadas en cuanto a inundaciones, deslizamientos y calor excesivo, una de las causas es la condiciones en las que viven normalmente con ubicaciones vulnerables, casas precarias y estructuras sin protección ante desastres y desagües. La población de los países en desarrollo son las que se verían más afectados por el cambio climático ya que por lo general no tienen infraestructura ni mecanismos para enfrentarse a fenómenos naturales de gran magnitud, además de que no cuentan con planes prioritarios para controlar el cambio climático (Naciones Unidas, 2019).

Está demostrado que solamente la quema de combustibles fósiles causan 4,5 millones de muertes al año y cuesta unos 2,9 billones de dólares, aproximadamente 8000 millones de dólares al día, en el estudio realizado por Greenpeace y el Centro de Investigación en Aire Limpio y energía, se tuvieron en cuenta tanto los costos sanitarios como de días de trabajo perdidos por enfermedad y las muertes prematuras, se calculan cerca de 40.000 muertes de menores de 5 años por exposición a contaminantes procedentes de la quema de combustibles y más de 16 millones de afectados por asma por esta misma razón (Sáez, 2020).

Fenómenos relacionados con el cambio climático afectaron a casi 62 millones de personas en 2018, centenares de muertes y millones de afectados por inundaciones con aproximadamente 49.000 millones de dólares en pérdidas y más de 1600 muertes asociadas con las olas de calor e incendios forestales; a su vez las grandes sequías han aumentado el hambre en el mundo, la cantidad de personas desnutridas ha subido a 821

millones debido en gran parte a las sequías asociadas con el fenómeno del niño, falta de alimentos y agua, además del agua en mal estado, más de dos millones de desplazados han sido a causa de desastres naturales. Está demostrado que en los países que son mayores emisores de GEI las complicaciones de salud causadas por la contaminación del aire cuestan un poco más del 4% del PIB de cada país (Energía y Sociedad, n.d.).

### **2.3.2. Consecuencias al planeta**

El cambio climático hace que el planeta tierra aumente gradualmente su temperatura lo que haría en un futuro no tan lejano que desapareciera el océano ártico, lo que ocasionaría la desaparición de los corales, que son de gran importancia para los ecosistemas y la tierra ya que son grandes amortiguadores de la producción de dióxido de carbono en el océano, adicional a esto, los riesgos por inundaciones se incrementarían a más del 100%, por otro lado, empeorarían las olas de calor extremas y con esto la afectación de gran cantidad de especies en todo el mundo (Masson-Delmotte et al., 2019).

Según el informe sobre El estado del Clima 2018 de la Organización Meteorológica Mundial se destaca el inminente aumento récord del nivel del mar y las temperaturas, que coincide con los niveles máximos alcanzados por los gases de efecto invernadero, estos fenómenos han traído como consecuencia la reducción de los hielos marinos, retrocesos de los glaciares, fenómenos naturales extremos, inundaciones devastadoras, se han alcanzado nuevos registros de temperatura máxima con fríos inusuales en América del Norte, Olas de calor en Australia y costos económicos grandes; se espera que el calentamiento global contribuya a la disminución de oxígeno en los océanos abiertos y costeros, adicional a esto, más del 90% de la energía de los gases de efecto invernadero se queda en los océanos batiendo récords de contenido de calor oceánico para el año 2017 en los primeros 700 metros de profundidad, para ese mismo año el nivel del mar aumento 3,7 milímetros en comparación al año anterior, además de esto al absorber cerca del 30% de las emisiones de dióxido de carbono el pH del océano ha venido cambiando con el pasar de los años en un proceso que se conoce como acidificación que afecta directamente su ecosistema (ONU, 2019a).

Estas junto con la pérdida de biodiversidad son solo algunas de las consecuencias del calentamiento global si no se logra controlar el aumento de la temperatura hasta solo 1,5 grados centígrados, según el informe del IPCC sobre el calentamiento global de 2018 que fue escrito por 91 investigadores de todo el mundo y basados en más de 600 estudios científicos. Se determinó que las consecuencias que antes se vislumbraban para después de los 50 años ahora se estiman para dentro de una década; como consecuencia de acumulación de gases de efecto invernadero solo entre el 2006 y 2015 la temperatura ha aumentado 0,87 grados, argumentan que es imprescindible el dejar de usar combustibles fósiles para evitar una catástrofe ecológica, para el año 2018 se debía empezar a reducir en grandes cantidades las emisiones de GEI (Masson-Delmotte et al., 2019), esto lleva a pensar en alternativas concretas para la reducción de emisiones que son definitivamente necesarias para la preservación de nuestro planeta.

## **2.4. Reducción de emisiones de GEI**

### **2.4.1. Compromisos internacionales**

Conforme han pasado los años y se han vislumbrado las consecuencias a corto y largo plazo del calentamiento global se han llevado a cabo diferentes tipos de reuniones y acuerdos entre países que junto con una lista de compromisos tratan de mitigar las consecuencias de esta problemática. Para el año 2015 tuvo lugar la Cumbre del Clima de París (COP21) así como la undécima sesión de las Conferencias de las Partes en calidad de reunión de las Partes del Protocolo de Kioto (COP-MP11), esta cumbre finalizó con el compromiso de la lucha contra el cambio climático a partir del 2020 por los 195 países de la convención Marco de Naciones Unidas sobre el cambio climático (CMNUCC) promoviendo economías bajas en emisiones por medio de la adopción del Acuerdo de París. Este acuerdo promueve objetivos para evitar el incremento de la temperatura medio mundial más de 2°C, también a reducir de manera significativa la cantidad de emisiones, al menos en un 20% en comparación a las proyectadas para el 2030, fomentar el intercambio de conocimiento, tecnología y financiamiento (García Arbelaez et al., 2015), y

establecer a su vez un equilibrio con las absorciones de GEI, aumentando la capacidad de adaptación de cada país esto contando con financiación y control de estos objetivos (Energía y Sociedad, n.d.).

### **2.4.2. Compromisos Nacionales**

A nivel Nacional es significativa la legislación que se ha planteado para tratar de reducir las emisiones provenientes de fuentes móviles, además de esto en el plan nacional de desarrollo actual en la sección de pactos transversales, se tiene un pacto por la sostenibilidad “producir conservando y conservar produciendo”, el cual busca un equilibrio entre el desarrollo productivo y la conservación del medio ambiente, asegurando así recursos naturales para las generaciones del futuro, allí se da a conocer en lo relacionado con esta política de reducción de emisiones que Colombia ocupa el puesto número 40 en el ranking de los países que más emiten gases de efecto invernadero en el mundo y otros diagnósticos relacionados con el medio ambiente, es por esto que allí se plantea como objetivo el implementar estrategias junto con recursos de tipo económicos para motivar a la sostenibilidad así como a la innovación para reducir los impactos ambientales, esto planteándose la meta de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en 36 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente, lo que es equivalente a transformar todos los vehículos de gasolina en el país a carros eléctricos . Adicional a esto se tiene un reto que es migrar hacia un transporte sostenible, ya que el 78% de las emisiones contaminantes al aire las aporta el sector transporte. Como estrategia para cumplir los objetivos planteados, se tiene el ejecutar las medidas que sean necesarias para la reducción efectiva de emisiones de gases de efecto invernadero con la meta de cumplir el acuerdo de París al año 2030.

Adicional a esto se tiene un reto que es migrar hacia un transporte sostenible, ya que el 78% de las emisiones contaminantes al aire las aporta el sector transporte. Como estrategia para cumplir los objetivos planteados se tiene el ejecutar las medidas que sean necesarias para la reducción efectiva de emisiones de gases de efecto invernadero con la meta de cumplir el acuerdo de París al año 2030.

Aunque existen diferentes alternativas para la reducción de estas emisiones, en el país cuentan con distintas barreras tanto económicas como gubernamentales que necesitan de regulación para lograr implementar esta estrategia, entre estos otros problemas se suman la baja calidad del servicio y las infraestructuras de transporte público que motivan a la compra masiva de vehículos privados.

Respecto a la mejora en general de la calidad del aire, el Consejo Nacional Ambiental en el año 2010 aprobó la política de Prevención y Control de la Contaminación del Aire, buscando alcanzar niveles adecuados en la calidad de este en un plan de acción a corto, mediano y largo plazo en un transcurso de 9 años, esto con el fin de proteger la salud y brindar bienestar a la población, a pesar de las acciones llevadas a cabo, por motivos de aumento poblacional y actividades económicas los niveles de contaminación no se han podido controlar y han estado en un aumento constante.

A nivel nacional para el año 1995 se aprueba el decreto 948 sobre el “*REGLAMENTO DE PROTECCIÓN Y CONTROL DE LA CALIDAD DEL AIRE*” mediante este se plantean normas y principios generales al igual que los mecanismos para prevención, control y atención de situaciones de contaminación del aire, allí se establecen los niveles de contaminación, tipos de contaminantes, y normas; específicamente en el capítulo IV se habla de las emisiones contaminantes de fuentes móviles donde se establecen las emisiones prohibidas, los límites de concentración de contaminantes, se tienen en cuenta los límites en emisiones a vehículos diésel y las tecnologías que deben tener los nuevos vehículos del parque automotor, al igual que el contenido de plomo y otros contaminantes en los combustibles. A su vez el capítulo VIII plantea los *MECANISMOS DE EVALUACIÓN Y CERTIFICACIÓN PARA FUENTES MÓVILES*, donde se establece la certificación de las fuentes móviles del cumplimiento de las normas de emisión para cada uno según su peso vehicular, también se establecen mecanismos para evaluación de los niveles de contaminantes emitidos por los vehículos.

Para el año 2000 se aprueba el “*PROTOCOLO DE KYOTO DE LA CONVENCIÓN MARCO DE LAS NACIONES UNIDAS SOBRE EL CAMBIO CLIMÁTICO*”, mediante la ley 629 persiguiendo distintos objetivos con el fin de promover el desarrollo sostenible y reducir las emisiones, donde se plantea la aplicación y elaboración de políticas que entre otras reduzcan o limiten las emisiones de los gases de efecto invernadero en el sector

transporte, también se tiene en cuenta el control de las emisiones generadas por los combustibles del transporte aéreo y marítimo internacional, esto junto con otros compromisos de prevención, control y mitigación del cambio climático.

Con la resolución 601 del año 2006 *“Por la cual se establece la Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia.”* Donde se busca garantizar un ambiente sano y que permita disminuir los riesgos en la salud humana causados por contaminantes que afectan la calidad del aire, aquí se desarrollan los niveles de contaminantes en la atmosfera máximos permisibles, también los procedimientos y programas tanto para medir la calidad del aire y reducir la contaminación de este y establecer los niveles de este tipo de contaminación.

En el año 2008 el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial aprueba la resolución número 910 *“Por la cual se reglamentan los niveles permisibles de emisión de contaminantes que deberán cumplir las fuentes móviles terrestres, se reglamenta el artículo 91 del Decreto 948 de 1995 y se adoptan otras disposiciones.”* Esta resolución además de establecer los niveles permisibles de emisiones esto teniendo en cuenta el modelo del vehículo y los tipos de combustibles, también establece los límites para motocicletas, motociclos y moto triciclos de dos y cuatro tiempos; Así mismo reglamenta requisitos y certificaciones para los vehículos y procedimientos para una correcta vigilancia y control de las fuentes móviles; esta resolución es modificada en el año 2013 por la resolución 1111, allí se cambian las excepciones incluidas en la resolución anterior, se modifican los límites máximos de emisión permisibles, se adopta la clasificación de vehículos automotores conforme a los ciclos de prueba de Estados Unidos y de la Unión Europea, entre otras modificaciones.

Para el año 2010 se adoptan las resoluciones 650 *“Por la cual se adopta el Protocolo para el Monitoreo y Seguimiento de la Calidad del Aire”* y 651 *“Por la cual se crea el Subsistema de Información sobre Calidad del Aire - SISAIRES”* donde se adoptan las metodologías y procedimientos por medio del Manual de Diseño y el Manual de Operación de Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire con los cuales se busca llevar a cabo acciones de monitoreo de la calidad del aire en todo el país, información que debe suministrarse a SISAIRES que es el subsistema de información sobre Calidad del Aire manejado por el

IDEAM para contar con los datos necesarios para la evaluación de políticas que ayuden a reducir y controlar la contaminación atmosférica.

En diciembre de este mismo año se aprueba la resolución número 2734 *“Por la cual se adoptan los requisitos y evidencias de contribución al desarrollo sostenible del país y se establece el procedimiento para la aprobación nacional de proyectos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que optan al Mecanismo de Desarrollo Limpio – MDL y se dictan otras disposiciones”* allí se reafirman las funciones del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, se establecen requisitos y procedimientos para la aprobación de proyectos, entre otras medidas.

Para el año 2010 se aprueba la *Política de prevención y Control de la Contaminación del aire*, que propone una gestión permanente sobre la calidad del aire contando con el apoyo de autoridades ambientales y teniendo en cuenta también a los generadores de emisiones contaminantes, así mismo se plantea la importancia de formular e implementar estrategias y planes que ayuden a prevenir, controlar y mitigar la generación de emisiones, a corto, mediano y largo plazo mediante metas medibles que permitan mitigar los efectos en la salud humana.

El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible aprueba la resolución 1541 en Noviembre de 2013 *“Por la cual se establecen los niveles permisibles de calidad del aire o de inmisión, el procedimiento para la evaluación de actividades que generan olores ofensivos y se dictan otras disposiciones”* aquí se tienen en cuenta temas como el procedimiento de la recepción de quejas por olores ofensivos, también los niveles permisibles de calidad del aire o de inmisión de sustancias y mezclas de sustancias de olores ofensivos y su evaluación y sus planes para reducción de impactos.

En el año 2016 se aprueba el decreto 298 *“por el cual se establece la organización y funcionamiento del Sistema Nacional de Cambio Climático y se dictan otras disposiciones”* este decreto establece el SISCLIMA- Sistema Nacional de Cambio Climático, con el objetivo de controlar y supervisar todas aquellas entidades, dictámenes y medidas adoptadas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de los gases de efecto

invernadero, con el apoyo y participación de instituciones públicas, privadas y sin ánimo de lucro.

En el 2017 se aprueba la Ley 1844 “*POR MEDIO DE LA CUAL SE APRUEBA EL «ACUERDO DE París», ADOPTADO EL 12 DE DICIEMBRE DE 2015, EN PARÍS FRANCIA*” que tiene como objetivo mantener el aumento de la temperatura por debajo de 2°C, aumentar capacidad de adaptación a los efectos del cambio climático y también promover un desarrollo con bajas emisiones de Gases de efecto Invernadero entre otros compromisos con el fin de disminuir las relaciones causales del cambio climático compartiendo la visión con todas las partes que componen este acuerdo sobre la importancia de mejorar la resiliencia al cambio climático y reducir las emisiones.

En el año 2018 se implementa la Ley 1931 “*Por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático*” esto en las decisiones de personas tanto públicas como privadas que permita adaptación al cambio climático junto con la mitigación de gases de efecto invernadero, con el fin de reducir efectos negativos en la población y ecosistemas del país, adicional a esto, orientar a la economía hacia un camino sustentable y bajo en carbono.

Con la resolución número 1447 del año 2018 “*Por la cual se reglamenta el sistema de monitoreo, reporte y verificación de las acciones de mitigación a nivel nacional de qué trata el artículo 175 de la Ley 1753 de 2015, y se dictan otras disposiciones*” se reglamentó el sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación de las acciones de mitigación en el país y quienes hacen parte de este sistema: el Registro Nacional de Reducción de las Emisiones de GEI (RENARE), el Sistema de Contabilidad de reducción y remoción de GEI, el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBByC) Y EL Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero (SINGEI), estos sistemas se encargan de obtener información sobre iniciativas acerca de mitigación de emisiones de GEI, el diseño de metodologías para monitorear estas acciones, hacer seguimiento y generar informes sobre el cumplimiento de distintos compromisos entre otras funciones. Esta resolución también busca formular programas y proyectos de mitigación de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, en 2018 se aprobó el documento CONPES 3943 *POLÍTICA PARA EL MEJORAMIENTO DE LA CALIDAD DEL AIRE*, donde se plantean diferentes objetivos

para la disminución de emisiones, entre estos se encuentra la intervención de esta política a las fuentes móviles que es similar en algunos de los proyectos planteados para llevar a cabo en esta política, pero diferenciándose en el nivel de profundidad que se llevara a cabo en este Conpes, incluyendo nuevas estrategias que no solo mitiguen las emisiones ya emitidas sino que ayude a prevenir emisiones futuras y que incentive a la población a participar en esta reducción de emisiones.

Actualmente, en Colombia se cuenta con la norma nacional de calidad de Combustibles la cual define parámetros mínimos de calidad de los combustibles en el territorio nacional, teniendo en cuenta las recomendaciones hechas por la OMS adoptando la resolución 2254 del 2017 con la que se ajustaron los niveles máximos permisibles de contaminantes, que busca minimizar los riesgos de estas sustancias en la salud humana. Se busca reducir cada vez más la cantidad de azufre en el combustible esto empezando en el año 2020 con un máximo de 20 ppm en diésel y 100ppm en gasolina, al siguiente año de 10 a 15 ppm en diésel y 50 ppm en gasolina; para el 2025, diésel de 10 ppm y para el año 2030 gasolina de 10 ppm (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018). En lo referente a la calidad del Diesel en Colombia este se tiene como uno de los más limpios del mundo, al contrario de la calidad de la gasolina que no resalta por ser buena.

En 2019 mediante la Ley 1972 *"POR MEDIO DE LA CUAL SE ESTABLECE LA PROTECCIÓN DE LOS DERECHOS A LA SALUD Y AL MEDIO AMBIENTE SANO ESTABLECIENDO MEDIDAS TENDIENTES A LA REDUCCIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES DE FUENTES MÓVILES Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES"* se busca resguardar la salud de los habitantes y se plantean medidas para la reducción de emisiones contaminantes al aire provenientes de fuentes móviles, haciendo énfasis en el material particulado, teniendo en cuenta la mejora en la calidad de los combustibles, para el año 2023 los vehículos nuevos deben cumplir con tecnologías Euro VI o superiores así mismo los vehículos en circulación a partir del año 2035, para las motocicletas se establece que a partir del 2021 deberán cumplir con la emisión de contaminantes máxima permitida según la tecnología Euro 3 o superior; entre otros temas, como los mecanismos a utilizar para verificar el cumplimiento, la implementación de sistemas de Autodiagnóstico a Bordo, la promoción del transporte sostenible con energías renovables, la necesidad de integrar

una Comisión Intersectorial de Calidad del Aire y el fomento a instituciones para participar en lograr soluciones a este tipo de problemática.

En el año 2020 se realiza la actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC) la cual busca definir metas para la gestión del cambio climático para la década comprendida entre 2020 y 2030, trabajando en conjunto a su vez con los objetivos de desarrollo sostenible y la Convención Marco de Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC) considerando temas como derechos humanos, equidad, igualdad de género, integridad de ecosistemas, protección de biodiversidad, erradicación de pobreza, entre otros aspectos.

Adicionalmente, en el segundo reporte bienal de actualización de Colombia ante la CMNUCC, se comprende un objetivo y las acciones que se han llevado a cabo y también aquellas que se tienen como meta en lo que a transporte eficiente y bajo en carbono se refiere, el cual entre sus medidas contempla la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (ENME) y NAMA MovE, esta busca estructurar medidas que permitan la implementación de la infraestructura necesaria para una correcta operación de vehículos eléctricos, cumpliendo con estándares que permitan la vinculación de este tipo de tecnología al transporte actual, entre sus objetivos comprende específicamente la implementación de taxis eléctricos en las principales ciudades del país, buses eléctricos e híbridos de servicio público, automóviles eléctricos, vehículos oficiales eléctricos y motos eléctricas.

Como se puede observar en asuntos de legislación el tema de emisiones y la reducción de estas esta conceptualizado, pero aun es necesario llegar al punto donde todas estas medidas se cumplan y a su vez sean más estrictas lo que permita un verdadero cambio y disminución del tipo de emisiones específicas de las fuentes móviles, varios de estos documentos han sido constantemente actualizados conforme pasa el tiempo y se dictaminan nuevas medidas y metas. A pesar de los esfuerzos no se ha logrado una política eficiente que demuestre con resultados la mejora en aspectos de emisiones falta más promoción de la utilización de energías no renovables, disminuir la dependencia a los combustibles fósiles, el apoyo al surgimiento de nuevas tecnologías que mitiguen impactos, se debe integrar al sector privado con el público y lograr alianzas que permitan ofrecer a los usuarios mejor calidad de productos y servicios además de la importancia de

una correcta información al ciudadano. Es necesario plantear metas claras a corto, mediano y largo plazo las cuales sean apoyadas con legislación y se haga una correcta verificación de su cumplimiento.

### **2.4.3. Compromisos municipales**

El BID (Banco interamericano de desarrollo) por medio de su programa de Ciudades Emergentes y Sostenibles (CES) y en convenio con Findeter en Colombia, desarrollaron para Ibagué un programa de sostenibilidad donde se plantean distintos objetivos y acciones a llevar a cabo para reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y otras formas de contaminación, apoyando el desarrollo de fuentes sostenibles de energía y la promoción de un transporte urbano sostenible (BID & Findeter, 2018):

1. Ambiental y cambio climático.
2. Desarrollo urbano Sostenible
3. Económica y social
4. Fiscal y gobernanza

Según la ONU, la región andina sería una de las más afectadas por el cambio climático, es por esto por lo que consideran que las regiones como Ibagué son más relevantes para la implementación de nuevos planes y políticas que busquen la mitigación de este. En este caso el enfoque se hará en las dos primeras dimensiones antes mencionadas, para la Ambiental y del cambio climático, que a su vez se divide en tres pilares, “i) El manejo y consumo sostenible de recursos naturales; ii) mitigación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y otras formas de contaminación, junto con el uso de fuentes sostenibles de energía; y iii) en la reducción de su vulnerabilidad frente a los peligros naturales, así como su adaptación a los efectos del cambio climático.” (BID & Findeter, 2018)Específicamente se adentrará en el segundo pilar donde por medio de la propuesta se busca plantear las ventajas que traería consigo la implementación de la tecnología al medio de transporte público convencional logrando con esto la reducción de emisiones GEI.

Para la dimensión del Desarrollo urbano Sostenible, se cuenta con dos aspectos “i) en la planificación del crecimiento y la provisión de un hábitat adecuado para sus ciudadanos; y ii) en la promoción de un transporte urbano sostenible” (BID & Findeter, 2018), enfocándose entonces este planteamiento a su vez en el segundo aspecto de esta dimensión donde se busca analizar una parte de este transporte urbano que es el colectivo.

## **2.5. Vehículos eléctricos**

El avance de la tecnología y la búsqueda de alternativas diferentes a la propulsión de combustibles fósiles para el funcionamiento del transporte ha hecho que se lleven a cabo distintas invenciones, entre estas una de las más destacadas los vehículos eléctricos, estos son aquellos que para la propulsión utilizan uno o más motores eléctricos o de tracción de corriente alterna o continua que se asocia a la electricidad producida desde una fuente de alimentación por medio de un cargador de batería, que normalmente suelen ser de iones de litio; los vehículos eléctricos pueden ser de tres tipos dependiendo su forma de alimentación de energía, ya sea por una estación externa, energía almacenada o por un generador a bordo. Este tipo de vehículos es muy eficiente ya que a diferencia de los motores propulsados por combustibles fósiles no consume energía cuando no está en movimiento (Roas Valera, 2011).

La invención del vehículo eléctrico data del siglo XIX en la década de 1930, se puede decir que antes de los vehículos a base de combustión de fósiles, pero no fue muy relevante, la tecnología eléctrica solo se mantuvo para propulsión de trenes o vehículos más pequeños. Todo inicia en el año 1828 cuando Anyos Jedlik crea el primer motor eléctrico, para que años después Thomas Davenport le incorpore una batería de la cual este se pudiera alimentar, posteriormente Robert Anderson incorpora este motor eléctrico a un carruaje, y ya para el año 1837 Robert Davinson es quien logra construir la primera locomotora eléctrica, esta podía alcanzar una velocidad de hasta 6 km/ hr, para esta época la batería era de un solo uso, hasta 1859 que apareció la batería recargable, a partir de esto se hacen varias mejoras que se ven en las distintas exposiciones realizadas en Francia, como la exposición Mundial de Paris, y la Exposición Internacional de la Electricidad de Paris, Nikola Tesla tiene un papel importante en la historia del vehículo eléctrico quien en 1888 presenta en el Instituto de Ingenieros de la Universidad de Columbia el motor de corriente

alterna, para que finalmente en el año 1894 Henry Morris y Pedro Salom lograran la creación del primer vehículo eléctrico funcional. Para inicios del siglo XX la comercialización de los vehículos eléctricos era mucho mayor que la de los vehículos de combustión, pero para la década de los 20' los vehículos a combustión terminan imponiéndose sobre los vehículos eléctricos debido al abaratamiento del combustible y a que los vehículos de esta clase redujeron su precio más del 50%, siendo más accesibles para la población, lo que impulsó su crecimiento. Por un tiempo la investigación y producción de vehículos a base de electricidad se reduce al máximo, resurgiendo un poco en épocas como la segunda guerra mundial, cuando el petróleo fue escaso, al igual que en la importante crisis del petróleo en 1973, lo que propicia la investigación de motores eléctricos y se empieza a tomar en cuenta temas ambientales que motivan a la búsqueda de alternativas de transporte menos contaminantes; en la década de los 90 varias marcas como Renault, Peugeot, Honda, Toyota y Ford empiezan a seguir iniciativas de producción de vehículos eléctricos, pero para finales de esta década la industria petrolera logra nuevamente sepultar estas iniciativas, aproximadamente después del año 2007 vuelven a tomar fuerza hasta la actualidad siendo muchos los fabricantes que producen este tipo de vehículos motivados en gran parte por la creciente contaminación atmosférica (Quiros Aparicio, 2018).

Los vehículos eléctricos cuentan con transformadores que convierte la corriente alterna en continua y de esta forma es almacenada y acumulada en las baterías, mientras que los controladores regulan la energía de recarga del motor y comprueba el correcto funcionamiento. Se pueden distinguir tres tipos de vehículos Eléctricos, de batería, que es aquel que se mueve por motores que son propulsados por una batería que se recarga desde la red incorporando un sistema de recuperación cinética, por otra parte están los vehículos eléctricos de pila de hidrogeno, aquellos que utilizan una pila de combustible de hidrogeno que obtiene su energía de la reacción química que se produce en su interior y no de una batería, y por otro lado los eléctricos de batería extendida, aquellos que cuentan con 2 tipos de motor uno eléctrico y otro a gasolina, donde el motor a gasolina funciona como generador eléctrico que produce la energía necesaria para recargar la batería, batería que también puede conectarse y recargarse a la red, cuando la batería necesita recargarse nuevamente el motor a gasolina empieza a trabajar (Plaza, 2020).

En lo que respecta a los vehículos que deben conectarse se distinguen 2 tipos de carga según el lugar, la vinculada que es normalmente semirápida y realizada en un punto específico para el vehículo, y la de oportunidad en puntos públicos de recarga. Puede realizarse de 3 modos, con enchufe doméstico, en un punto de carga definido con más potencia, o en un punto de carga rápida con más potencia y conectores específicos (Plaza, 2020).

Además de reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, los vehículos eléctricos se caracterizan por su nula emisión de partículas contaminantes, partículas que se encuentran relacionadas con diferentes tipos de enfermedades y afectaciones a la salud humana. Los vehículos eléctricos son más eficientes energéticamente ya que un motor de este tipo puede desarrollar una energía mecánica que puede alcanzar el 80% de la energía almacenada por la batería mientras que esta cantidad es muy baja en los automóviles convencionales. A nivel económico también representa un gran ahorro ya que el costo marginal de la producción de energía es casi 0 mientras que el precio de los combustibles varía según los mercados internacionales. En una comparación se puede decir que un vehículo de combustión tiene un gasto de 7,5 euros por cada 100 km mientras que el gasto de un vehículo eléctrico sería de solo 1,5 euros por cada 100 km, disminuyendo los costos por recorrido cuatro veces (Sebastián, 2019).

A nivel mundial se han desarrollado diferentes tipos de proyectos de buses que ayuden a reducir las emisiones, entre estos resaltan dos tipos de buses, los híbridos y los eléctricos, los primeros son aquellos que cuentan con dos tipos de motores, uno de combustión y uno eléctrico, cada uno puede impulsar el vehículo de forma independiente; el motor eléctrico proporciona energía se recarga en las frenadas y en mayores velocidades el vehículo es impulsado por el motor de combustión, por estudios realizados en ciudades donde hay gran uso de estos vehículos como lo son Londres y Nueva York se puede decir que estos vehículos generan entre un 20% y 45% de ahorro de combustible, y en el caso específico de Bogotá comparando un autobús de Transmilenio diésel y un híbrido se puede deducir que se reduce en un 25% los gases de efecto invernadero (Grutter, 2014).

Por otro lado, en cuanto a las tecnologías utilizadas actualmente para la optimización de los autobuses de transporte público se encuentran los buses eléctricos que son aquellos propulsados por uno o más motores eléctricos donde la tracción puede ser proporcionada

por motores rotativos o de otros tipos, se suministra su energía de diferentes formas, una de estas es por alimentación externa con un aporte de energía constante durante todo el trayecto, más específicamente aquellos buses que tienen en la parte superior la conexión con dos cables, otra forma es por medio de una pila de combustible, producto en el vehículo que mediante su reacción química produce la electricidad necesaria para sus motores, la energía nuclear, la energía solar generada a bordo por medio de placas fotovoltaicas, y la energía eléctrica recargada a los vehículos cuando están estacionados (Grutter, 2014).

### **2.5.1. Ventajas**

Cero emisiones en su operación:

Los vehículos eléctricos son una excelente alternativa para la reducción de emisiones ya que en su funcionamiento y vida útil no emiten ningún gas contaminante a la atmósfera. Traen beneficios medio ambientales ya que no requieren de combustión, el cambio de estos vehículos tendría un efecto de gran magnitud, ya que normalmente en un trayecto de 15 km un vehículo convencional emite 2,4 kg de gases contaminantes, mientras que en el mismo trayecto un vehículo eléctrico solo emite 0,7 kg.

Beneficio a la salud de la población:

En el 2014 2,7 millones de personas habrían muerto prematuramente por efectos de la contaminación atmosférica producto de los motores de los vehículos, además de los efectos ya analizados de las consecuencias a largo plazo de la utilización desmesurada y descontrolada del transporte a base de combustión de fósiles.

Disminución de complicaciones mecánicas:

Debido a su sistema que cuenta con muy pocos elementos en movimiento lo que hace que se reduzcan en gran parte los problemas mecánicos, ya que estos vehículos son más sencillos y con pocas partes.

Menor costo de mantenimiento:

Desaparecen casi por completo las revisiones de motor, el mantenimiento se reduce prácticamente a los frenos o neumáticos, no se cambian filtros ni lubricantes. (Quadis, n.d.)

#### Autonomía:

A pesar de que deben ser cargados o alimentados por una fuente de energía pueden cumplir pasar días sin necesidad de ser cargados. Algunos vehículos alcanzan hasta 500 km de autonomía.

#### Consumo mínimo:

No necesita ningún tipo de combustible, solo una recarga que puede ser en la noche y que equivale a un aproximado de 1 euro para cada 100 km.

#### Beneficios económicos:

En algunos países especialmente de la unión europea se motiva el uso de este tipo de vehículos brindándoles diferentes tipos de beneficios tales como aparcamiento gratuito, disminución en los impuestos, no pagar peajes, entre otros. Los gobiernos brindan diferentes descuentos y ayudas fiscales que motiven a la adquisición de vehículos eléctricos.

#### Disminución de ruido:

El ruido de los motores a combustión es generado por procesos como el escape de gas o mecanismo de combustión. Además de las ventajas en cuanto a la contaminación atmosférica que propician los buses eléctricos, estos también se destacan por su aporte auditivo ya que producen menos ruido que los convencionales, se dice que el 70% del ruido producido en un área metropolitana es causado por el transporte vehicular, este afecta la salud y calidad de vida, causando estrés, ansiedad y en algunas ocasiones daños auditivos, en Chile para el año 2019 se pudo comprobar que los buses eléctricos logran una diferencia de hasta 21 decibeles, lo que en comparación significa hasta 100 veces menos ruidosos que los buses convencionales a diésel (Christiansen, 2019).

#### Costos de energía:

Costo de energía mucho menor que el de la gasolina, especialmente en horas valle para cargar las baterías.

#### Características:

Los vehículos eléctricos no tienen caja de cambios, lo que supone más eficiencia, tampoco necesita embrague ni marcha atrás.

### **2.5.2. Desventajas**

Fuentes de energía:

Si no se generan alternativas de fuentes de energía renovables no se podría demostrar un cambio significativo en el tema de emisiones de GEI, ya que a pesar de la disminución de emisiones al cambiar de vehículos convencionales a eléctricos, el producir la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento o en la producción de baterías, muchas veces contamina de forma similar; a pesar de esto el cambio de tecnología significaría un avance importante que debe complementarse con implementación de sistemas de producción de energía de fuentes renovables que permitan la disminución de emisiones en todo el ciclo de vida de los vehículos de esta clase (Grutter, 2014).

Reciclaje de las baterías:

Son pocas las organizaciones que llevan a cabo el reciclaje de baterías como las de litio, igualmente estas se pueden reutilizar solo se debe organizar y promover la estructuración de procesos de reciclaje

Demasiado silenciosos:

Esto a pesar de ser un factor positivo para la contaminación acústica resulta en cierto grado un problema especialmente para los transeúntes debido a que al ser tan silenciosos no son advertidos por los oídos y pueden generar accidentes porque no se perciben cuando están cerca.

Costo de vehículo:

El costo del vehículo eléctrico supera considerablemente el costo de un vehículo convencional, a pesar de resultar más económico a largo plazo, su costo inicial es motivo

de preferencia de los otros vehículos sobre estos. Teniendo en cuenta de que si se motiva su uso y se masifican sus ventas este costo podría disminuir considerablemente

Dependencia a la batería:

Los vehículos eléctricos dependen de la capacidad y autonomía de las baterías y su energía es limitada y depende de la velocidad, conducción, peso, terreno y otros factores. Así mismo se necesita disponer de un tiempo para cargarse que en muchas ocasiones es relativamente largo, a pesar de esto según estudios se logra concluir que para la utilización promedio diaria de este tipo de vehículos una carga podría cubrirlos sin dificultad.

Puntos de carga:

No solo es importante la adquisición de vehículos eléctricos, sino que el estado debe disponer de la infraestructura necesaria para su correcta utilización y eficiencia que permita una experiencia agradable en los usuarios.

### **2.5.3. Políticas nacionales e internacionales para la electrificación del transporte**

En el ámbito internacional se habló específicamente de vehículos eléctricos y su implementación, en el año 2018 cuando se llevó a cabo la conferencia de Cambio Climático de las Naciones Unidas en Katowice, Polonia, COP24. Allí se redactó una declaración “driving change together” con el compromiso de acelerar el desarrollo y uso de vehículos cero emisiones, promover el transporte público verde y realizar acciones que ayuden a mejorar la calidad del aire. Allí se motiva a los estados a la implementación de vehículos eléctricos, Polonia espera tener un millón de autos eléctricos para el 2025, y por otro lado, Reino Unido pretende erradicar por completo la venta de vehículos a diésel y gasolina para el año 2040, otros países como Sudáfrica se apuntan con compromisos en pro de la reducción de emisiones apuntándole a un 5% menos de estas provenientes del sector transporte para 2050, Ecuador e India, apostándole a la inversión en flotas de buses eléctricos, y Corea del sur quien pretende poner en circulación un millón de vehículos eléctricos en dos años. Además de esto, en esta conferencia se pide a los estados el realizar inversiones en proyectos que permitan crear electricidad, pero por medio de fuentes renovables, esto garantizaría los beneficios de los vehículos eléctricos que no

contaminarían en su operación ni en la obtención de la energía que necesitan para su funcionamiento. (Revista Energía , 2018)

En un panorama nacional, para el año 2019 en Colombia se promueve la Ley número 1964 *“POR MEDIO DE LA CUAL SE PROMUEVE EL USO DE VEHICULOS ELECTRICOS EN COLOMBIA Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES”* esta ley promueve el uso de vehículos eléctricos y de cero emisiones, esto con el fin principal de reducir las emisiones tanto contaminantes como las de gases de Efecto Invernadero, esto por medio de aplicación de impuestos mínimos sobre estos vehículos, descuentos en las revisiones técnico-mecánica, la solicitud de implementar incentivos al uso de estos vehículos como descuentos en los registros, en parqueaderos o exenciones tributarias, exención de medidas de restricción a la circulación vehicular, parqueaderos preferenciales, entre otros; para el año 2025 se deberá contar en el servicio de transporte público de los municipios de categoría 1 con mínimo del 10% de la flota conformada por vehículos eléctricos, con el objetivo de llegar al 2035 con el 100% de vehículos de este tipo, también se debe garantizar la existencia de un número de estaciones de carga rápida funcional por parte de estos municipios.

El plan nacional de desarrollo *“Pacto por Colombia pacto por la equidad”* 2018 - 2022, en la sección de pactos transversales, también hace alusión a la necesidad de migrar a un transporte sostenible y reducir las emisiones, se espera que para cumplir sus objetivos plantee nuevos planes de electrificación del transporte, necesario para lograr la meta planteada de reducir las emisiones en 36 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq. asimismo, se vislumbran alternativas como las tecnologías de propulsión eléctricas alimentadas de fuentes renovables, que durante todo el ciclo de vida útil de un camión puede reducir las emisiones hasta del 90%.

Un retroceso importante en el proceso de disminución de emisiones es el incentivo a seguir utilizando combustibles fósiles al ser subsidiados por el estado, anualmente se invierte en el mundo cerca del 6,5% del PIB en estos subsidios, en Colombia entre el año 2008 y 2014 según la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) el estado subsidio a estos combustibles con una suma de \$20,1 billones de pesos, a nivel mundial son de un

promedio de \$600.000 millones de dólares por año, mientras que el presupuesto devengado para las energías renovables son solo una sexta parte de los que son devengados para los combustibles fósiles, lo importante es que según The Overseas Development Institute por cada dólar que se invierte en estos subsidios a combustibles fósiles el retorno es solo de casi el 30% mientras que el retorno por un dólar invertido en energías renovables es de 125%.

#### **2.5.4. Casos exitosos de implementación de buses eléctricos**

A continuación se muestra el resultado de una investigación hecha para conocer casos exitosos de implementación de buses eléctricos en otras ciudades del mundo, brindando una información inicial de cada lugar de ubicación, su proceso de implementación de buses, las dificultades con las que se encontraron en este camino y sus soluciones, y asimismo los beneficios ambientales y en la salud humana que han obtenido con estos proyectos, se tiene en cuenta principalmente la ciudad de Shenzhen en China, mayor representante de incorporación de buses eléctricos al transporte público a nivel mundial contando con el 100% de esta con tecnología eléctrica, seguido por Chile y Bogotá que es en este momento la ciudad latinoamericana con mayor cantidad de buses eléctricos en su flota de transporte público.

##### *Shenzhen*

Esta ciudad está ubicada en la república popular China ubicada en la provincia de Guangdong, contaba para el 2016 con más de 11 millones de habitantes en un área de casi 2000 km<sup>2</sup>, toma su nombre debido a que se ubica en una región atravesada por ríos y donde en los arrozales se encuentran profundas zanjas, su nombre traduce “Zanjas profundas”, en china es la ciudad que mayor densidad de población tiene alcanzando 5335,7 habitantes por km<sup>2</sup> y quien en el 2018 logro un PIB de 2,42 billones (Turismo Rama, 2020).

Esta ciudad es conocida porque en aproximadamente 40 años tuvo un cambio drástico, paso de ser un pueblo costero con aproximadamente 30.000 habitantes a ser conocido como el Silicon Valley chino con más de 11 millones de habitantes, destacando por sus grandes rascacielos y sus parques empresariales; además de esto, es reconocido por su

compromiso con la reducción de emisiones, es por esto que su flota de autobuses de transporte público es 100% eléctrica, primera ciudad en el mundo en lograr esto (Li et al., 2016).

El país de China se ha caracterizado por su compromiso en la electrificación de las flotas de vehículos de transporte público, es por eso que desde el año 2001 ha trabajado en políticas para implementación de vehículos eléctricos trabajando con incentivos económicos y apoyo a la investigación, para en el año 2009 iniciar sus programas de electrificación en 25 ciudades principales del país donde Shenzhen fue la ciudad más ambiciosas proyectando la implementación de 9000 vehículos eléctricos, además de empezar a implementar los vehículos eléctricos en la flota de vehículos gubernamentales. Esto motivado por diferentes razones, entre ellas tratar de mitigar la demanda y dependencia al petróleo, mitigar los efectos de la mala calidad del aire y renovar la industria automotriz nacional promoviendo el desarrollo económico (Li et al., 2016).

Actualmente china es el principal propulsor de la inclusión de vehículos eléctricos a las ciudades es por esto que de la totalidad de vehículos eléctricos en el mundo el 98,3 % de estos se encuentra en este país que cuenta con 170.000 unidades en todo su territorio, aproximadamente el 18% de los buses de china son eléctricos, por su parte Europa solo tiene el 1,6% y Estados Unidos el 0,5% (Vived, 2018).

En todo este proceso se llegó a la conclusión que el tema de los vehículos eléctricos, su compra y difusión no es algo impulsado por el mercado y las necesidades de la población, sino que se debe trabajar inicialmente como un objetivo político que es dominado y patrocinado principalmente por el gobierno, debido principalmente a los grandes costos de adquisición en comparación con un bus convencional. (Li, Zhan, Jong, & Lukszo, 2015). Para llevar a cabo este tipo de proyecto se necesitaron de diferentes acciones auspiciadas por el gobierno que permitieran la innovación con estos vehículos, inicialmente se necesitó la regulación y gobernanza, con reformas que apoyaran este proyecto, acto seguido fue la inversión en infraestructura que es de vital importancia para el funcionamiento de estos vehículos, a su vez se dieron incentivos que motivaran la investigación y desarrollo de estas nuevas tecnologías, y que permitieran la introducción de modelos comerciales; finalmente pero no menos importantes se brindaron incentivos al consumidor que permitieran dar rentabilidad al proyecto (Li et al., 2016).

Para este tipo de proyectos además de esto es necesaria una correcta identificación de los actores principales, entre los que inicialmente se encuentra el gobierno central cuya participación principalmente es económica, con el objetivo de hacer mejoras medio ambientales, seguido por el gobierno local también motivado por temas ambientales pero que busca a su vez mejoras económicas para la ciudad; los fabricantes también cumplen con su rol importante, para este caso es la empresa BYD, los operadores que son China Southern Grid Corporation, Shenzhen bus group Ltd y finalmente los proveedores de energía Bureau (PSB) Ltd (Li et al., 2016).

A pesar de las motivaciones y proyecciones iniciales estas no se cumplieron en su momento, se cumplió solo un poco más del 30% de lo proyectado, es por eso que el comienzo de estas iniciativas se caracterizó como lento y desmotivador, esto principalmente por tres brechas claves, la primera y más importante los altos costos de este tipo de vehículos, esto debido principalmente a la inmadurez tecnología y baja producción de estos por la poca demanda, seguida por la presión del gobierno central al local que contaba con dificultades financieras y finalmente el regular servicio de carga, esto debido a la falta de infraestructura necesaria. Es por esto que en el año 2011 Potevio Ltd se une al proyecto para tratar de unir estas brechas, esta empresa se basó en la mejora y creación de infraestructura, compra de vehículos eléctricos, arrendamiento de baterías para disminuir el costo inicial de los vehículos, y la mejora en el servicio de carga, tratando de unir esa brecha entre el fabricante y el operador; por su parte el gobierno se centra en brindar préstamos a sus operadores, todos los actores eran estatales excepto la empresa BYD, y no había competencia entre fabricantes lo que no permitía una competencia de precios más accesibles (Li et al., 2016).

A pesar de las dificultades, para el año 2018 Shenzhen logra electrificar toda su flota de buses alcanzando un total de 17177 buses eléctricos que cuentan con 981 líneas, y que para este mismo año logro transportar más de 1600 millones de pasajeros. Estos buses cuentan con 510 estaciones de carga y 8000 puntos de recarga, esto significó un gran apoyo del gobierno quien invirtió un aproximado de 500 millones de dólares, cerca de 150.000 dólares en cada autobús (Webedia Brand Services, 2019).

En lo que a emisiones se refiere a pesar de que en Shenzhen los autobuses solo representan el 0,5% de la totalidad de los vehículos de la ciudad, estos representan el 20%

de las emisiones totales debido a su tiempo de operación y la gran cantidad de kilómetros que recorren al día (Xue & Zhou, 2018), estos buses reducen hasta un 32% las partículas en el aire y se calcula que desde su inicio ha logrado reducir la emisión de 440.000 toneladas de CO<sub>2</sub> al año (Webedia Brand Services, 2019).

Se dice que el ahorro de estos buses se empieza a visualizar después de los 60.000 km esto debido a que allí alcanza su equilibrio y ventaja frente a los convencionales en tema de operación y mantenimiento que es significativamente más económico a pesar de que su costo de adquisición puede llegar a ser de 3 a 4 veces más que los convencionales (Vived, 2018), se dice que para recorrer 50.000 km un bus a diésel gasta 20.000 litros de este lo que significa aproximadamente 17.300 euros, mientras que los eléctricos en esta misma cantidad de kilómetros solo consume 4650 euros (Aldama, 2019).

Los buses que componen la flota de Shenzhen como se había mencionado son marca BYD K9, con 12 metros de largo y un peso de 18 toneladas en su mayoría con batería de litio que permite su movimiento, estos buses logran una autonomía de 250 kilómetros lo que permite que con solo una carga de 2 horas en la noche funcione sin problema y sin pausa durante todo el día, un punto que ha facilitado este proyecto es la cercanía de la ciudad con el lugar donde están las instalaciones del fabricante que es en Shanwey, el tiempo de fabricación de cada bus es de 18 días y la empresa tiene capacidad de entregar 36 unidades por día, también muy cerca de Shenzhen se encuentra Kengzi que es donde BYD fabrica sus baterías, que a pesar de que tienen capacidad de 14 gigavatios la hora, en estos momentos no dan abasto para los pedidos. Pese a esto venden hasta 30.000 unidades de vehículos eléctricos al mes solo en china, y ha logrado llevar buses eléctricos a 300 ciudades de todo el mundo (Aldama, 2019).

Este tipo de vehículos aun con los avances que se han hecho presentan diferentes desventajas, entre estas la principal que es su costo inicial que es de 2 a 4 veces más que uno convencional pero que se asegura para el 2030 este valor va a bajar debido a la competencia en este tipo de mercado, otra es la necesidad de una correcta estructura para su funcionamiento, las baterías deben reemplazarse, aunque sea una vez y este cambio cuesta casi la mitad del precio del vehículo (Li et al., 2016).

Es importante detallar pasos claves para la adopción de este tipo de estrategias en las ciudades basados en la experiencia de Shenzhen, entre estas los incentivos políticos que implican subsidios nacionales y locales que signifiquen la mitad o más del valor de los vehículos, hacer un sistema de alquiler de vehículos y baterías, auspiciar la carga y el funcionamiento de esto, y el hecho de que BYD brinda garantía de por vida para vehículos y baterías (Aldama, 2019).

A pesar de los grandes avances en el tema de electrificación de vehículos en china, hace falta la motivación de utilización de estos en todo el mundo, a pesar de que países como china cuentan con mucho apoyo del gobierno y es hogar de los mayores fabricantes de baterías del mundo, para estas iniciativas los mejores autobuses eléctricos han sido diseñados y fabricados por compañías en Estados Unidos, lo que le permitiría a este país el realizar un cambio drástico en sus vehículos y que a nivel de reducción de emisiones tendría un gran aporte que uno de los países más contaminantes pudiera llevar a cabo este tipo de alternativas (Aldama, 2019).

Shenzhen es un claro ejemplo de lo que se necesita para la implementación de una flota de buses y transporte público en general eléctrico en una ciudad, que, aunque al inicio es algo complejo y que requiere de mucho compromiso especialmente de los entes gubernamentales, es algo que a largo y mediano plazo muestra sus ventajas y mejoras en cuanto a emisiones y calidad del medio ambiente, y que a pesar de los avances tecnológicos aún necesita de un impulso que motive su uso a nivel mundial.

### *Chile*

Santiago de Chile es la capital de Chile, lugar con más cantidad de población en el país, y centro administrativo y económico de este, tiene un área de 837, 8 kilómetros cuadrados y su población es de un poco más de 6 millones de habitantes, ha resaltado durante varios años por su compromiso con el medio ambiente al introducir en su flota actual de buses varios propulsados por motores 100% eléctricos, siendo por algunos años la ciudad con más buses eléctricos en América. Esto con un proyecto que desde el año 2010 ha estado introduciendo este tipo de buses gradualmente a su flota de buses de transporte público (Saka et al., 2021).

Para el año 2009 en Santiago el 100% de su flota solo llegaba hasta la tecnología euro III o anteriores a esta, después de la presentación del proyecto para la implementación de buses eléctricos y contar con operadores y financiadores para el año 2017 se empiezan a hacer las pruebas piloto, de un sistema que contaba en ese entonces con 7000 buses, 3000 km de red vial, 11.000 paraderos, y que por día hacia aproximadamente 2,65 millones de viajes, operados por 6 empresas que además veían la necesidad de renovación de su flota (Saka et al., 2021).

En los análisis realizados se logra visualizar que mientras un bus euro III de los que se utilizaban tenía un costo aproximado sin IVA de 180.000 dólares, un bus eléctrico costaba 290.000 dólares sin IVA, es por esto que se habilitaron contratos y licitaciones donde un privado se encargaba de la provisión de la flota y lo ofrecía a los operadores que además de todo contaban con apoyo del estado. Con esto, en el 2018 llegan los primeros 100 buses eléctricos a Chile fabricados por BYD que son operados por MetBus en alianza con Enel que es quien suministra la energía para estos buses, es el financista y quien construyo la infraestructura de carga, y BYD que actúa como proveedor de las unidades de buses y encargados de su mantenimiento, similar a esto funcionan los otros operadores quienes gradualmente van implementando unidades eléctricas a su flota para que en el 2019 en el mes de Abril logaran llegar otras 100 nuevas unidades y así paulatinamente hasta completar 783 buses eléctricos en el año 2020 (Saka et al., 2021).

Para lograr esta cifra fue necesario preparar la red eléctrica actual y la construcción de infraestructura de alimentación para los buses que es de vital importancia para una correcta operación, además de implementar en ella softwares que permitieran optimizar los tiempos de carga contando con un 1 cargador por cada 3 buses aproximadamente. Varios de los terminales de carga implementados en Chile resaltan por su compromiso con el medio ambiente ya que la fuente de la energía es 100% renovable, tomando esta de una serie de paneles solares fotovoltaicos lo que hace que la reducción de emisiones sea aún más, contando además con que estas terminales reutilizan las baterías que desechan los buses dándoles una segunda vida (Saka et al., 2021).

Un dato importante para la implementación de este tipo de tecnologías a la flota de transporte público es el de estandarizar los requerimientos técnicos por medio de normas institucionales, Chile en su caso opto por el estándar europeo CCS combo 2 con carga DC,

donde tiene una red de alimentación de corriente alterna con convertidor externo de corriente continua, además de esto el ministerio de transporte da incentivos a licitaciones de este tipo de buses prometiendo contratos más largos a quienes implementen estas nuevas tecnologías, asimismo dándoles más tiempo de vida útil siendo para un bus Diésel convencional los 10 millones de km ó los 10 años de uso, pero para los eléctricos hasta los 14 millones de km recorridos o 14 años de uso (Saka et al., 2021).

A mediados del año 2020 se incorporaron a la flota 215 buses eléctricos y una terminal de más de 15.000 m<sup>2</sup>, lo cual tuvo un costo de más de 80 millones de dólares distribuidos 8 millones en la construcción de la terminal y 72 millones en la adquisición de los buses, está comprobado que estos buses reducen los costos de operación y mantenimiento a menos de una tercera parte de los buses convencionales a diésel, pero además de esto nada más estos últimos 215 buses reducen 38.000 toneladas de CO<sub>2</sub> por año, este es el CO<sub>2</sub> que captan un aproximado de 2 millones de árboles. En general con la implementación de estos buses se ha logrado mejorar la calidad del aire, disminuir la contaminación acústica, reducir los costos de operación hasta en un 70% y brindarle a la población un servicio más eficiente y cómodo (Ulloa, 2020).

### *Bogotá*

Bogotá, ciudad capital de Colombia y del departamento de Cundinamarca, cuenta con una superficie de 1775 km<sup>2</sup> y una población aproximada de casi 8 millones de habitantes, le apuesta a la movilidad sostenible con la implementación de buses eléctricos a su flota del SITP. A pesar de que en Colombia ciudades como Medellín y Cali ya contaban con buses eléctricos en sus flotas de transporte público, la ciudad de Bogotá destaca por las licitaciones que adelanto para compra de buses eléctricos que para el 2022 serán un total de 1485, lo que la convertiría en la ciudad con más buses eléctricos en toda América y la que más tiene en el mundo después de china (Vallejo Uribe, 2021).

Para finales del 2020 en Bogotá se encontraban circulando un total de 133 buses eléctricos cubriendo las rutas de la zona de Fontibón y con un patio de carga en esta misma zona donde se contaba con espacio para su estacionamiento, recarga de baterías, alistamiento y mantenimiento de los buses, con energía propiciada por terpel, estos primeros buses

implementados evitan la emisión de cerca de 2,6 toneladas de material articulado al año y cerca de 13100 toneladas de CO<sub>2</sub> al año (Ramirez, 2021)

Se espera que para el año 2021 se complementen las rutas zonales de Fontibón, Usme y Perdomo con 595 nuevos buses eléctricos que beneficiarían cerca de 219.100 usuarios, estos buses serán fabricados por BYD que entregara su chasis y tren motor y posteriormente serán ensamblados en Colombia por la empresa Busscar quienes instalaran su carrocería local; por otro lado la empresa que brindara la energía para las terminales será Enel-Codensa, una compañía 51% privada que construirá 2 puntos de carga uno en Fontibón y otro en Usme, la adquisición de estos buses tiene un costo aproximado de 1,82 billones de pesos, se distribuirán 172 buses para recorridos de Fontibón, 195 para Perdomo y 229 para Usme, el precio de operación es de 1,41 billones de pesos por 15 años que es el tiempo de concesión (Ramirez, 2021).

### 3. Estudio de caso en Ibagué

Para la realización del inventario de emisiones de la flota de transporte público de la ciudad de Ibagué se selecciona el software COPERT IV, para su aplicación es necesario conocer información del lugar de estudio y de la operación de la flota lo cual se va a explicar en el presente capítulo.



Inicialmente se contextualiza en lo referente a la ciudad de estudio que para este caso es Ibagué, se tiene en cuenta su ubicación, sus características sociales y demográficas, por otro lado, información de su movilidad y vías, su parque automotor, su demanda de transporte y los motivos de esta, finalmente una información general de su transporte público colectivo.

Es importante también hacer una conceptualización en lo que se refiere a los inventarios de emisiones, los motivos de su implementación e utilización, la clase de emisión que se va a tener en cuenta, la metodología a emplear según la información inicial recopilada, y la importancia de realizar este tipo de estudios de la mejor manera posible para lograr obtener los resultados más acertados.

Para el presente estudio como se mencionó antes se tuvo en cuenta para la realización del inventario la utilización de un software especializado para este caso COPERT IV, es importante conocer información de sus características y los resultados que se pueden obtener mediante su aplicación.

Finalmente, para poder conocer el inventario de emisiones es necesario conocer información propia de la flota estudiada, entre esto su kilometraje, el tiempo de recorrido, la frecuencia de despachos, la velocidad promedio que maneja, la cantidad de viajes diarios, entre otros datos, que además de brindar el factor de actividad para el presente estudio también son datos de entrada que deben conocerse para la aplicación del software.

### **3.1. Descripción del área de estudio**

Ibagué, ciudad musical de Colombia, capital del departamento del Tolima ubicada en el centro occidente de Colombia, en el piedemonte oriental de la cordillera central de los Andes, con un área total de 143.900 ha, se encuentra entre el cañón del Combeima y el valle del río Magdalena (BID & Findeter, 2018). Limita al norte con Anzoategui y Alvarado, al sur con Rovira, San Luis y Valle del San Juan, al oriente con Piedras y Coello y al occidente con Cajamarca y el departamento del Quindío. En la actualidad cuenta con un aproximado de 500.686 habitantes según el censo de 2018, posicionándose como la octava ciudad más poblada del país (DANE).

Por su ubicación, la ciudad de Ibagué es un punto céntrico y una conexión entre el pacífico y el centro del país, esto hace que establezca relaciones sociales, culturales y económicas con diferentes regiones de Colombia que se encuentran a un radio no mayor de 200 km de distancia; en cuanto a su condición geomorfológica es una ciudad que cuenta con grandes variaciones ya que su zona más alta se encuentra a 5300 msnm, mientras que su casco urbano está a 1285 msnm, razón por la cual su clima es igualmente variable (BID & Findeter, 2018).

Ibagué en términos generales en cuanto al estado de sus vías tiene una situación desalentadora, contando con solo el 60% de estas en buen estado y el restante en estado regular o malo (BID & Findeter, 2018), adicional a esto ninguna de sus vías es exclusiva del transporte público y es una de las ciudades con menos uso de bicicleta en todo el país,

lo cual deja ver la importancia de implementar un plan que motive al uso del transporte público y de la bicicleta brindando facilidades y óptimas condiciones para su uso.

La ciudad de Ibagué en su situación actual tiene un gran problema de congestión vehicular, ya que hay alta demanda en la utilización de transporte privado, el parque automotor está en constante crecimiento, en 2016 se alcanzó un promedio de 30.686 automotores por cada 100.000 habitantes, aumentando entre el 2015 y el 2016 en un 7.2%, siendo la mayoría de este aumento el crecimiento en las camionetas (SUV), esto representa un problema ya que las camionetas además de ocupar más espacio, consumen más combustible; esto deja ver que la situación actual de la ciudad no motiva al uso del transporte colectivo sino al contrario, ya que cada vez son más las personas que desisten del transporte público para pasarse al transporte privado en su mayoría a la utilización de motos (*Movilidad – Ibagué Como Vamos*, n.d.).

Del área total del municipio de Ibagué el perímetro urbano ocupa solo el 2.41% contra un área rural del 97.59%, el casco urbano se compone de 13 comunas y 445 barrios, con un área de 3.468 ha, Esto según el plan de desarrollo 2016-2019 de la alcaldía pasada. Normalmente la zona centro es la que genera mayor demanda de transporte debido a que es una zona comercial y administrativa de gran importancia, además de ser residencial. Ibagué cuenta con un aproximado de 84 kilómetros de malla vial por cada 100.000 habitantes, de estos solo 29 kilómetros conforman la red vial principal con transporte público y otros 44 km/carril de la red complementaria (BID & Findeter, 2018)

La flota actual se calcula en un promedio de 800 buses encargados del transporte urbano colectivo en la ciudad de Ibagué que transportan aproximadamente 225.711 pasajeros diarios (*Movilidad – Ibagué Como Vamos*, n.d.), los cuales se mueven por medio de la combustión de energías fósiles no renovables lo que causa emisiones de CO<sub>2</sub> o dióxido de carbono, principales causas del efecto invernadero y de la lluvia acida, uno de los más importantes problemas para el calentamiento global.

En la etapa de diagnóstico del plan maestro de Movilidad de Ibagué se logró estimar que en promedio en un día en la ciudad se realizan 905.000 viajes “de los cuales 36% son motivo trabajo, 25% estudio, 11% trámites personales, y el 28% restante se realizan con motivo compras, salud, recreación y otros” (BID & Findeter, 2018). De estos viajes el 34%

es realizado en modos de transporte público colectivo, seguido por la caminata con el 26.8%, la motocicleta con el 15%, vehículo privado 11%, y la bicicleta que solo tiene el 0.9%. Estas cifras pueden en un inicio hacer la afirmación referente a las ventajas climáticas que tendría la mitigación total de la emisión GEI por parte de los autobuses para uso de transporte público colectivo al tener en cuenta que estos ocupan aproximadamente una tercera parte de los vehículos que transitan a diario en la ciudad.

Actualmente la empresa que presta el servicio de transporte en la ciudad de Ibagué es la empresa SITSA (Sistema Integrado de Transporte S.A.) quien en 2014 se encargó de agrupar siete empresas de transporte que laboraban en ese entonces. Cuenta con 32 rutas de transporte con 634 paradas de autobús que cubren el área urbana de Ibagué y también áreas limítrofes como lo son la zona de Juntas en el cañón del Combeima y el peaje de gualanday en Coello, su ruta más larga es la numero 48 y cubre 55km y la más corta es la numero 4 y recorre 8km. El transporte público colectivo en Ibagué tiene bajos niveles de uso por parte de la ciudadanía debido a que el servicio que prestan en su mayoría es ineficiente y no brinda seguridad ni comodidad, esto ha hecho que los usuarios se interesen en otros medios de transporte.



Ilustración 6. Mapa de rutas de transporte público colectivo en Ibagué. Fuente: Moovit App

### 3.2. Estimación del Inventario de Emisiones

Básicamente para lograr definir el aporte al planeta en cuanto a la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>eq de este estudio es necesario realizar un inventario de emisiones que la actual flota de autobuses genera, “Un inventario de emisiones atmosféricas es un conjunto de datos que caracterizan y consolidan, mediante sumatoria, las emisiones de contaminantes atmosféricos, de acuerdo con el tipo de fuente y el tipo y cantidad de contaminantes emitidos, en un área geográfica y en un intervalo de tiempo determinados (EPA, 1999a)” (Gaitán & Cárdenas, 2017), los inventarios de emisiones deben hacerse con mucha precisión y actualizarse de forma periódica, para lograr obtener resultados reales y certeros, ya que estos son demasiado importantes para conocer información a nivel territorial que permiten la toma de decisiones y medidas para la mejora de la calidad del aire y con esto la creación de planes e implementación de proyectos y normas nacionales en pro de esto.

Generalmente al momento de hacer un inventario de emisiones se tienen en cuenta las emisiones fijas y las emisiones móviles, para este caso en específico se tendrán en cuenta solo las emisiones móviles, estas son producidas principalmente por el parque automotor al momento de la quema de combustibles fósiles para su funcionamiento produciendo contaminantes como óxidos de nitrógeno, monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados, dióxidos de azufre y compuestos orgánicos volátiles (*EMISIONES POR FUENTES MOVILES - IDEAM*, n.d.), realizar el inventario de estas emisiones, resulta más complejo que el de las fijas ya que incurren desplazamientos y se cuenta con diferentes tipos de tecnología en cuanto a la motorización del vehículo, el tipo de combustible y otros factores que dificultan la realización de este (Caro et al., 2016).

Adicional a esto las emisiones del parque automotor se pueden presentar en tres distintas formas, por el tubo de escape del motor, como producto de la reacción química producida por el combustible al momento de su uso, que varían a su vez por aspectos como el modo de conducir, el tipo de combustible, la temperatura, la presión, entre otros; otra forma de emisión es la forma evaporativa que varía y aumenta proporcionalmente con la temperatura en el día, finalmente las emisiones por desgaste de frenos y neumáticos, son fuente de material particulado aunque contribuyen con la emisión de compuestos tóxicos,

son de menos importancia que las anteriores (UPB, 2010) (Granada Aguirre & Valencia Rodríguez, 2010).

Para lograr estimar las emisiones es necesario conocer las diferentes metodologías y modelos para la obtención de estos inventarios; normalmente se plantean dos tipos de enfoques, Top Down y Bottom Up, el primero que parte de una visión más extensa o información general, por ejemplo, en una escala territorial amplia que por medio del análisis va descendiendo hasta llegar a un resultado más específico y con más detalle, y el segundo que como su nombre lo dice (de abajo hacia arriba) se basa en empezar su análisis en información específica que al agregarse puede llegar a brindar información más amplia y global de estas emisiones (Espíndola & Valderrama, 2012). Un ejemplo de la metodología Top Down es cuando se hace un análisis de la cantidad de emisiones por medio de información que se obtiene de un factor de emisión asociado con información del consumo de combustible desde sus lugares de distribución; por otro lado, se puede decir que un ejemplo de la metodología Bottom up es cuando por medio de mediciones específicas e individuales en un grupo de establecimientos se logra dar un dato general de algún espacio territorial específico (Gaitán & Cárdenas, 2017).

Para el enfoque Top-Down en el momento de la realización de un inventario de emisiones se deben conocer aspectos como número de vehículos de cada categoría que circulan en el espacio geográfico estudiado, modelo, cilindraje, tipo de servicio y combustible, por otra parte, para el enfoque Bottom Up se hace el análisis desde volúmenes vehiculares teniendo en cuenta la longitud de las vías y su clasificación de importancia, y los horarios de tráfico (Carmona Aparicio et al., 2016). Teniendo en cuenta la información con la que se cuenta para la realización del estudio el enfoque Top-Down se desarrolla para la realización del inventario de emisiones.

Adicional a esto, para la realización de inventarios de emisiones de fuentes móviles se pueden encontrar dos tipos de metodologías, las de estimación directa e indirecta, la primera se refiere a aquellas mediciones realizadas directamente a la fuente móvil por medio de la utilización de diferentes equipos especializados, y las indirectas que se basan en información ya conocida de emisiones, y diferentes aspectos que las afectan correlacionados entre sí, y están fundamentadas en la siguiente ecuación (Giraldo Amaya, 2005):

$$E = F_e \times A \times N_f$$

Siendo  $F_e$ , factor de emisión que depende del tipo de motorización en la ubicación de estudio,  $N_f$  número de fuentes, es decir número de vehículos, y A factor de actividad, es decir, los kilómetros recorridos por los vehículos a estudiar; adicional a esto se deben utilizar factores de corrección (Caro et al., 2016).

Además de estas metodologías, varios países a través de los años han creado modelos para la estimación de emisiones, los más importantes desarrollados por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA), la Agencia Ambiental Europea (EEA) y el International Sustainable Systems Research Center (ISSRC); tales como COPERT (computer programme to calculate emissions from road transport), MOBILE, MOVES e IVE (Modelo internacional de Emisiones Vehiculares) (UPB, 2010).

Según el ministerio de Ambiente para un correcto desarrollo de inventario de emisiones a la atmósfera se deben llevar a cabo cuatro pasos, formulación, donde se define el propósito de la realización del inventario, para este caso en específico se necesita de la realización de este para conocer la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>eq que se disminuiría en el caso hipotético de que la flota actual de buses de la ciudad de Ibagué fuera cambiada por buses 100% eléctricos, es decir, que la ubicación geográfica se reduce a la de un municipio relativamente pequeño; el siguiente paso es el de la planificación, donde se reconocen los recursos necesarios para la realización, el tiempo y el valor económico que este representa, para este proyecto es necesario más que nada una profunda investigación que permita identificar los datos de la flota de buses, conociendo horarios, rutas, velocidades, cantidad de kilómetros, calidad del combustible entre otros, para después ser capaces de definir que recursos económicos representarían; como tercer paso se tiene la ejecución donde con base de la recopilación de información se clasifica y se hace la estimación del inventario, para finalmente realizar la evaluación y actualización de este cuando sea necesaria (Gaitán & Cárdenas, 2017).

### 3.3. Modelo COPERT

Para agilizar y además facilitar la realización de inventarios de emisiones de un respectivo lugar, alrededor del mundo se han desarrollado diferentes sistemas de modelación de emisiones vehiculares, donde por medio de datos de entrada característicos para cada caso e información de actividad de los emisores de contaminantes se puede conocer la cantidad de emisiones por contaminante o los factores de emisión de este.

Especialmente para este estudio se utilizó el modelo Computer Programme to Calculate Emissions from Road Transport o más conocido como COPERT, un sistema de modelación de emisiones elaborado por Visual Studio.NET financiado por la EEA (Agencia Europea de Medio ambiente), elaborado principalmente para Europa caracterizado por calcular emisiones de vehículos que estén circulando y aquellos que no también, utilizado especialmente en países europeos como España, Francia, Grecia, entre otros.

COPERT puede estimar emisiones por vehículos a gasolina, a diesel o GLP, y cuenta para su estudio con 6 categorías vehiculares las cuales son, vehículos de pasajeros con menos de 8 asientos, vehículos ligeros con menos 3,5 toneladas, vehículos pesados con más de 3,5 toneladas, autobuses urbanos, y motonetas y motocicletas con motor de menos y más de 50 cc respectivamente; así mismo el sistema clasifica los vehículos por su tipo de combustible y también su tecnología.

Para llevar a cabo cualquier tipo de estudio en este modelo es necesario conocer información de lugar de estudio y de la flota de vehículos a investigar, se debe conocer la temperatura de la zona y su humedad, algunas características del combustible, datos de actividad de los vehículos y características de los vehículos a estudiar y su operación, entre otros.

En cuanto a sus resultados COPERT se pueden conocer tanto los factores de emisión como la cantidad de emisiones de 12 contaminantes, entre los cuales se tendrán en cuenta solo 3 utilizados para este estudio que representan los gases de efecto invernadero los cuales son CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O (Instituto Nacional de Ecología-WGA-Semarnat, 2009).

En el caso específico de estudio se tomó en cuenta este modelo por la cantidad y calidad de información disponible y las características del lugar de estudio, aquí se clasifica a los vehículos automotores según los estándares europeos de tecnología y también por tipo de vehículo, teniendo en cuenta la información que se tenía inicialmente para el estudio como

lo son las características de operación y físicas de los vehículos a investigar se consideró este modelo era el más adecuado para la estimación de emisiones.

Es importante a su vez al momento de decidir el modelo a utilizar para determinado estudio el conocer el nivel de estimación, en este caso basándose en los tres niveles de complejidad metodológica planteados por la guía europea; empezado por *Tier 1*, un método básico donde el factor de actividad se obtiene de información estadística utilizando generalmente el combustible, y el factor de emisión representan condiciones promedio de un proceso sin tener en cuenta la tecnología, por otro lado, *Tier 2*, emplea un factor de actividad similar al de *Tier 1*, en cuanto al factor de emisión se basa en calidad de combustibles, tecnologías de control, entre otros, para utilizar factores de emisión específicos de cada país; finalmente, *Tier 3*, se considera el método más complejo según la información que requiere e incluye generalmente la utilización de modelos como COPERT, se necesita la aplicación de datos técnicos confiables y el factor de actividad, este nivel fue el llevado a cabo en el presente estudio (Gaitán & Cárdenas, 2017).

### **3.4. Estimación de Emisiones de GEI en Ibagué**

Para la aplicación del modelo COPERT IV y con esto el poder obtener los resultados del inventario de emisiones fue necesario conocer diferentes tipos de datos, inicialmente se investigan temperaturas máximas y mínimas por mes del año estudiado junto con la humedad del mismo para la ciudad de Ibagué, seguidamente, por medio de la empresa de transporte público SITSA se logran obtener distintos datos de operación de entrada como la cantidad de buses, su modelo, kilómetros por ruta, tiempos y frecuencias; para con esto poder obtener las velocidades y los kilómetros recorridos por día por ruta.

Asimismo, conociendo el modelo de cada bus en operación se hace su clasificación según la tecnología Euro, esta clasificación junto con los datos antes mencionados permiten conocer los kilómetros recorridos por cada grupo según tecnología por el año de estudio, lo que se determina como el factor de actividad de la flota.

Finalmente, conociendo un estudio de aforos y velocidades realizado en campo en la ciudad de Ibagué es posible conocer sus horas pico y valle, las velocidades que se tienen en estas horas y su porcentaje de kilómetros, datos necesarios para la aplicación del

modelo y la obtención de los resultados, el proceso llevado a cabo es descrito paso a paso en el ingreso de datos para la obtención de emisiones (Ver anexo 1).

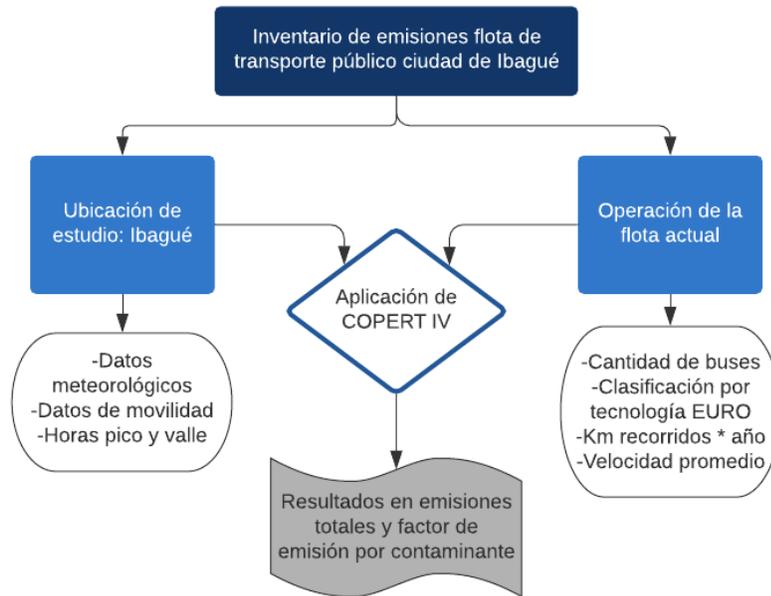


Ilustración 7. Metodología para realización del inventario de emisiones. Fuente: Elaboración propia

### 3.4.1. Datos iniciales

Inicialmente se tiene el apoyo de la empresa SITSA S.A. que es quien presta el servicio de transporte público colectivo en la ciudad de Ibagué, y quien brinda información de la operación de la flota y sus características mostrando la operación de un día normal en la ciudad, la frecuencia real y los buses clasificados según su modelo y placa, con estos datos es posible la realización de la siguiente tabla que permite conocer el kilometraje por ruta, el tiempo aproximado de recorrido tomado según los reportes de despachos y paradas en puntos de control, asimismo la frecuencia con la que sale cada bus, la velocidad promedio calculada con el kilometraje de la ruta y el tiempo; teniendo en cuenta la frecuencia y las horas laboradas al día se conocen la cantidad de viajes, y con esto y el kilometraje de cada ruta se conocen los kilómetros recorridos por ruta al día:

| Ruta         | Kilometraje | Tiempo (min) | Frecuencia (min) | Vel prom (km/hr) | cantidad de viajes al día | Km recorridos al día |
|--------------|-------------|--------------|------------------|------------------|---------------------------|----------------------|
| 1            | 28.60       | 112          | 8                | 15.30            | 120                       | 3432.00              |
| 2            | 24.70       | 85           | 6                | 17.40            | 160                       | 3952.00              |
| 4 / 7.       | 31.90       | 134          | 8                | 14.30            | 120                       | 3828.00              |
| 6            | 42.10       | 141          | 5                | 17.90            | 192                       | 8083.20              |
| 8            | 28.90       | 91           | 4                | 19.10            | 240                       | 6936.00              |
| 9            | 32.70       | 105          | 6                | 18.70            | 160                       | 5232.00              |
| 11           | 34.20       | 100          | 3                | 20.50            | 320                       | 10944.00             |
| 14           | 28.90       | 108          | 4                | 16.10            | 240                       | 6936.00              |
| 15           | 26.80       | 111          | 9                | 14.50            | 106.7                     | 2858.70              |
| 17           | 39.20       | 118          | 8                | 19.90            | 120                       | 4704.00              |
| 18           | 46.70       | 136          | 5                | 20.60            | 192                       | 8966.40              |
| 19           | 48.90       | 129          | 6                | 22.70            | 160                       | 7824.00              |
| 20           | 25.30       | 91           | 6                | 16.70            | 160                       | 4048.00              |
| 21           | 30.80       | 100          | 5                | 18.50            | 192                       | 5913.60              |
| 22           | 35.40       | 105          | 5                | 20.20            | 192                       | 6796.80              |
| 23           | 31.20       | 123          | 4                | 15.20            | 240                       | 7488.00              |
| 24           | 23.90       | 72           | 4                | 19.90            | 240                       | 5736.00              |
| 28           | 63.40       | 142          | 8                | 26.80            | 120                       | 7608.00              |
| 29           | 62.60       | 130          | 40               | 28.90            | 24                        | 1502.40              |
| 31           | 36.20       | 102          | 6                | 21.30            | 160                       | 5792.00              |
| 33           | 27.00       | 98           | 6                | 16.50            | 160                       | 4320.00              |
| 35           | 42.00       | 143          | 4                | 17.60            | 240                       | 10080.00             |
| 37           | 30.30       | 98           | 6                | 18.60            | 160                       | 4848.00              |
| 40           | 33.60       | 110          | 4                | 18.30            | 240                       | 8064.00              |
| 43           | 39.90       | 115          | 5                | 20.80            | 192                       | 7660.80              |
| 48           | 49.80       | 166          | 9                | 18.00            | 106.7                     | 5312.00              |
| 50           | 38.40       | 120          | 5                | 19.20            | 192                       | 7372.80              |
| 53           | 20.80       | 75           | 7                | 16.60            | 137.1                     | 2852.60              |
| 82           | 44.50       | 153          | 4                | 17.50            | 240                       | 10680.00             |
| 90           | 43.80       | 100          | 7                | 26.30            | 137.1                     | 6006.90              |
| 92           | 46.10       | 77           | 8                | 35.90            | 120                       | 5532.00              |
| San bernardo | 26.00       | 30           | 30               | 52.00            | 32                        | 832.00               |
|              |             |              |                  | <b>20.68</b>     | <b>TOTAL</b>              | <b>192,142,095</b>   |

Tabla 1. Características de operación de la flota. Fuente: Elaboración propia con base en datos SITSA S.A.

Es pertinente aclarar que el combustible utilizado por toda la flota actual de buses es el diésel el cual se compone en su mayoría de hidrocarburos saturados complementado con hidrocarburos aromáticos con una densidad aproximada de  $850\text{kg}/\text{m}^3$ , según lo planteado gubernamentalmente para el año 2023 el contenido de azufre de este combustible será permitido entre 15 y 10 ppm, esto basados en la norma Euro, se calcula que desde el año 2019 en Colombia el diésel estuvo en promedio en 10 ppm de azufre en todo el país.

Conociendo los datos antes mencionados de cada ruta se puede calcular el promedio de kilómetros al día que recorren todos los buses en la ciudad de Ibagué que serían aproximadamente 192.142 kilómetros, lo que significa un promedio de más de 63 millones de kilómetros recorridos por toda la flota anualmente, su velocidad promedio es de 20,6 km/hr, la frecuencia de cada despacho de bus varía desde cada 3 minutos a cada 40 minutos según la importancia de la ruta, y la ruta más larga en tiempo es la numero 48 que se demora cubriendo su ruta en promedio 2 horas con 45 minutos.

A su vez se conocen datos de la flota con los cuales es posible saber la tecnología Euro de esta, la cual cuenta con los vehículos más antiguos que son modelo 2000 hasta llegar a 6 unidades de la flota que son modelo 2020, estos datos son importantes y además necesarios para la utilización de COPERT ya que los resultados y análisis realizados por este son clasificados por tecnología.

La normativa EURO, son normas de emisiones europeas definidas con requisitos que limitan la emisión de gases por parte de los vehículos que salen al mercado cada año, esto aplicado principalmente en la Unión Europea, estas buscan regular la cantidad de emisiones y procurar por ser más estrictos con cada actualización trabajando de esta forma en la reducción de emisiones, cada tipo de vehículo cuenta con una normatividad diferente y los vehículos nuevos que no cumplan con la normatividad en curso no pueden comercializarse en la Unión Europea. A partir del año 1991 se crea la primera norma Euro 1, y así se ha renovado cada cierta cantidad de años (Autocrash, 2019), los vehículos se pueden clasificar según el modelo de la siguiente forma:

| <b>Normatividad</b> | <b>Modelo</b> |
|---------------------|---------------|
| <b>Euro I</b>       | 1992-1995     |

|                 |                  |
|-----------------|------------------|
| <b>Euro II</b>  | 1996-1999        |
| <b>Euro III</b> | 2000-2004        |
| <b>Euro IV</b>  | 2005-2008        |
| <b>Euro V</b>   | 2009-2014        |
| <b>Euro VI</b>  | 2015- Actualidad |

Tabla 2. Normativa Euro. Fuente: Elaboración propia con base en (Autocrash, 2019)  
 Conociendo la normativa se hace la siguiente clasificación de la flota actual de la ciudad teniendo en cuenta su modelo:

| <b>Normatividad</b> | <b>Modelo</b> | <b>Cantidad</b> | <b>Total</b> |
|---------------------|---------------|-----------------|--------------|
| <b>Euro III</b>     | 2000          | 21              | 297          |
|                     | 2001          | 37              |              |
|                     | 2002          | 74              |              |
|                     | 2003          | 98              |              |
|                     | 2004          | 67              |              |
| <b>Euro IV</b>      | 2005          | 69              | 420          |
|                     | 2006          | 148             |              |
|                     | 2007          | 103             |              |
|                     | 2008          | 100             |              |
| <b>Euro V</b>       | 2009          | 139             | 161          |
|                     | 2010          | 12              |              |
|                     | 2014          | 10              |              |
| <b>Euro VI</b>      | 2015          | 16              | 79           |
|                     | 2016          | 32              |              |
|                     | 2017          | 4               |              |
|                     | 2018          | 11              |              |
|                     | 2019          | 10              |              |
|                     | 2020          | 6               |              |

Tabla 3. Clasificación de la flota por tecnología EURO. Fuente: Elaboración propia con base en datos SITSA S.A.

### CLASIFICACIÓN EURO

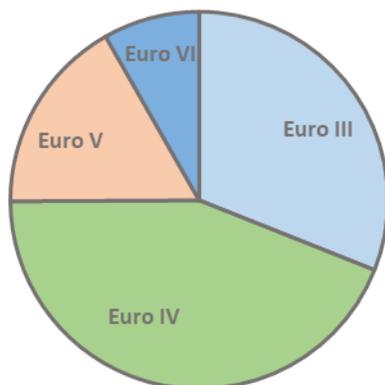


Ilustración 8. Distribución de la flota por tecnología EURO. Fuente: Elaboración propia con base en datos SITSA S.A.

Adicional a la caracterización de la operación de la flota se deben conocer datos ambientales de la zona de estudio, entre estos se debe conocer temperatura media máxima y mínima por mes del año de estudio, y su porcentaje de humedad, esta información fue obtenida por medio de la base de datos del IDEAM donde se obtuvo el promedio de la temperatura diaria máxima y mínima para Ibagué tomada en la estación del aeropuerto perales y se hizo el cálculo necesario para conocer su promedio mensual, estos datos se muestran a continuación, el proceso detallado del ingreso de datos iniciales al modelo COPERT se describe en el Anexo 1.

| Mes        | Min<br>Temperatura<br>[°C] | Max<br>Temperatura<br>[°C] | Humedad<br>[%] |
|------------|----------------------------|----------------------------|----------------|
| Enero      | 19.20                      | 30.30                      | 0.76           |
| Febrero    | 19.60                      | 29.50                      | 0.84           |
| Marzo      | 19.40                      | 28.70                      | 0.77           |
| Abril      | 19.30                      | 29.00                      | 0.86           |
| Mayo       | 19.40                      | 28.60                      | 0.89           |
| Junio      | 19.70                      | 30.20                      | 0.80           |
| Julio      | 19.30                      | 31.30                      | 0.74           |
| Agosto     | 20.00                      | 33.10                      | 0.64           |
| Septiembre | 19.70                      | 32.60                      | 0.65           |

|           |       |       |      |
|-----------|-------|-------|------|
| Octubre   | 18.30 | 29.20 | 0.83 |
| Noviembre | 19.30 | 28.30 | 0.88 |
| Diciembre | 19.60 | 28.70 | 0.88 |

Tabla 4. Datos ambientales Ibagué. Fuente: Elaboración propia con base en IDEAM.

Ya con estos datos iniciales se procede con la realización de distintos análisis y operaciones que permitan obtener otros datos de entrada necesarios para utilizar COPERT por medio de datos brindados por la empresa SITSA S.A. se logran conocer datos de operación diarios y los buses que realizan cada ruta con su determinada frecuencia y recorrido, lo que permite conocer el kilometraje recorrido por cada bus según su tecnología euro y su ruta, así:

| Ruta | EURO |    |    |     | Frec (min) | KM    | # bus | # Viajes * Bus | km*ruta*día |         |         |         |
|------|------|----|----|-----|------------|-------|-------|----------------|-------------|---------|---------|---------|
|      | III  | IV | V  | V I |            |       |       |                | Euro III    | Euro IV | Euro V  | Euro VI |
| 1    | 4    | 8  | 5  | 1   | 8          | 28.60 | 18    | 6.7            | 762.70      | 1525.30 | 953.30  | 190.70  |
| 2    | 8    | 10 | 3  | 0   | 6          | 24.70 | 21    | 7.6            | 1505.50     | 1881.90 | 564.60  | 0.00    |
| 4/7  | 7    | 5  | 4  | 1   | 8          | 31.90 | 17    | 7.1            | 1576.20     | 1125.90 | 900.70  | 225.20  |
| 6    | 14   | 13 | 9  | 4   | 5          | 42.10 | 40    | 4.8            | 2829.10     | 2627.00 | 1818.70 | 808.30  |
| 8    | 10   | 12 | 12 | 2   | 4          | 28.90 | 36    | 6.7            | 1926.70     | 2312.00 | 2312.00 | 385.30  |
| 9    | 5    | 12 | 6  | 2   | 6          | 32.70 | 27    | 5.9            | 968.90      | 2325.30 | 1162.70 | 387.60  |
| 11   | 10   | 15 | 4  | 2   | 3          | 34.20 | 31    | 10.3           | 3530.30     | 5295.50 | 1412.10 | 706.10  |
| 14   | 10   | 10 | 4  | 3   | 4          | 28.90 | 27    | 8.9            | 2568.90     | 2568.90 | 1027.60 | 770.70  |
| 15   | 6    | 7  | 3  | 3   | 9          | 26.80 | 19    | 5.6            | 902.70      | 1053.20 | 451.40  | 451.40  |
| 17   | 4    | 6  | 2  | 5   | 8          | 39.20 | 17    | 7.1            | 1106.80     | 1660.20 | 553.40  | 1383.50 |
| 18   | 5    | 21 | 6  | 1   | 5          | 46.70 | 33    | 5.8            | 1358.50     | 5705.90 | 1630.30 | 271.70  |
| 19   | 9    | 15 | 5  | 1   | 6          | 48.90 | 29    | 5.5            | 2428.10     | 4046.90 | 1349.00 | 269.80  |
| 20   | 6    | 8  | 1  | 3   | 6          | 25.30 | 18    | 8.9            | 1349.30     | 1799.10 | 224.90  | 674.70  |
| 21   | 9    | 9  | 10 | 3   | 5          | 30.80 | 31    | 6.2            | 1716.90     | 1716.90 | 1907.60 | 572.30  |
| 22   | 7    | 13 | 6  | 1   | 5          | 35.40 | 27    | 7.1            | 1762.10     | 3272.50 | 1510.40 | 251.70  |
| 23   | 5    | 14 | 5  | 3   | 4          | 31.20 | 27    | 8.9            | 1386.70     | 3882.70 | 1386.70 | 832.00  |
| 24   | 3    | 10 | 2  | 2   | 4          | 23.90 | 17    | 14.1           | 1012.20     | 3374.10 | 674.80  | 674.80  |
| 28   | 4    | 12 | 2  | 3   | 8          | 63.40 | 21    | 5.7            | 1449.10     | 4347.40 | 724.60  | 1086.90 |
| 29   | 3    | 1  | 1  | 3   | 40         | 62.60 | 7     | 3.4            | 643.90      | 214.60  | 214.60  | 643.90  |
| 31   | 10   | 7  | 6  | 0   | 6          | 36.20 | 21    | 7.6            | 2758.10     | 1930.70 | 1654.90 | 0.00    |
| 33   | 9    | 4  | 1  | 1   | 6          | 27.00 | 15    | 10.7           | 2592.00     | 1152.00 | 288.00  | 288.00  |

Estudio de emisiones de gases de efecto invernadero relacionadas con la implementación de autobuses eléctricos en la flota de transporte urbano colectivo de la ciudad de Ibagué

|              |    |    |   |   |    |       |    |      |         |         |         |         |
|--------------|----|----|---|---|----|-------|----|------|---------|---------|---------|---------|
| 35           | 12 | 10 | 0 | 1 | 4  | 42.00 | 23 | 10.4 | 5259.10 | 4382.60 | 0.00    | 438.30  |
| 37           | 6  | 12 | 7 | 1 | 6  | 30.30 | 26 | 6.2  | 1118.80 | 2237.50 | 1305.20 | 186.50  |
| 40           | 9  | 19 | 8 | 1 | 4  | 33.60 | 37 | 6.5  | 1961.50 | 4141.00 | 1743.60 | 217.90  |
| 43           | 8  | 17 | 4 | 0 | 5  | 39.90 | 29 | 6.6  | 2113.30 | 4490.80 | 1056.70 | 0.00    |
| 48           | 3  | 11 | 2 | 5 | 9  | 49.80 | 21 | 5.1  | 758.90  | 2782.50 | 505.90  | 1264.80 |
| 50           | 6  | 11 | 4 | 4 | 5  | 38.40 | 25 | 7.7  | 1769.50 | 3244.00 | 1179.60 | 1179.60 |
| 53           | 4  | 6  | 2 | 3 | 7  | 20.80 | 15 | 9.1  | 760.70  | 1141.00 | 380.30  | 570.50  |
| 82           | 17 | 21 | 4 | 3 | 4  | 44.50 | 45 | 5.3  | 4034.70 | 4984.00 | 949.30  | 712.00  |
| 90           | 8  | 5  | 3 | 1 | 7  | 43.80 | 17 | 8.1  | 2826.80 | 1766.70 | 1060.00 | 353.30  |
| 92           | 6  | 4  | 2 | 1 | 8  | 46.10 | 13 | 9.2  | 2553.20 | 1702.20 | 851.10  | 425.50  |
| San bernardo | 1  |    |   |   | 30 | 26.00 | 1  | 32   | 832.00  | 0.00    | 0.00    | 0.00    |

Tabla 5. Datos detallados de operación de la flota por tecnología. Fuente: Elaboración propia.

Conociendo estos resultados se puede obtener la actividad anual promedio por tecnología, dato necesario para el análisis de COPERT, adicional a esto se pudo conocer el kilometraje promedio de vida de cada tecnología según sus buses y operación:

| EURO     | ACTIVIDAD (km) |             |             |            |
|----------|----------------|-------------|-------------|------------|
|          | III            | IV          | V           | VI         |
| Día      | 60123.30       | 84690.40    | 31753.90    | 16222.90   |
| Año      | 20502047.50    | 28879437.90 | 10828090.50 | 5532012.00 |
| Veh* año | 69030.50       | 68760.60    | 67255.20    | 70025.50   |

Tabla 6. Datos de actividad de la flota de buses actual. Fuente: Elaboración propia.

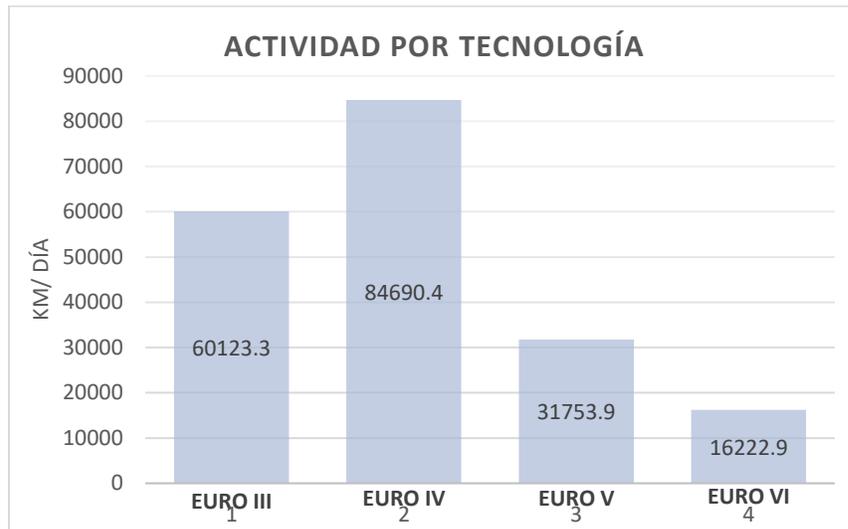


Ilustración 9. Distribución de actividad de la flota por tecnología. Fuente: Elaboración propia.

Luego de tener e ingresar en el software la información sobre los buses, sus cantidades, tecnología y actividad se prosigue con los datos de circulación, en la cual se tendrán en cuenta temas como la velocidad promedio, y los aforos vehiculares tanto en hora pico como hora valle; para esto se obtuvieron datos del municipio en cuanto a aforos y toma de velocidades hechas en el año 2017, allí se clasifican los datos por medio de una tabla dinámica teniendo en cuenta solo a los buses y los aforos y horas de la toma de información, para después revisar las velocidades según las horas pico y horas valle analizadas, según los aforos se tienen tres horas pico, la más importante de 7:30 a 8:30 am, seguido de la hora entre 12:00 y 1:00 pm y finalmente de 6:15 a 7:15 pm, con estos datos se concluye un porcentaje de kilómetros recorridos en horas pico de 20.8% y por otro lado de 79.2% en horas valle, esto se visualiza en la siguiente gráfica:

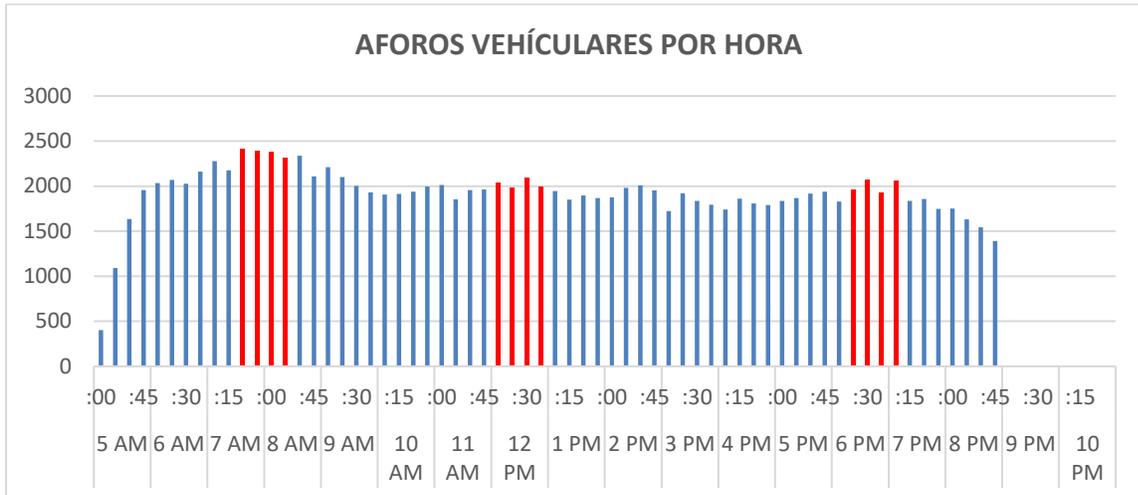


Ilustración 10. Aforos vehiculares. Fuente: Elaboración propia con base en aforos Ibagué. Conociendo las horas pico y hora valle y con la base de datos de velocidades que se tiene para los buses clasificados por hora se puede conocer el promedio de la velocidad en cada una de estas horas la cual es de 19.2 km/hr para hora valle y 17.7 km/hr en hora pico, estos datos también se ingresan en el software COPERT.

### 3.4.2. Resultados

Ya con esto se pueden obtener los resultados que buscamos, estos resultados se encuentran tanto en el total de emisiones por contaminante o factor de emisión de cada contaminante, de los cuales se tendrán en cuenta los resultados de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, que se dan en toneladas por año, allí se muestra la cantidad de emisiones por los vehículos clasificados según su tecnología y finalmente se da el total de las emisiones en este caso para el año 2019. Para el alcance del presente estudio se tienen en cuenta solo las emisiones causadas por combustión o de escape, adicional a esto no se tienen en cuenta la fuga de hidrofluocarburos por uso del aire acondicionado ya que ningún vehículo de transporte público colectivo de la ciudad utiliza este servicio de aire, a su vez no se tienen en cuenta pérdidas o fugas.

#### Emisiones CO<sub>2</sub>

| Tecnología | Caliente  | Lubricante | Total (Ton) |
|------------|-----------|------------|-------------|
| Euro III   | 18,181.00 | 54.40      | 18,235.30   |
| Euro IV    | 22,959.00 | 76.60      | 23,035.60   |

|                           |           |        |           |
|---------------------------|-----------|--------|-----------|
| <b>Euro V</b>             | 8,372.50  | 26.10  | 8,398.60  |
| <b>Euro VI A/B/C</b>      | 4,382.00  | 6.70   | 4,388.80  |
| <b>Total Buses Diesel</b> | 53,894.50 | 163.80 | 54,058.30 |

Tabla 7. Resultados emisiones de CO<sub>2</sub>. Fuente: Elaboración propia con base en COPERT IV

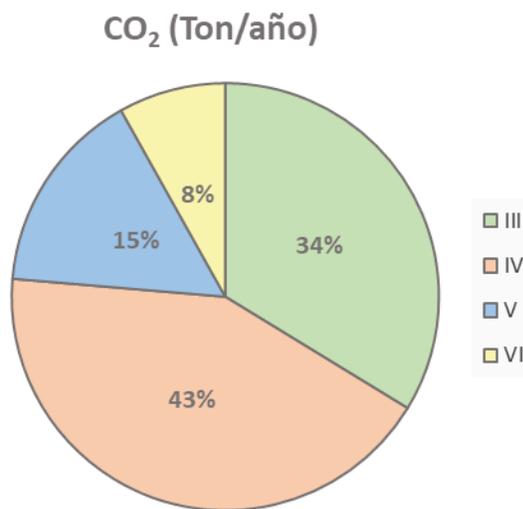


Ilustración 11. Distribución de emisiones de CO<sub>2</sub> por tecnología. Fuente: Elaboración propia.

**Emisiones CH<sub>4</sub>**

| <b>Tecnología</b>         | <b>Total (Ton)</b> |
|---------------------------|--------------------|
| Euro III                  | 2.12               |
| Euro IV                   | 0.15               |
| Euro V                    | 0.06               |
| Euro VI A/B/C             | 0.03               |
| <b>Total Buses Diesel</b> | <b>2.35</b>        |

Tabla 8. Resultados emisiones CH<sub>4</sub>. Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV

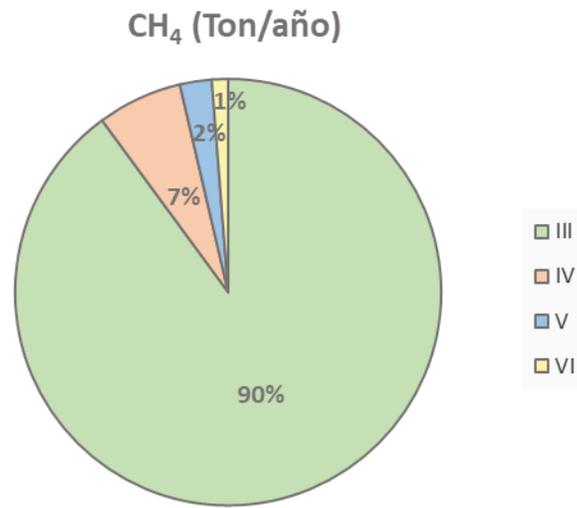


Ilustración 12. Distribución de emisiones de CH<sub>4</sub> por tecnología. Fuente: Elaboración propia.

### Emisiones N<sub>2</sub>O

| <b>Tecnología</b>         | <b>Total (Ton)</b> |
|---------------------------|--------------------|
| Euro III                  | 0.12               |
| Euro IV                   | 0.37               |
| Euro V                    | 0.36               |
| Euro VI A/B/C             | 0.23               |
| <b>Total Buses Diesel</b> | <b>1.08</b>        |

Tabla 9. Resultados emisiones N<sub>2</sub>O. Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV

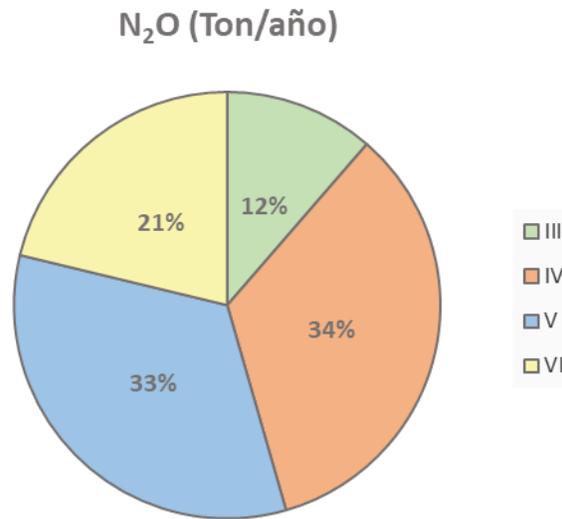


Ilustración 13. Distribución de emisiones de N<sub>2</sub>O por tecnología. Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV

Otros datos de gran importancia junto con las emisiones totales por contaminante es conocer los factores de emisión de cada uno de estos los cuales se muestran a continuación en las unidades de g/km; es importante aclarar que el modelo ajusta los factores de emisión según datos del sitio de estudio como su temperatura y también según las características de la flota ajustadas a los vehículos de la ciudad de Ibagué:

#### Factor de emisión CO<sub>2</sub>

| Combustible | Tecnología    | Total  |
|-------------|---------------|--------|
| Diesel      | Euro III      | 889.40 |
|             | Euro IV       | 797.60 |
|             | Euro V        | 775.60 |
|             | Euro VI A/B/C | 793.30 |
|             | Total         | 822.30 |

Tabla 10. Factor de emisión CO<sub>2</sub>. Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV

#### Factor de emisión CH<sub>4</sub>

| Combustible | Tecnología    | Total |
|-------------|---------------|-------|
| Diesel      | Euro III      | 0.10  |
|             | Euro IV       | 0.01  |
|             | Euro V        | 0.01  |
|             | Euro VI A/B/C | 0.01  |
|             | Total         | 0.04  |

Tabla 11. Factor de emisión CH<sub>4</sub>. Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV.

#### Factor de emisión N<sub>2</sub>O

| Combustible | Tecnología    | Total |
|-------------|---------------|-------|
| Diesel      | Euro III      | 0.01  |
|             | Euro IV       | 0.01  |
|             | Euro V        | 0.03  |
|             | Euro VI A/B/C | 0.04  |
|             | Total         | 0.02  |

Tabla 12. Factor de emisión N<sub>2</sub>O. Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV

La siguiente tabla recopila los resultados explícitos por contaminante:

| Contaminante     | FE (g/km) | Emisiones (ton/año) |
|------------------|-----------|---------------------|
| CO <sub>2</sub>  | 822.30    | 54058.30            |
| CH <sub>4</sub>  | 0.03      | 2.35                |
| N <sub>2</sub> O | 0.02      | 1.08                |

Tabla 13. Factores de emisión y emisiones de los GEI. Fuente: Elaboración propia con base en resultados COPERT IV

La tabla 13 representa en la columna de emisiones por año la cantidad de contaminantes que se reducirían al año en toneladas si la flota actual se cambiara totalmente por una flota eléctrica, siendo más de 53.000 toneladas de CO<sub>2</sub>, 2.35 toneladas de CH<sub>4</sub> y un poco más de 1 tonelada de N<sub>2</sub>O.

### **3.4.3. Discusión de los resultados**

Conociendo estos resultados se puede llevar a cabo su interpretación al conocer la representación en tema de emisiones tanto departamental como nacionalmente, por medio del Inventario de emisiones de Gases de Efecto Invernadero realizado en Colombia en el año 2017 se puede observar que el departamento del Tolima representa anualmente en emisiones 6.97 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq, la flota de transporte público según este estudio con 54058 toneladas representa a esta cantidad casi el 1%; teniendo en cuenta que el departamento del Tolima genera altos índices de absorciones de GEI, esto debido principalmente al crecimiento de cultivos permanentes ya que en el departamento se encuentra sembrado el 12% del área nacional de café, por lo cual en emisiones netas el Tolima solo genera 1.52 millones de toneladas, para lo que este estudio representaría el 3.55% de estas emisiones totales netas a nivel departamental.

Al hacer un análisis más específico se tienen en cuenta las emisiones clasificadas solo en el sector transporte generadas por todo el departamento, estas son representadas con 0.93 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq anual, para el caso de estudio las emisiones de transporte público colectivo de la ciudad de Ibagué representan casi el 6% del total de las emisiones ocasionadas por el transporte en general en el departamento.

A nivel nacional, los resultados del estudio de solo la flota de transporte público colectivo de la ciudad de Ibagué representan más emisiones que las ocasionadas por el sector transporte en su totalidad en departamentos como el Guaviare, Arauca, Amazonas, Vichada, Guainía y Vaupés; Al analizar la ciudad de Bogotá, al ser la capital del país y con su importancia en movilidad destaca que la cantidad de emisiones generadas por el sector transporte representa el 57.93% de las emisiones totales, superando las 6 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq por causadas principalmente por el transporte terrestre y aéreo debido a que allí se encuentra el Aeropuerto el Dorado uno de los más importantes de Latinoamérica y también a la gran cantidad de habitantes que se movilizan a diario; el

transporte terrestre de la ciudad genero para el año 2017 4,74 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> eq, se calcula que el 21,8% de estas emisiones proviene de buses del Sistema Integrado de Transporte Publico representado por los buses provisionales, los alimentadores, zonales y troncales, lo que representaría en promedio 1,03 millones de toneladas de CO<sub>2</sub>eq por año, que al compararlo con una ciudad como Ibagué es 19 veces sus emisiones, esto teniendo en cuenta que tanto en habitantes como en cantidad de buses las dos ciudades representan grandes diferencias.

Por otro lado, conociendo los factores de emisión de cada contaminante se pueden realizar distintos tipos de análisis, entre estos el comparar entre rutas cual es la más contaminante, esto conociendo además del factor de emisión, los kilómetros recorridos al día por cada bus clasificado por su tecnología y además de su ruta, esto gracias a los datos suministrados por la empresa SISTA S.A. donde se conocieron la caracterización específica de un día de operación normal en la ciudad de Ibagué.

| Ruta   | EURO III | EURO IV | EURO V | EURO VI | CO <sub>2</sub> (ton) *<br>ruta * día |
|--------|----------|---------|--------|---------|---------------------------------------|
| 1      | 0.68     | 1.22    | 0.74   | 0.15    | 2.79                                  |
| 2      | 1.34     | 1.50    | 0.44   | 0.00    | 3.28                                  |
| 4 / 7. | 1.40     | 0.90    | 0.70   | 0.18    | 3.18                                  |
| 6      | 2.52     | 2.10    | 1.41   | 0.64    | 6.66                                  |
| 8      | 1.71     | 1.84    | 1.79   | 0.31    | 5.66                                  |
| 9      | 0.86     | 1.85    | 0.90   | 0.31    | 3.93                                  |
| 11     | 3.14     | 4.22    | 1.10   | 0.56    | <b>9.02</b>                           |
| 14     | 2.28     | 2.05    | 0.80   | 0.61    | 5.74                                  |
| 15     | 0.80     | 0.84    | 0.35   | 0.36    | 2.35                                  |
| 17     | 0.98     | 1.32    | 0.43   | 1.10    | 3.84                                  |
| 18     | 1.21     | 4.55    | 1.26   | 0.22    | 7.24                                  |
| 19     | 2.16     | 3.23    | 1.05   | 0.21    | 6.65                                  |
| 20     | 1.20     | 1.44    | 0.17   | 0.54    | 3.34                                  |
| 21     | 1.53     | 1.37    | 1.48   | 0.45    | 4.83                                  |
| 22     | 1.57     | 2.61    | 1.17   | 0.20    | 5.55                                  |
| 23     | 1.23     | 3.10    | 1.08   | 0.66    | 6.07                                  |

|  |       |       |       |       |      |
|--|-------|-------|-------|-------|------|
| <b>24</b>                              | 0.90  | 2.69  | 0.52  | 0.54  | 4.65 |
| <b>28</b>                              | 1.29  | 3.47  | 0.56  | 0.86  | 6.18 |
| <b>29</b>                              | 0.57  | 0.17  | 0.17  | 0.51  | 1.42 |
| <b>31</b>                              | 2.45  | 1.54  | 1.28  | 0.00  | 5.28 |
| <b>33</b>                              | 2.31  | 0.92  | 0.22  | 0.23  | 3.68 |
| <b>35</b>                              | 4.68  | 3.50  | 0.00  | 0.35  | 8.52 |
| <b>37</b>                              | 1.00  | 1.78  | 1.01  | 0.15  | 3.94 |
| <b>40</b>                              | 1.74  | 3.30  | 1.35  | 0.17  | 6.57 |
| <b>43</b>                              | 1.88  | 3.58  | 0.82  | 0.00  | 6.28 |
| <b>48</b>                              | 0.67  | 2.22  | 0.39  | 1.00  | 4.29 |
| <b>50</b>                              | 1.57  | 2.59  | 0.91  | 0.94  | 6.01 |
| <b>53</b>                              | 0.68  | 0.91  | 0.30  | 0.45  | 2.33 |
| <b>82</b>                              | 3.59  | 3.98  | 0.74  | 0.56  | 8.87 |
| <b>90</b>                              | 2.51  | 1.41  | 0.82  | 0.28  | 5.03 |
| <b>92</b>                              | 2.27  | 1.36  | 0.66  | 0.34  | 4.63 |
| San<br>bernardo                        | 0.74  | 0.00  |       |       | 0.74 |
| <b>CO<sub>2</sub> * Euro<br/>* día</b> | 53.48 | 67.55 | 24.63 | 12.87 |      |

Tabla 14. CO2 emitido por ruta y tecnología. Fuente: Elaboración propia

Por medio de este análisis se puede concluir que la ruta que más contamina es definitivamente la numero 11, esto no necesariamente tiene que ver con la longitud de su ruta ya que esta no supera los 35 km, sino especialmente por su operación y despachos, ya que esta es la que tiene la frecuencia más alta con una diferencia de solo 3 minutos y los vehículos de esta ruta en su mayoría son Euro 3; por otro lado, a parte de la ruta esporádica a la vereda de san Bernardo, la ruta 29 es la que menos contamina al día emitiendo solo 1.42 toneladas de CO<sub>2</sub> por día contra las más de 9 toneladas que contamina la ruta 11, esto debido a la poca frecuencia que tiene la ruta 29 cada 40 minutos aproximadamente; en la ilustración 11 se pueden observar en color rojo las rutas más contaminantes la numero 11 y la numero 82, y en color azul la menos contaminantes la 29 y la 53 respectivamente.

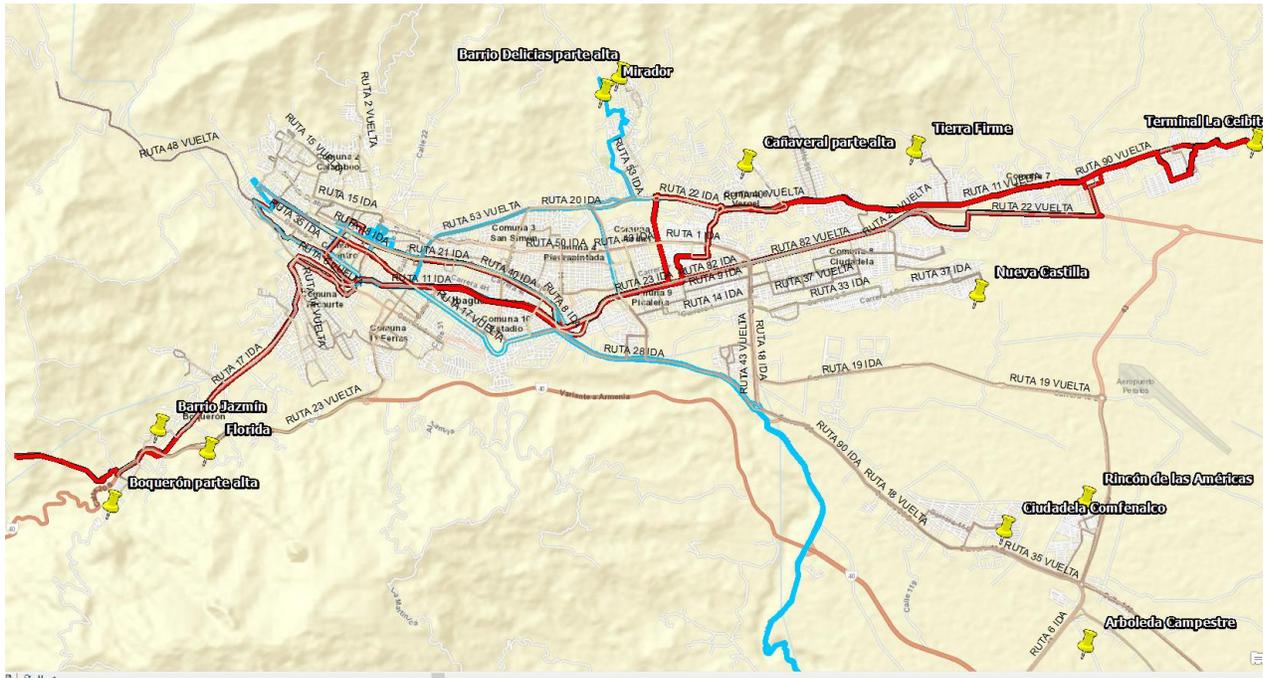


Ilustración 14. Mapa rutas contaminantes. Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, teniendo en cuenta el análisis por tecnología euro se puede observar que por una cantidad significativa al día la tecnología euro IV es la que más emite CO<sub>2</sub> a la atmosfera con 67,55 toneladas al día por los buses que pertenecen a esta clasificación, mientras que la tecnología Euro VI es la que menos emite CO<sub>2</sub> con solo 12.87 toneladas diarias esto debido no solo a la tecnología que permite que contamine menos sino también a la poca cantidad de vehículos que hay de esta tecnología.

### 3.4.4. Análisis de sensibilidad de los resultados frente al factor emisión

Adicional a esto se pudo comparar este estudio por medio de los factores de emisión con el proyecto titulado “Herramienta para la gestión de calidad del aire en Manizales a partir de modelos de transporte y factores de emisión” (Aristizabal et al., 2017.) donde se tienen los factores de emisión en función de la velocidad para el año 2017 en esta ciudad, los datos de este estudio solo van hasta la tecnología euro 3 es por esto que la comparación se hizo solo para esta tecnología, en la siguiente tabla se pueden observar los factores de

emisión del estudio hecho en Manizales según la velocidad y se calculan las emisiones conociendo el factor de actividad del presente estudio.

| Velocidad | FE (CO <sub>2</sub> )<br>(gm/km) | FE (N <sub>2</sub> O)<br>(gm/km) | FE (CH <sub>4</sub> )<br>(gm/km) | EMISIONES<br>CO <sub>2</sub> (Ton) | EMISIONES<br>N <sub>2</sub> O (ton) | EMISIONES<br>CH <sub>4</sub> (ton) |
|-----------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------|
| 5         | 974.08                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 19970.66                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 7         | 974.08                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 19970.66                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 9         | 974.08                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 19970.66                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 10        | 974.08                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 19970.66                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 12        | 960.03                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 19682.52                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 15        | 927.75                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 19020.81                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| <b>18</b> | <b>905.07</b>                    | <b>0.0060</b>                    | <b>0.1033</b>                    | <b>18555.69</b>                    | <b>0.123</b>                        | <b>2.1168</b>                      |
| 21        | 888.27                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 18211.27                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 24        | 875.39                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 17947.25                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 27        | 865.28                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 17739.93                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 30        | 857.20                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 17574.39                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 33        | 850.68                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 17440.66                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 36        | 845.37                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 17331.82                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 39        | 841.03                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 17242.93                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 42        | 837.49                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 17170.31                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 45        | 834.61                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 17111.21                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 48        | 832.28                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 17063.50                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 51        | 830.43                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 17025.52                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 54        | 828.99                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 16995.96                           | 0.123                               | 2.1168                             |
| 55        | 828.59                           | 0.0060                           | 0.1033                           | 16987.79                           | 0.123                               | 2.1168                             |

Tabla 15. Factores de emisión por velocidad estudio de Manizales. Fuente: Elaboración propia.

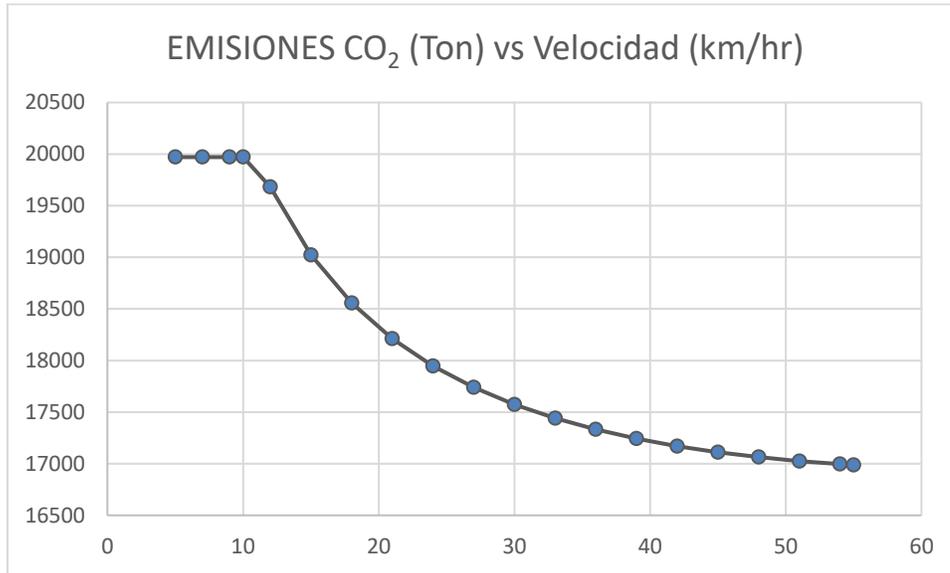


Ilustración 15. Gráfica de emisiones de CO<sub>2</sub> vs velocidad. Fuente: Elaboración propia

Se puede entonces concluir que los resultados son muy similares en el contaminante de CO<sub>2</sub> y es el mismo para el N<sub>2</sub>O y el CH<sub>4</sub>, esta variación puede deberse a distintos aspectos ambientales o de operación que difieren entre las dos ciudades.

| COMPARACIÓN DE RESULTADOS |                       |                        |                       |
|---------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|
| Contaminante              | CO <sub>2</sub> (Ton) | N <sub>2</sub> O (ton) | CH <sub>4</sub> (Ton) |
| <b>COPERT IV</b>          | 18235.30              | 0.12                   | 2.12                  |
| <b>Estudio Manizales</b>  | 18555.60              | 0.12                   | 2.12                  |

Tabla 16. Comparación de resultados. Fuente: Elaboración propia

### 3.4.5. Comparación con otros estudios

A continuación, para un análisis más completo de los resultados obtenidos y el poder revisar si estos son coherentes, se hizo una revisión de documentos de inventario de emisiones de fuentes móviles de otras partes del país y lograr realizar una comparación de resultados con los obtenidos en el presente estudio, se tuvieron en cuenta documentos de Bogotá, Villavicencio, el Valle de Aburrá y Manizales.

## Bogotá

El primer documento revisado es el del inventario de emisiones de fuentes móviles y fuentes fijas industriales año 2018 hecho por la secretaria distrital de ambiente, esta muestra los factores de emisión necesarios para la realización del inventario, allí se recopilan datos medidos por la secretaria de ambiente en campo en convenio con la Universidad Nacional de Colombia junto con los estimados por la universidad de la Salle por medio del software MOVE´s en el año 2013. Allí inicialmente se realiza un inventario de vehículos para la ciudad de Bogotá, los categorizan en 8 clases y luego exponen los factores de emisión de cada vehículo según su tipología, su tecnología euro y su tipo de combustible (Secretaría Distrital de Ambiente, 2019).

En este caso como solo se conocen los factores de emisión estos serán los que se van a comparar con los resultados obtenidos en el presente estudio, los cuales se encuentran representados tanto en emisiones totales como en factores de emisión comparables con los resultados de la secretaria distrital de ambiente SDA, estos clasificados a su vez en tecnología Euro de los cuales solo coinciden con el estudio el Euro IV Y Euro V, con los cuales se hará la comparación:

| Bus            | Combustible | Bogotá                  | Ibagué |
|----------------|-------------|-------------------------|--------|
|                |             | FE CO <sub>2</sub> g/km |        |
| <b>EURO IV</b> | diesel      | 1127.40                 | 797.64 |
| <b>EURO V</b>  | diesel      | 1151.00                 | 793.34 |

Tabla 17. Comparación factor de emisión con resultados Bogotá. Fuente: El autor

Se puede observar que los resultados varían entre 300 y 400 g/km, esto puede deberse a distintos aspectos tales como los ambientales o de operación. En este caso solo se hizo la comparación con el CO<sub>2</sub> ya que este es el único gas de efecto invernadero que es tenido en cuenta en el estudio.

## Villavicencio

Seguidamente se revisó el inventario preliminar de emisiones por fuentes móviles en ruta para la ciudad de Villavicencio realizado por estudiantes de la Universidad Santo Tomás, en este estudio se estimaron los factores de emisión de los contaminantes primarios y también de los gases de efecto invernadero por medio de recolección de datos en campo necesarios para la aplicación del modelo IVE realizado en el año 2019. Para este estudio

fue necesario estudiar algunas vías de la ciudad según su categorización, calcular la cantidad de vehículos que transitan en determinado tiempo y su clasificación, tanto en hora pico como hora valle, y a su vez conocer los kilómetros recorridos por vehículo a diario. Un dato relevante es que para la ciudad de Villavicencio la categoría vehicular más relevante son las motos con las del 68% de la flota, seguido por los vehículos particulares representando el 22%, mientras que los buses representan un poco más del 2% con 2032 buses (Ortiz Gonzalez & Rios Moreno, 2019), ya con los resultados organizados por categoría vehicular se logra reconocer las emisiones para compararlas con las emisiones del presente estudio.

| Contaminante         | Kg/día          |                  |                 | kg/bus/día      |                  |                 |
|----------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
|                      | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> O | CH <sub>2</sub> | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> O | CH <sub>4</sub> |
| <b>Villavicencio</b> | 383608.09       | 2.87             | 0.00            | 188.78          | 0.001            | 0.000           |
| <b>Ibagué</b>        | 143806.92       | 2.87             | 2.35            | 150.27          | 0.003            | 0.002           |

Tabla 18. Comparación de emisiones con estudio Villavicencio. Fuente: El autor

Se hizo la comparación tanto por kg/día, unidades que da el estudio, y también está por bus para un análisis más detallado, los resultados son similares especialmente para el N<sub>2</sub>O en cuanto al CO<sub>2</sub> hay una diferencia de aproximadamente 38 kg por bus, aspectos que pueden variar por características únicas de cada territorio, pero que es un valor similar al del presente estudio, igualmente para los demás contaminantes.

### **Valle de Aburrá**

Como instrumento de gestión del valle de Aburrá, El Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire además de lograr identificar necesidades de la región respecto a la calidad del aire, para de esta forma planear estrategias que permitan la disminución de contaminación y emisiones, para cualquier tipo de plan en pro de mejorar la calidad del aire es necesaria la realización de un inventario de emisiones que permita identificar la situación actual de la región y permita la toma de decisiones correcta frente a lo que se debe llevar a cabo para cumplir estos objetivos.

Para el cálculo de emisiones de fuentes móviles realizado en este estudio se aplicó el modelo LEAP (longe-range Energy Alternatives Planning System), desarrollado en el instituto de Medio Ambiente de Estocolmo, utilizado en el valle de Aburrá desde el 2011 y

hasta el 2018 en todas sus actualizaciones. El parque automotor de la región lo conforman un poco más de un millón y medio de vehículos, en su mayoría motos con el 54%, 38% automóviles y buses con menos del 1% con un total de 5292 unidades, datos de entrada necesarios para la realización de este estudio, junto con el cilindraje de los vehículos y el tipo de combustible (Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana, 2019). También es necesario conocer el perfil de antigüedad y el kilometraje recorrido anualmente por cada vehículo en promedio, los resultados los brindan tanto para contaminantes criterio, tipo de combustible y gases de efecto invernadero, estos son comparados con el estudio hecho para Ibagué y se obtienen los siguientes resultados:

| Ciudad                 | Ton*año         |                  |                 | Ton*año*bus     |                  |                 |
|------------------------|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|------------------|-----------------|
|                        | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> O | CH <sub>4</sub> | CO <sub>2</sub> | N <sub>2</sub> O | CH <sub>4</sub> |
| <b>Valle de aburrá</b> | 144320.00       | 5.00             | 13.00           | 28.95           | 0.0010           | 0.0026          |
| <b>Ibagué</b>          | 54058.30        | 1.08             | 2.35            | 56.49           | 0.0011           | 0.0025          |

Tabla 19. Comparación de emisiones con estudio Valle de Aburrá. Fuente: El autor

Se pueden observar resultados variables especialmente para el CO<sub>2</sub>, siendo relativamente más pequeña las emisiones de CO<sub>2</sub> por bus en el valle de Aburrá, superada por Ibagué en aproximadamente 27.5 toneladas por año por bus más que en el valle de aburra, casi duplicando su resultado, esto puede deberse a la tecnología de los buses de esta región que pueden ser más modernos y por eso permiten la reducción significativa de emisiones, mientras que el parque automotor de buses de la ciudad de Ibagué es relativamente antiguo.

### **Manizales**

Esta comparación se hace con un estudio realizado en la ciudad de Manizales en el año 2017 el cual es una actualización del inventario de emisiones atmosféricas en esta ciudad, este es estimado por fuentes antropogénicas asociadas a fuentes móviles en ruta y también de fuentes estacionarias, se tuvieron en cuenta contaminantes criterio, compuestos orgánicos volátiles, gases de efecto invernadero y black carbón.

Para la realización de la actualización del inventario de fuentes móviles fue necesario revisar y recopilar información actualizada del parque automotor de la ciudad buscando conocer principalmente la tecnología de estos y su cantidad. Manizales tiene en promedio

un 48.3% de vehículos particulares, seguido por un 47,1% de motos, del restante solo el 1,5% corresponde a los buses contando con un total de 2604 unidades (Valencia, 2019).

| Ciudad           | Ton/año   |      |      | Ton/año*bus |        |        |
|------------------|-----------|------|------|-------------|--------|--------|
|                  | CO2       | N2O  | CH4  | CO2         | N2O    | CH4    |
| <b>Manizales</b> | 128862.90 | 1.80 | 0.00 | 49.4865     | 0.0007 | 0.0000 |
| <b>Ibagué</b>    | 54058.30  | 1.08 | 2.35 | 56.4873     | 0.0011 | 0.0025 |

Tabla 20. Comparación de resultados emisiones estudio Manizales. Fuente: El autor

Los resultados frente a los obtenidos para el presente caso de estudio son similares varían en algo más de 7 toneladas por año por bus.

## 4. Recomendaciones para la implementación y sus costos

Cumpliendo con los objetivos presentados previamente al estudio se hace un análisis de los posibles costos que tendría la implementación de esta flota en la ciudad y según el estudio presentado las formas de implementación que se pueden llevar a cabo. Siguiendo la metodología que se presenta a continuación:



Ilustración 16. Metodología general. Fuente: Elaboración propia.

Inicialmente se tiene en cuenta el tema de costos donde se comienza haciendo un análisis de las ciudades que han implementado este tipo de tecnologías y los costos que han tenido, resaltando el país de china ya que debido a su gran demanda es donde son más económicos este tipo de vehículos; adicional a esto resaltan dos marcas importantes en el mercado de los buses eléctricos que son BYD y Yutong, por lo cual se analizan algunos de sus vehículos con sus respectivas características.

No obstante, es importante no solo conocer el precio de adquisición de un vehículo eléctrico sino también sus costos de operación y mantenimiento, de los cuales se tienen en cuenta costos fijos y variables, contando con el costo de mantenimiento, de instalación y operación de una estación de recarga, de cambio de lubricantes y llantas, entre otros. Conociendo estos datos se hace un análisis de costos tanto iniciales como de una operación de 15 años comparando los dos tipos de vehículos y sus beneficios económicos a largo plazo.

Por otro lado, se brindan alternativas de implementación realistas y graduales que permitan empezar reduciendo la mayor cantidad de emisiones posibles y que sea de forma adecuada para el municipio teniendo a su vez en cuenta los vehículos más antiguos.

## **4.1. Costos**

Además de reconocer la importancia de la implementación de tecnología eléctrica para los vehículos y su aporte en la reducción de emisiones, es importante tener un aproximado de costos de este para una implementación hipotética y los gastos que esta acarrearía, es por esta razón que se hizo una revisión de distintos documentos que permitan visualizar los precios de cada bus y de su operación.

El estudio de factibilidad de ómnibus eléctrico para la universidad de Villa María en Argentina brinda diferentes opciones de buses basados en precios aproximados para este país; según este estudio China es quien lidera las ventas mundiales de autobuses eléctricos, tanto a batería como híbridos que ha superado en los últimos años la venta de más de 100.000 unidades al año; a nivel mundial los principales fabricantes de estos buses son las marcas BYD y Yutong, el más vendido ha sido de la marca BYD, con un largo de 12 metros, con una autonomía de más de 250 km y capacidad de batería aproximada de 330 kWh; por otro lado, en Europa resaltan marcas como Volvo, Solaris y VDL que han avanzado en producción de vehículos eléctricos, y en Estados Unidos principalmente la empresa Proterra también brinda alternativas de estos vehículos con gran avance tecnológico (Pierantonelli & Quintilla, 2019).

| <b>Mercado</b>         | <b>Diésel convencional</b> | <b>Eléctrico</b>    | <b>Costo adicional eléctrico</b> |
|------------------------|----------------------------|---------------------|----------------------------------|
| <b>China</b>           | \$60,000-\$90,000          | \$280,000-\$350,000 | 420%                             |
| <b>India</b>           | \$75,000-\$110,000         | \$325,000-\$410,000 | 300%                             |
| <b>Rusia</b>           | \$130,000-\$180,000        | \$400,000-\$500,000 | 190%                             |
| <b>América Latina</b>  | \$200,000-\$225,000        | \$410,000-\$500,000 | 115%                             |
| <b>Resto del Mundo</b> | \$100,000-\$350,000        | \$300,000-\$700,000 | 120%                             |
| <b>Europa</b>          | \$250,000-\$350,000        | \$575,000-\$680,000 | 110%                             |
| <b>Norte América</b>   | \$300,000-\$400,000        | \$595,000-\$690,000 | 85%                              |
| <b>Promedio</b>        | <b>\$200,000</b>           | <b>\$480,000</b>    | <b>140%</b>                      |

Ilustración 17. Precios de buses mercado internacional en dólares. Fuente:(Pierantonelli & Quintilla, 2019)

Mediante esta tabla se puede evidenciar que los buses eléctricos prácticamente duplican el precio de los autobuses convencionales, por lo cual genera algo de incertidumbre en el desarrollo de este tipo de iniciativas, a pesar de que china es el principal comprador de estos buses es el país donde hay más del 420% de incremento en el costo de estos, pero es en donde los compran a precio más económico que en el resto del mundo desde 280.000 dólares por unidad. Para américa latina por otro lado sube el precio de los convencionales a los eléctricos casi el doble costando entre 410.000 y 500.000 dólares por bus.

|                            |   |   |
|----------------------------|---|---|
| <b>Modelo</b>              | E12   | BYD K9G   |
| <b>Costo</b>               | USD 450 000   | USD 500 000   |
| <b>Largo</b>               | 12 metros   | 12.5 metros   |
| <b>Ancho</b>               | 2.55 metros   | 2.55 metros   |
| <b>Alto</b>                | 3.34 metros   | 3.44 metros   |
| <b>Peso</b>                | 13000 kg  | 14130 kg  |
| <b>Consumo</b>             | 1 kWh/km (Fuente: experiencia Chile)  | 1,2 kWh/km (Fuente: Experiencia Uruguay, Chile)                   |
| <b>Tipo de cuerpo</b>      | Estructura monocasco de acero   | Estructura monocasco de acero                                     |
| <b>Motor</b>               | Motor eléctrico PMSM Yutong YTM280-CV9-H único.   | AC síncrono de imanes permanentes. Dos motores en rueda.          |
| <b>Potencia del motor</b>  | Pmax: 350 kW. El motor está refrigerado por agua con su propio radiador.  | P max 150 kW x 2 (201 HP x 2).                                    |
| <b>Torque</b>              | 2.400 Nm  | 550 Nm x 2  |
| <b>Frenado</b>             | Sistema de frenos de aire de doble circuito con frenos de disco delanteros y traseros. Sistema de frenado regenerativo. Suministro de aire del compresor de accionamiento eléctrico.  | Freno de disco, freno neumático. Sistema de frenado regenerativo. |
| <b>Paquete de Baterías</b> | 12 paquetes de baterías LFP (fosfato de hierro y litio), capacidad total de 324kWh. El sistema de gestión de la batería es exclusivo de Yutong y monitorea constantemente la temperatura, el voltaje, la corriente y la capacidad de las baterías. Cada paquete pesa 180kgs. El diseño modular de los paquetes de baterías significa que se pueden cambiar fácilmente en el futuro si hay una mejor tecnología de baterías disponible a mitad de la vida útil del vehículo. | Baterías LFP (fosfato de hierro y litio). Capacidad 324 kWh.      |
| <b>Rango</b>               | 220 km  | 250 km  |
| <b>Cant. de pasajeros</b>  | 92 (32 sentados y 60 parados)   | 81 (32 sentados y 49 parados)                                     |
| <b>Confort</b>             | Aire acondicionado, calefacción, puertos USB para pasajeros, área de silla de ruedas, entre otros.  | Aire acondicionado, calefacción, silla de ruedas, entre otros.    |

Ilustración 18. Características de buses chinos disponibles en el mercado latinoamericano. Fuente:

Este estudio también tiene en cuenta dos tipos de buses comerciales disponibles en ese momento para su compra y con los cuales se hace una comparación, variando distintos aspectos como su torque, potencia, motor, baterías, pasajeros, autonomía y por supuesto su precio como se observa en la ilustración 12.

El siguiente estudio revisado basado en incentivar el uso de buses eléctricos en el valle de aburra, tiene en cuenta diferentes alternativas de buses de origen chino, dos de estas de la empresa BYD, dos de Higer y uno Sunlong que varían entre 193000 y 660.000 dólares cada uno, el estudio recalca la importancia de tener en cuenta la capacidad de pendiente y potencia de los buses para lograr hacer la mejor elección (Gil Velásquez, 2018).

|                 |              |                                   |                        |             |                        |                        |
|-----------------|--------------|-----------------------------------|------------------------|-------------|------------------------|------------------------|
| <b>Marca</b>    |              | BYD                               | BYD                    | Higer       | Sunlong                | Higer                  |
| <b>Modelo</b>   |              | eBus Andino - 18                  | eBus Andino - 12       | KLQ6832GE V | SLK6903E V             | KLQ6129G EV            |
| <b>Segmento</b> |              | Comercial de pasajeros articulado | Comercial de pasajeros | Urbano      | Comercial de pasajeros | Comercial de pasajeros |
| <b>General</b>  | Tipo         | Eléctrico                         | Eléctrico              | Eléctrico   | Eléctrico              | Eléctrico              |
|                 | Origen       | China                             | China                  | China       | China                  | China                  |
|                 | Precio (USD) | \$660.000                         | \$460.000              |             |                        | \$193.000              |

Ilustración 19. Características buses eléctricos. Fuente: (Gil Velásquez, 2018)

A pesar de que la marca BYD es una de las más conocidas y utilizadas en Colombia se puede ver que hay otras marcas con opciones similares y un poco más económicas, variando el precio desde 193.000 dólares por bus a 660.000.

La ciudad de Bogotá es un gran referente en materia de buses eléctricos ya que actualmente es la ciudad de América Latina que más tiene operando unidades de estos, superando a Chile que se mantuvo por mucho tiempo como líder en estas tecnologías, esto con la adquisición de varias unidades para su operación en el SITP; se calcula que cada bus tuvo un costo promedio alrededor de los 700 millones de pesos que varían según la caracterización de los vehículos pero que se destacan por ser todos de la marca BYD ganadora para la licitación de la adquisición de estos en la capital, estos cuentan con una autonomía de 250 a 350 km y sus baterías están compuestas de hierro fosfato con mecanismo de refrigeración lo que disminuye la degradación de la capacidad de carga. (*BYD Lidera El Mercado de Los Buses Eléctricos En Colombia | Economía | Portafolio*, 2020)

Se tiene en cuenta a su vez el estudio de costos hecho por el grupo de Investigación en Movilidad Sostenible de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales, en el año 2019. Estudio hecho al bus eléctrico Ebus BYD K7 que se caracteriza por tener una autonomía mayor o igual a 220 km además de esto cuenta con un sistema de freno regenerativo que retroalimenta la energía de la fuerza de frenado y la velocidad máxima que no debe exceder los 70 km/h (Ocampo González, 2019).

| ESPECIFICACIONES DEL VEHICULO Ebus BYD            |           |          |             |
|---|-----------|----------|-------------|
| DIMENSIONES                                       | LONGITUD  | mm       | 9893        |
|   | ANCHO     | mm       | 2400        |
|   | ALTURA    | mm       | 3286        |
| DISTANCIA ENTRE EJES                              | LONGITUD  | mm       | 5703        |
| RODADO  | DELANTERO | mm       | 2110        |
|   | TRASERO   | mm       | 1904        |
| KILOMETRAJE POR CADA CARGA EN CONDICIONES URBANAS |           | Km       | >= 220      |
| PESO MAXIMO AUTORIZADO                            |           | Kg       | 12390/10418 |
| ANGULO DE ACERCAMIENTO                            |           | ° Grados | 12          |
| ANGULO DE SALIDA                                  |           | ° Grados | 8           |
| RADIO MINIMO DE GIRO                              |           | ° Grados | <=11        |
| DESPEJE DEL SUELO DESDE EL ESTRIBO DE PASAJEROS   |           | mm       | <=256       |
| PENDIENTE MAXIMA                                  |           | %        | <=17        |
| VELOCIDAD MAXIMA                                  |           | Km/h     | 70          |
| TIEMPO DE ACELERACION DE 0 A 50 Km/h              |           | s        | <=23        |

Ilustración 20. Características de bus en estudio Ebus BYD. Fuente: (Ocampo González, 2019)

Para un correcto estudio de costos es necesario tener en cuenta costos variables y costos fijos, los primeros son aquellos que cambian directamente conforme a la actividad en este caso sería la energía eléctrica que alimenta los buses según su uso; para una carga completa y rápida de un bus contando con el valor de Kw en pesos sería de un poco más de 600 se tiene que por carga se irían unos 58.881 pesos colombianos.

Es importante también tener en cuenta los costos de la instalación de una estación de carga de vehículos o más conocida como electrolinera, basado en una ya existente de la empresa CHEC en Medellín se obtiene la siguiente tabla de precios

| ELECTROLINERA |  |                |                |                |
|---------------|--|----------------|----------------|----------------|
|               |  | RÁPIDA         | LENTA          | AMBAS          |
| 1             | <b>DISEÑOS</b>                         | \$ 8.301.640   | \$ 8.301.640   | \$ 8.301.640   |
| 2             | <b>EQUIPOS, MATERIALES E INSUMOS</b>   | \$ 144.805.874 | \$ 68.513.583  | \$ 163.482.473 |
| 2.1           | Eléctricos                             | \$ 45.519.384  | \$ 45.519.384  | \$ 45.519.384  |
| 2.2           | Sistema Solar Fotovoltaico             | -              | -              | -              |
| 2.3           | Infraestructura de carga               | \$ 98.643.890  | \$ 22.351.599  | \$ 117.320.489 |
| 2.4           | Sistema de datos/comunicación          | \$ 642.600     | \$ 642.600     | \$ 642.600     |
| 3             | <b>OBRAS</b>                           | \$ 24.930.264  | \$ 24.930.264  | \$ 24.930.264  |
| 3.1           | Obra civil eléctrica                   | \$ 14.345.333  | \$ 14.345.333  | \$ 14.345.333  |
| 3.2           | Obras SSFV                             | -              | -              | -              |
| 3.3           | Obra civil                             | \$ 10.584.931  | \$ 10.584.931  | \$ 10.584.931  |
| 3.4           | Expansión                              | -              | -              | -              |
| 4             | <b>SOFTWARE ESPECIALIZADO</b>          | -              | -              | -              |
| 5             | <b>SERVICIOS TÉCNICOS</b>              | \$ 2.677.500   | \$ 2.677.500   | \$ 2.677.500   |
| 6             | <b>IMAGEN CORPORATIVA Y PUBLICIDAD</b> | \$ 11.721.500  | \$ 11.721.500  | \$ 11.721.500  |
| 7             | <b>ASPECTOS LEGALES</b>                | -              | -              | -              |
| 8             | <b>PERSONAL DE APOYO</b>               | -              | -              | -              |
| 9             | <b>TERRENO</b>                         | -              | -              | -              |
| 10            | <b>VEHICULOS ELÉCTRICOS</b>            | -              | -              | -              |
| 11            | <b>OTROS</b>                           | -              | -              | -              |
|               | <b>SUBTOTAL</b>                        | \$ 192.436.778 | \$ 116.144.487 | \$ 211.113.377 |
|               | <b>IMPREVISTOS (5%)</b>                | \$ 202.058.617 | \$ 121.951.711 | \$ 221.669.046 |

Ilustración 21. Costo instalación electrolinería. Fuente:(Gil Velásquez, 2018)

Se tiene en cuenta también la compra de lubricantes para el correcto uso del vehículo este tiene un costo aproximado de 1'810.000, superando más de 5 veces el costo de los lubricantes para un autobús a combustión; el cambio de llantas tiene un costo de 9'372.300 cada 16 meses en un autobús eléctrico, asimismo se tiene en cuenta el cambio de filtros que para este tipo de vehículos solo se necesita un filtro de aire ya que no necesita filtro de aceite ni de combustible lo que reduce su costo solo a 65.000 un 58% menos al precio del bus convencional.

Es importante también tener en cuenta costos de mantenimiento que incluye revisión de suspensiones, baterías, mantenimiento de mordazas y circuitos eléctricos, escaneo del sistema del vehículo y si es necesario, cambio de aceite, pastillas y del filtro del aire acondicionado, este tiene un costo variable de más de 600.000 pesos colombianos.

Por otro lado, se debe tener en cuenta el sueldo promedio de los conductores que suele ser mayor al sueldo de un conductor de un autobús convencional debido a que los

conductores de buses eléctricos deben estar capacitados en el tema de su funcionamiento y mecánica, y saber qué hacer ante cualquier eventualidad, por lo cual el sueldo junto con las prestaciones de ley es de aproximadamente 1´486.404 para la ciudad de Manizales.

A su vez también se tienen los costos fijos, los cuales son aquellos que permanecen constantes dentro de un periodo de tiempo, entre estos se cuentan el servicio de garaje, que es igual al de un bus a combustión, los impuestos los cuales solo se pagan para los vehículos convencionales ya que los vehículos eléctricos están exentos; el seguro o soat junto con la revisión técnico mecánica la cual no aplica para este tipo de vehículos, entre otros, los cuales se muestran en la siguiente tabla:

| <b>COSTOS DE OPERACIÓN MENSUAL</b> |                      |                       |
|------------------------------------|----------------------|-----------------------|
| <b>TIPO DE COSTOS</b>              | <b>TIPO DE BUS</b>   |                       |
|                                    | <b>BUS ELECTRICO</b> | <b>BUS COMBUSTION</b> |
| <b>COSTOS FIJOS</b>                | \$ 2.668.866         | \$ 3.148.235          |
| SEGUROS                            | \$ 500.054           | \$ 286.879            |
| SALARIOS                           | \$ 1.486.404         | \$ 828.116            |
| PARQUEADERO                        | \$ -                 | \$ 413.310            |
| IMPUESTOS                          | \$ -                 | \$ 380.000            |
| MANTENIMIENTO                      | \$ 682.408           | \$ 1.239.930          |
| <b>COSTOS VARIABLES</b>            | <b>\$ 1.862.014</b>  | <b>\$ 4.979.369</b>   |
| COMBUSTIBLE                        | \$ 942.078           | \$ 4.133.100          |
| LLANTAS                            | \$ 585.769           | \$ 610.269            |
| LUBRICANTES                        | \$ 301.667           | \$ 158.000            |
| FILTROS                            | \$ 32.500            | \$ 78.000             |
| <b>TOTAL</b>                       | <b>\$ 4.530.880</b>  | <b>\$ 8.127.604</b>   |

Ilustración 22. Comparación costos de operación. Fuente:(Ocampo González, 2019)

Luego del estudio detallado de costos tanto fijos como variables para la ciudad de Manizales se llega a la conclusión de que a pesar de que la adquisición de un bus eléctrico es más costosa que la de un bus convencional, además de ahorrar en emisiones se ahorra en su operación casi la mitad de lo que se necesita para un bus a combustión.

Para los buses convencionales se hace una cotización a la empresa Chevrolet que es la vendedora de los buses que actualmente circulan en la ciudad de Ibagué prestando el servicio de transporte público urbano, para lograr calcular su precio se tienen en cuenta el precio del chasis que es fabricado por Chevrolet es el buseton NQR reward Euro V ABS de longitud aproximada de 9 metros y capacidad para 32 personas, que tiene las siguientes especificaciones:

1. Motor 4HK1-TCN
2. Turbocargador de geometría variable e intercooler
3. Sistema Common Rail



Ilustración 23. Características chasis bus convencional. Fuente: Chevrolet

Adicional a esto la empresa Busscar es la encargada de la carrocería, empresa en Colombia con más de 20 años de experiencia la cual brinda características técnicas y constructivas como puertas, elevador, bodega de herramienta, alarma, sillas plásticas tapizadas, entre otros.



Ilustración 24. Carrocería de buses. Fuente: Busscar

Los precios se muestran a continuación:

| Tipología         | Empresa   | Modelo     | Precio (COP)             |
|-------------------|-----------|------------|--------------------------|
| <b>Chasis</b>     | Chevrolet | NQR Reward | \$ 149,500,000.00        |
| <b>Carrocería</b> | Busscar   | Optimus    | \$ 116,500,000.00        |
| <b>Total</b>      |           |            | <b>\$ 266,000,000.00</b> |

Tabla 21. Precio bus convencional. Fuente: El autor

### Comparación de precios

Se hace entonces finalmente un análisis de costos teniendo en cuenta costos de adquisición y de operación a su vez, conociendo que en la adquisición el vehículo eléctrico

supera en precio al convencional, pero demostrando que en los 15 años otorgados de operación se ahorra más de 200 millones de pesos colombianos adquiriendo un bus eléctrico, esto sin contar las toneladas de emisiones que se dejarían de producir por este sector, este análisis se observa en la siguiente tabla, se toma en cuenta el valor del bus eléctrico como aquel de los buses de la nueva flota adquirida para Bogotá ya que además de ser una ubicación cerca al lugar de estudio, es la flota más moderna en el país:

| Bus                 | COSTO             |                     |                     |
|---------------------|-------------------|---------------------|---------------------|
|                     | Adquisición       | Operación * 15 años | Total 15 años       |
| <b>Convencional</b> | \$ 266,000,000.00 | \$ 1,462,968,720.00 | \$ 1,728,968,720.00 |
| <b>Eléctrico</b>    | \$ 700,000,000.00 | \$ 815,558,400.00   | \$ 1,515,558,400.00 |

Tabla 22. Comparación de precios periodo 15 años. Fuente: El autor.

## 4.2. Recomendaciones para la implementación

Es importante reconocer que a pesar de que es necesario el implementar opciones para la reducción de emisiones a nivel mundial y una opción para esto es el implementar buses eléctricos, estos no pueden adquirirse de forma inmediata, se debe hacer de forma paulatina contando con opciones para adquisición del presupuesto, apoyo del estado y teniendo en cuenta la importancia de sacarle el mayor provecho posible a las unidades que se empiecen a adquirir.

Se debe resaltar en este caso la necesidad de una base metodológica necesaria para la implementación de este tipo de proyectos en la realidad, para esto se tiene en cuenta la metodología M/T-ECC01 para proyectos de reducción de emisiones GEI mediante la mejora de eficiencia por cambio de combustible en transporte terrestre, está por la certificadora de carbono CERCARBONO, este documento plantea recomendaciones básicas para diseñar y ejecutar este tipo de proyectos y que permita que se certifiquen al demostrar la reducción de emisiones y recibir diferentes clases de beneficios; para esto se necesita cumplir con principios tales como confiabilidad, conservadurismo, consistencia, exactitud, exhaustividad, pertinencia, precisión y transparencia; adicional a esto es

necesario el demostrar la reducción de emisiones y el impacto positivo en determinado lugar geográfico donde se lleve a cabo, demostrar también que se es propietario o tiene autorización de los propietarios de la flota de vehículos de estudio la cual será cambiada y demostrar que tiene un impacto importante en el desarrollo sostenible, por otra parte, se deben reconocer los beneficios tanto sociales, ambientales y económicos (CERCARBONO, 2021).

Seguidamente, es importante identificar las partes interesadas en el proyecto, a su vez, identificar la metodología de estimación de emisiones ya sea Top-Down o Bottom-Up, reconocer las fuentes de emisión a trabajar junto con sus características y calculando datos de la operación de esta, obteniendo de esta forma el total de las emisiones de GEI en el escenario de la línea base; Adicional a esto, es importante identificar otras opciones vehiculares las cuales puedan reemplazar la flota actual, se identifican también las emisiones de estas según sus características teniendo en cuenta datos de operación actual, y con esto se selecciona la opción de emisiones más bajas para la sustitución aplicando el principio del conservadurismo.

Finalmente, se trabaja en el escenario del proyecto calculando las emisiones en el caso de implementación de nuevas tecnologías, allí se definen los tipos de emisiones al tener en cuenta ya sean solo de tubo de escape, evaporativas, de producción de energía eléctrica en el caso de vehículos con esta tecnología o por fugas según como se concrete; seguidamente conociendo las emisiones tanto de la línea base como el escenario del proyecto se realiza la cuantificación de resultados que básicamente es la resta de las emisiones actuales y las del proyecto.

Es importante resaltar que estos tipos de proyectos necesitan de una medición y monitoreo después de su implementación, allí se debe verificar que se cumplan los principios planteados inicialmente, que se alinee con los requisitos metodológicos y tener un plan estructurado de monitoreo, haciendo reportes del proyecto que debe ser inscrito en el Registro Nacional de Reducción de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (RENARE), también debe verificarse el proyecto constatando que las metas de reducción de emisiones se alcanzaron y se utilizó la metodología de forma adecuada, y finalmente se debe realizar la cuantificación de incertidumbres donde se revisen las falencias y se prioricen esfuerzos en pro de las mejoras (CERCARBONO, 2021).

Inicialmente son muchas las barreras que se tienen en el mundo para la adopción de buses eléctricos, esto confirmado con un estudio realizado por varios investigadores que tuvieron en cuenta la experiencia de 10 ciudades como Quito, México, Belo Horizonte, Sudáfrica, Madrid, Bogotá, Filadelfia, Shenzhen, entre otras, por medio de las cuales les fue posible identificar las barreras claves para la implementación de este tipo de tecnología, primeramente se tienen barreras de tipo tecnológico donde resalta la falta de conocimiento, existe gran falta de información inicial que permita conocer los datos relevantes para un análisis de costo beneficio de no solo los buses sino también su infraestructura, asimismo, resultan una barrera las particularidades tanto operacionales y de mantenimiento de este tipo de buses, y los requisitos y características necesarias para una correcta infraestructura; otro tema tecnológico importante es la limitación de potencia y duración de batería de los buses eléctricos frente a los convencionales esto debido a la industria poco madurada de baterías y buses de este tipo, a su vez, los desafíos de la implementación de infraestructura de carga ya que son nuevas y no se tiene absoluto conocimiento de estas.

Por otro lado, se tienen barreras financieras, estas debido a que no se tiene aún la confianza de las instituciones gubernamentales para apoyar este tipo de proyectos ya que ellas suelen utilizar inversiones a bajo costo y bajo riesgo, y no tienen en consideración proyectos que aunque son costosos en la inversión pueden tener menores costos a largo plazo; cualquier tipo de inversión a tecnologías no maduras como la electrificación del transporte requieren de un alto capital debido no solo a la costos adquisición de los vehículos sino también a la construcción de su infraestructura es por esto que en su mayoría las instituciones financieras no acceden a invertir en este tipo de proyectos a gran escala.

Finalmente se cuenta con barreras institucionales, estas tienen que ver con las pocas o a veces nulas políticas, leyes o proyectos de este tipo que brinden respaldo financiero; no se cuenta tampoco con planes eficaces ni incentivos financieros, esto muchas veces a causa de escasez de recursos, aspectos como falta de acceso gubernamental a la tierra y la propiedad para la instalación de infraestructura de carga también demostró ser una barrera importante en las ciudades analizadas (Medellin, 2019).

Es importante reconocer las acciones que permitirían superar este tipo de barreras y que permitan la adopción de buses eléctricos es por esto que se analizan acciones basadas

en políticas, inicialmente se necesita que el gobierno de determinado lugar considere políticas de implementación de buses eléctricos y tenga en sus objetivos implementarlos, y por otro lado las acciones basadas en la implementación, que tienen que ver con el iniciar a operar buses eléctricos como plan piloto o como parte de su flota.

Un plan de adopción de buses eléctricos debe tener como mínimo estos cinco pasos, inicialmente se debe analizar el panorama político, se deben revisar las políticas existentes del lugar, que puedan tanto afianzar u obstruir el camino a construir para esta adopción, seguidamente se considera la importancia de hacer un análisis inicial de la situación actual, se debe conocer el costo, beneficios ambientales y para la comunidad, limitaciones y soluciones a estas; después de este análisis se debe adquirir experiencia práctica por medio de un proyecto piloto que cuente con una correcta estructuración, esto permite conocer datos iniciales de operación para una correcta planificación del proyecto basados en la experiencia propia, para con esto pasar al siguiente paso que sería el análisis de costo beneficio teniendo en cuenta los datos iniciales y los resultados obtenidos en el plan piloto para con esto revisar opciones de financiamiento que permitan demostrar la sostenibilidad del proyecto. Un aspecto importante que no siempre se tiene en cuenta es monetizar los beneficios ambientales lo cual tendría gran importancia en la rentabilidad del proyecto, finalmente, se establecen objetivos que sean realistas en función de los objetivos y proyecciones de la ciudad en específico y se fija un límite de tiempo que de garantía de la consecución de objetivos (Sclar et al., 2019).

Ya en el momento de llevar a cabo el proyecto en general se deben tener en cuenta distintos aspectos que permitan ampliar la escala y la calidad de los buses y el servicio, se tiene que implementar una infraestructura pensada a largo plazo, que sea suficiente para años venideros y posibles adopciones de nuevas unidades, tener en cuenta las especificaciones técnicas necesarias para esto y trabajar en la innovación que permitan adquirir mejores estructuras, se debe formalizar un plan de compras que incluya un correcto análisis de las tecnologías ofrecidas en el mercado estudiándolas antes de cualquier toma de decisiones, es importante también el capacitar a los operadores de estos buses lo cual puede ayudar a cuidar las unidades de buses, extender la vida útil de las baterías y disminuir los mantenimientos, finalmente se debe contar con un plan de retiro responsable para cada bus eléctrico (Lefebvre et al., 2020).

Entre los grandes desafíos que han tenido otras ciudades en la implementación de este tipo de tecnología ha sido principalmente los derechos a la tierra, esto debido a la falta de espacio para la nueva infraestructura y los precios de adquisición de esta, los servicios públicos e infraestructura son otra de las barreras que se tienen, la red y la carga, se deben incluir en formuladores de políticas y debe haber coordinación de esto con la infraestructura y actores principales de los proyectos, y finalmente los beneficios potenciales y costos, los beneficios ambientales por lo general no son monetizados ni tenidos en cuenta (Mojica & Lefevre, 2018).

Es importante hacer un correcto análisis del costo beneficio de esta implementación, en países como Izmir, con muestras de 20 buses eléctricos se pudo concluir una reducción del 84% en costos de combustible y de 60% en costos de mantenimiento en comparación con los buses convencionales, adicional a esto, esta ciudad tiene una planta de energía solar que es la que proporciona electricidad para los buses, lo que evita anualmente 420 toneladas de CO<sub>2</sub> (Montañez Pedraza, 2019).

Un factor muy importante al tener en cuenta en cualquier caso de implementación de tecnologías es las fuentes de ingresos que logren financiar el sistema de transporte público de pasajeros, para esto se tienen en cuenta diferentes casos en distintas ciudades en el mundo, conociendo su caso y revisando cuales serían las mejores opciones para el presente estudio de caso.

Para el caso Español se tienen 4 diferentes fuentes de financiación, inicialmente el recaudo de tarifas fijadas anualmente a los usuarios que toman el servicio, a su vez se necesitan aportes del sector públicos ya sean de nivel estatal o local, siendo tenidos en cuenta en la asignación de presupuestos de la nación, otra fuente de financiación importante es el aprovechamiento económico del sistema que puede ser por publicidad o arrendamiento de espacios, y finalmente el dinero recaudado en las sanciones impuestas en lo relacionado al transporte de personas, se puede decir que en general el recaudo a los usuarios reporta un poco más del 45% de los aportes para la financiación, seguido por los aportes del estado alcanzando hasta un 43% y finalmente se tendrían los aportes del aprovechamiento por publicidad y arrendamiento de espacios (Montañez Pedraza, 2019).

En Londres para el caso del Metro de los Docklands destaca la fuente de financiación mediante plusvalías inmobiliarias, inicialmente el proyecto de este metro fue financiado 100% por el estado, exactamente por el Ministerio de Transportes y el Ministerio de Medioambiente. Después de esto busca apoyo de entidades privadas por medio de disminución de impuestos y recuperación de gastos de inversión por medio de la venta de terrenos, logrando de esta forma una asociación publico privada y su financiación por medio de beneficios económicos de las plusvalías inmobiliarias. Siendo así fueron 4 las fuentes de financiación, aportes públicos provenientes del presupuesto Nacional, aportes locales de la venta de predios, aportes públicos de beneficios sobre las plusvalías inmobiliarias y la inversión privada (Montañez Pedraza, 2019).

En Copenhague para la construcción del Metro no se recibió apoyo de la Nación directamente por lo que la responsabilidad recayó directamente en los entes locales lo cual se financio principalmente debido al aumento del valor de los terrenos beneficiados por este proyecto por lo que se propició su venta, siendo este el 45% de su financiación, completado por sus cobros de tarifas a los usuarios, el impuesto predial y otros ingresos. En Bogotá para la financiación del Transmilenio, el recaudo de las tarifas se lleva a cabo por medio de un concesionario privado lo cual aporta solo el 5,7% el restante siendo aportado en su mayoría por el Gobierno Nacional seguido por el Gobierno Distrital. (Montañez Pedraza, 2019)

Teniendo en cuenta estos casos se puede observar la importancia de las asociaciones público privadas para este tipo de proyectos que sean sostenibles, haciendo un manejo eficiente del suelo y su plusvalía y aprovechando el espacio público. Motivando la inversión privada, brindándoles rentabilidad y trabajando el en transporte público eficiente y que permita la reducción de emisiones.

Por medio del análisis de 26 ciudades del mundo y sus procesos de implementación de buses eléctricos se puede resumir su metodología en 4 elementos importantes, primero se inicia tratando de conocer que inversiones implican la adopción de este tipo de tecnologías, es decir, sus componentes de inversión, seguidamente de los productos financieros en los cuales se busca la forma de movilizar el capital a terceros, después, se tienen en cuenta los mecanismos de implementación donde se distribuyen riesgos y responsabilidades y

finalmente las fuentes de recursos que es el análisis de cómo se pagan las inversiones hechas (Li et al., 2019).

Inicialmente se tienen los componentes de inversión, estos se dividen en activos tangibles, intangibles y procesos; los activos tangibles están representados por los terrenos a adquirir, estaciones de recarga e infraestructura eléctrica, edificios de infraestructura adicional y los buses y sus baterías, entre los activos intangibles pueden resaltar la seguridad que representa para el usuario, la reputación que genere este tipo de proyectos en ejemplo la mejora en la calidad del aire, disminución del ruido entre otras cosas, y la asequibilidad a este tipo de tecnologías de tipo económico, para terminar se tienen en cuenta los procesos empezando por la planeación principal y estudios, construcción e instalaciones necesarias para la puesta en marcha del proceso, es importante también tener en cuenta el proceso de operación del transporte y el mantenimiento (Li et al., 2019).

Por otro lado, están las fuentes de financiación, estas se tienen en cuenta por medio de 3 factores ingresos, incentivos y otras fuentes, para el primer factor que es el de ingresos se tiene en cuenta la tarifa al usuario, la captura de valor de suelos de patios y estaciones de carga, publicidad en estaciones e infraestructura y, por último, ahorros operacionales tales como el ahorro en mantenimiento, en personal y en combustible que son característicos de los buses eléctricos. Entre los incentivos económicos podemos tener lo que son las subvenciones nacionales, locales, incluso internacionales (Li et al., 2019).

En países como India tienen planes de subsidios de hasta el 60%, incentivo que varía según la demanda pero que busca motivar la implementación de este tipo de tecnología por lo que actualmente cuenta con más de 1500 unidades de buses eléctricos. Países como Turquía ofrecen beneficios fiscales a vehículos eléctricos donde en impuesto como el de consumo privado pagan del 2% al 15% mientras que los vehículos convencionales pagan más del 84%, además de esto está exento de otros impuestos que si deben pagar los vehículos a gasolina y diésel. En Brasil se dio un caso donde el impulso a este tipo de vehículos no fue evidente al inicio, pero fue muy útil, el gobierno ofrece un impuesto reducido para fabricantes o vendedores de buses eléctricos, lo que hizo que se establecieran empresas de esta índole y avanzara a gran medida la electrificación del transporte público en la ciudad (Li et al., 2019).

Otro elemento importante son los productos financieros, en este punto está el capital donde se tienen dos agentes claves como lo son los inversionistas privados, sean directos o indirectos, como en el caso de Bogotá donde un ente privado es dueño de más de la mitad de los articulados híbridos y los públicos; en cuanto a los temas de la deuda a adquirir se tiene por medio de préstamos bancarios ya sea de origen público o privado, préstamos internacionales de cambio climático y bonos verdes que son obtenidos al llevar a cabo proyectos ambientales responsables que ayuden a reducir las emisiones y la reducción de riesgos por medio de fondos de contingencia, contratos de provisión y financiamiento concesional (Li et al., 2019).

Finalmente se tienen los mecanismos de implementación entre los cuales están los contratos, aquí están los contratos de compra ya sea pública, privada o por medio de leasing, también pueden tenerse contratos de alquiler ya sea de terrenos, baterías o de los mismos vehículos o por concesión, en el caso de china las empresas de buses y terceros compran la flota la cual posteriormente es alquilada a los operadores de estos; Se involucran también entidades legales las cuales pueden ser públicas, privadas o mixtas y finalmente pero no menos importante se establecen marcos habilitantes, estos como planes y metas trazados como objetivos, regulaciones o normas aplicadas y leyes que habiliten y promuevan este tipo de proyectos (Montañez Pedraza, 2019).

En el caso específico de Bogotá se tiene la empresa Transmilenio encargada del proyecto del Sistema Integrado de Transporte Público de la ciudad, esta empresa brinda la infraestructura, planeación y supervisión del servicio, directamente con los operadores que adquieren los buses por medio de los fabricantes y que se encargan de proveer servicio, mantenimiento a los vehículos y proveer los conductores, se realiza el recaudo de las tarifas pagadas por los pasajeros la cual es administrada por un Fideicomiso que finalmente se encarga de la distribución de lo recaudado (Orbea, 2017).

En el plan de implementación de buses híbridos para esta ciudad se adquirieron más de 500 buses híbridos marca Volvo adquiridos por 2 operadores operando en tráfico mixto, sus componentes de inversión fueron en activos tangibles los buses híbridos con regeneración en frenaje y las baterías, un activo intangible es la vinculación de la ciudad con una imagen de transporte limpio y los procesos llevados a cabo fueron de planeación, entrenamiento, operación y mantenimiento; por otro lado las fuentes de recursos por un

lado propios basados en subsidios del gobierno y tarifas al usuario, se tuvieron incentivos fiscales como exoneración del IVA, reducción de hasta el 100% de impuesto de la renta de la empresa por vehículo, tasa de importación se reduce del 38% al 5% y otras fuentes como publicidad (Orbea, 2017).

Los productos financieros que se tuvieron en cuenta inicialmente para el capital fueron los inversionistas privados, para la deuda financiamiento con Clean Technology Fund, Bancoldex y otros bancos privados y se tuvo una reducción del riesgo por medio de un fondo de contingencia, por otro lado, los mecanismos de implementación aplicados fueron un plan de ascenso tecnológico, se hizo una implementación de tipo mixta donde Transmilenio y operadores trabajan como concesión, y se llevaron a cabo contratos de compra, mantenimiento y entrenamiento entre los operadores y la empresa de buses, y contrato de alquiler de batería (Orbea, 2017).

Es importante identificar las partes interesadas en estos tipos de proyectos, siendo principalmente los representantes de la ciudad, los encargados de hacer políticas de desarrollo, estrategias y asignación de recursos, esto desde las áreas de comercio, energía o medio ambiente, a su vez es del interés de las personas encargadas de la planificación y el uso de suelo, las empresas prestadoras de servicio y de su operación, empresas de servicios públicos de la ciudad en este caso las que brindan energía, y el público que es quien utiliza el servicio. Como actores secundarios se tienen aquellos funcionarios que pueden implementar políticas de apoyo, los fabricantes de este tipo de buses y sus baterías, los entes financieros y las personas encargadas de proveer la infraestructura necesaria de carga y mantenimiento de los buses.

No obstante, para todo proyecto de esta índole se debe tener en cuenta el identificar las limitaciones en la etapa 0 del proyecto para con esto poder solucionarlas y que no sean un tropiezo a largo plazo que haga que se retrasen los tiempos estimados de desarrollo, entre estas limitaciones se encuentran la capacidad de la red eléctrica, esta tiene que ver con la capacidad de generación y trasmisión de energía, calidad de la red de distribución, la posibilidad de implementar sistemas de carga inteligente y planificación a largo plazo.

Una correcta planificación implica el realizar diferentes análisis con anticipación entre estos la capacidad de carga actual y la necesaria no solo para los primeros buses a integrar sino

con una flota completa a futuro, la demanda esperada, los requisitos y costos, para esto se debe proyectar una estructura a largo plazo, con especificaciones técnicas para la carga de estaciones, plan para cortes de energía y cálculo de gastos (Li et al., 2019).

El inicio de un proyecto se lleva a cabo por medio de un plan piloto que generalmente no dura más de dos años donde se logre considerar en base de la experiencia las mejores alternativas de implementación de esta tecnología, entre estas la información de su alcance, tiempo de carga, demanda de pasajeros, condiciones de las vías y su afectación, distancia a la estación de carga, entre otros, la cantidad de buses implementados en el plan piloto han variado en las ciudades llevados a cabo teniendo un promedio entre 10 y 25 unidades de buses.

Se considera para la ciudad de Ibagué se debe iniciar con un correcto análisis de la red eléctrica actual y su capacidad, teniendo en cuenta la posibilidad de implementar paneles solares para la carga de los vehículos como en otras ciudades ejemplo lo cual disminuiría aún más las emisiones en general de este tipo de vehículos que las calculadas en el presente estudio, se debe plantear la situación actual y la cantidad de energía necesaria no solo para el plan piloto sino para en el futuro una flota eléctrica en su 100% que permita que el proyecto se lleve a cabo sin retrasos de esta índole.

Para el caso específico de estudio en la ciudad de Ibagué se considera debe trabajarse similar al caso de implementación de buses híbridos en la ciudad de Bogotá, siendo los fabricantes los vendedores directos a los operadores y encargados también de temas de mantenimiento y entrenamiento, por otra parte, el alcalde junto con el gobierno nacional en general debe decretar la autorización de este tipo de proyectos y la asignación de recursos creando una empresa de supervisión de los operadores que además de esto brinde la infraestructura y se encargue de labores de planeación y vigilancia, por su parte, el operador provee el servicio de transporte a los pasajeros, está encargado de su mantenimiento y de los conductores; lo cobros por las tarifas a los usuarios se recaudan por medio de una empresa intermediaria y luego es llevado a un Fideicomiso. Se considera pertinente la realización de un plan piloto con al menos 10 buses que circulen en el lapso de 6 meses por la ciudad integrados en la flota actual de transporte publico ubicándolos en diferentes tipos de ruta observando su comportamiento y comunicando al fabricante sus recomendaciones;.

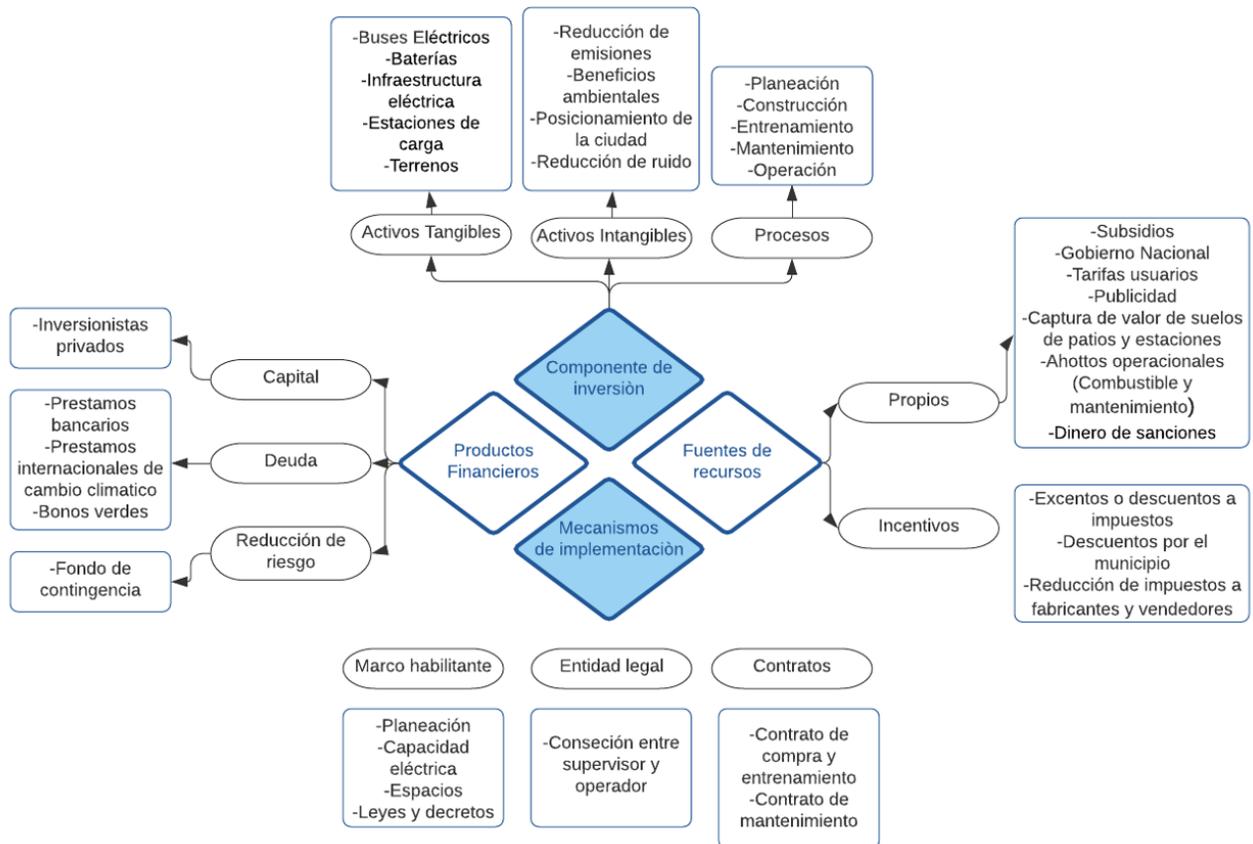


Ilustración 25. Elementos para la implementación de buses eléctricos en la ciudad de Ibagué. Fuente: Elaboración propia con base en (Li et al., 2019)

Los componentes de inversión para este proyecto en un caso hipotético de implementación contaría con activos tangibles como lo serían los buses eléctricos analizados en la sección de costos y las baterías de los mismos, adicional a estos factores mostrados en el estudio a esta sección se le pueden agregar lo que son instalaciones eléctricas y su infraestructura, las estaciones de carga y los terrenos adquiridos para la correcta operación de los buses; por otro lado, activos intangibles como la reducción de emisiones, los beneficios ambientales, y el posicionamiento de la ciudad como representante del transporte sostenible, también es importante tener en cuenta a significativa reducción del ruido y mejora en la calidad del aire lo que puede tener un efecto positivo en la salud y calidad de vida de los ciudadanos; y los procesos como son los de planeación de la implementación, entrenamiento de los operadores, mantenimiento de vehículos y operación eficiente de la flota, a su vez la construcción de la infraestructura necesaria. Las fuentes de recursos con las que se cuenta serían como recursos propios, un subsidio y apoyo económico del

gobierno nacional, y las tarifas cobradas directamente al usuario, también un punto importante a tener en cuenta sería aplicar estrategias de otros países como el uso de sus áreas y buses concretando la captura de valor de los suelos de patios y estaciones para realizar trabajos de publicidad y alquileres que podrían representar sumas importantes, también como en el caso, por otra parte se puede recaudar dinero como en el caso de España por medio de multas o sanciones en lo que respecta al transporte público; se tienen incentivos económicos actualmente en Colombia como el impuesto sobre vehículos automotores que no podrá superar el 1% del valor comercial del vehículo, descuento en revisión técnico mecánica, adicional a esto el municipio está autorizado a realizar descuentos sobre registro e impuesto vehicular, también están exentos de pico y placa, y se aplica la tarifa de IVA del 5% (Vallejo Uribe, 2019), para este caso conociendo la experiencia positiva en Brasil se podría implementar en el país en general la reducción de impuestos a fabricantes y vendedores de buses eléctricos, lo que reduciría sus costos de adquisición y a largo plazo motivaría la implementación de este tipo de tecnologías.

El elemento de productos financieros para el caso de estudio debe contar con el capital en manos de inversionistas privados, la deuda puede contar con apoyo de préstamos bancarios, préstamos internacionales de cambio climático y bonos verdes por parte del gobierno para financiar proyectos ambientalmente responsables y sostenibles, y la reducción del riesgo por medio de un fondo de contingencia, finalmente en los mecanismos de implementación se debe hacer como marco habilitante una correcta planeación del proyecto, revisando la capacidad eléctrica, la capacidad de espacios para zonas de recarga, entre otros, se deben incluir leyes y decretos que amplíen los beneficios a los vehículos eléctricos y permitan su reducción de costos; los vehículos a implementar serán en forma de concesión entre la empresa supervisora y los operadores, y se harán contratos con las empresas vendedores de buses en este caso BYD la cual en el contrato de compra se compromete a un entrenamiento de los operadores y estos mismos se comprometen al mantenimiento de los vehículos.

Para el tema de las estaciones de carga se basó en un estudio realizado por el Ministerio de Energía, donde se hizo un análisis de los buses y la necesidad de estaciones, por lo general para la implementación de vehículos eléctricos en este caso buses se maneja carga privada casi siempre nocturna en los patios de buses, para el caso analizado se tiene que la capacidad de carga aproximada de una buseta promedio es de 250 kWh, su

autonomía es de 260 kilómetros aproximadamente, distancia promedio recorrida de 180 kilómetros al día, donde se consumen 173.08 kW, para lo cual se necesitarían 5 horas de carga lo que significa 4 buses por cada cargador. Se propone que los cargadores sean instalados en los patios de los buses, lo que implica que debe tener un nivel de potencia de mínimo de 150 kW, esto con el fin de cumplir con la necesidad de recargar completamente el vehículo en menos de 5 horas (Ministerio de Energía & Unidad de Planeación Minero Energética, 2019).

El estudio no proyecta un cambio en la capacidad ni características operacionales de las rutas por lo cual no se contempla la optimización de las mismas, a su vez se mantiene la condición de la regularidad de las rutas y nivel de servicio similar; haciendo un análisis de la flota de buses actual y de la operación de esta se puede reconocer que la ruta a la que se deben implementar buses de nueva tecnología eléctrica inicialmente es a la ruta número 11, ya que es la que más recorridos hace al día y más contaminantes emite, esta ruta actualmente la realizan 31 buses durante todo el día, a pesar de ser la ruta más congestionada no es en la que operan más buses. Por otro lado, el modelo más antiguo que se tiene de buses es del año 2000, de este año se tienen 21 unidades de buses, las cuales a consideración serían las primeras que deben cambiarse debido a su antigua tecnología, en una proyección optimista se podrían cambiar también las 37 unidades de buses modelo 2001, que junto con los otros llevan más de 20 años operando, esta flota que ya contaría con más unidades podría ubicarse en las rutas 11 y 82, las más contaminantes.

En un análisis hipotético se iniciaría como lo propuesto anteriormente un plan piloto de 10 buses por un lapso de 6 meses, seguidamente se podría completar el cambio de todos los vehículos que ya llevan más de 21 años de operación que son los modelo 2000, completando 21 unidades de buses eléctricos que iniciarían a operar en la ruta número 11, que tiene 34.2 km de longitud, los buses eléctricos estudiados tienen una autonomía entre 200 y 250 km lo que haría que pudieran cumplir con el trabajo diario en una sola carga para utilizar el servicio de recarga en las noches en los respectivos patios, inicialmente se debe contar con al menos 6 cargadores que puedan suplir la energía para los 21 buses iniciales, y en el caso de completar los 31 buses de esta ruta con vehículos eléctricos se

deben instalar en total en los patios de la ruta 11 un mínimo de 8 cargadores con las características mencionadas anteriormente.

Acogiéndose a las disposiciones estipuladas en la ley 1964 de 2019 para el año 2025 la ciudad de Ibagué deberá contar con el 10% de los vehículos de la flota de tecnología eléctrica lo que significa al menos unas 80 unidades, las cuales reemplazarían las 21 unidades actuales modelo 2000, 37 unidades modelo 2001 y parte de las 74 unidades modelo 2002, estas 80 unidades podrían reemplazar por completo la flota que cubre la ruta 11 y la 82 que como se mencionó son aquellas que más contaminan. Con estas nuevas unidades se deben implementar como mínimo 20 cargadores distribuidos en 8 cargadores para los patios de la ruta 11 y los 12 cargadores restantes en los patios de la ruta número 82, para este entonces ya se estarían dejando de emitir a la atmosfera más de 3200 toneladas de CO<sub>2</sub> al año.

Siguiendo lo estipulado en la Ley 1964 para el año 2027 se deben implementar 80 unidades más de buses eléctricos, con esta cantidad se completaría el cambio de las 52 unidades faltantes modelo 2002 y se alcanzaría a cambiar una pequeña parte de las 98 unidades de buses modelo 2003, se prosiguen entonces con las rutas 35, 18 y 6 las cuales lograrían cambiarse casi en su totalidad para el 2027 cumpliendo con los objetivos planteados, para la ruta 35 se necesitarían al menos 6 cargadores en sus patios, y para la ruta 18 y 6 se necesitarían 9 y 10 cargadores respectivamente, estas nuevas unidades permitirían alcanzar la suma de más de 11.000 toneladas de CO<sub>2</sub> reducidas al año.

Siguiendo con los objetivos para el año 2029 se debe contar con al menos el 40% de la flota compuesta por buses eléctricos lo cual sería una totalidad de 320 vehículos y para esta fase 160 adicionales, con estas nuevas unidades se cambiaría en su totalidad las unidades restantes de vehículos modelos 2003 y 2004, lo que acabaría por completo la utilización de buses con tecnología Euro 3 y se empezaría con algunos vehículos Euro 4 modelo 2005; para estas nuevas unidades se lograrían cambiar por completo las rutas 19, 40, 43, 28 y 23, las cuales necesitarían en sus patios 8, 10, 8, 6 y 7 unidades de cargadores respectivamente.

Para el año 2031 se deben tener más de 480 unidades de buses eléctricos en la flota lo que representa el cambio de todos los vehículos modelo 2005 y gran parte de los modelo 2006 que para ese año ya tendrían más de 25 años de uso y antigüedad, con esto se

cambiarían los vehículos de las rutas 50, 14, 8, 22, 31, 90 y 21 las cuales necesitarían para su funcionamiento de 7, 7, 9, 7, 6, 5 y 8 cargadores en cada patio respectivamente, para este año y con los cambios en la flota se estarían dejando de emitir a la atmosfera casi 37.000 toneladas de CO2. Es importante aclarar que el alcance del presente estudio no tiene en cuenta las pérdidas o fugas relacionados con este tipo de tecnologías ni los supuestos de potencial de reducción de emisiones indirectas.

| <b>Año</b>  | <b>Vehículos</b> | <b>Rutas</b> | <b>Cargadores</b> | <b>Emisiones CO2<br/>reducidas * año<br/>(ton)</b> | <b>Emisiones CO2<br/>acumuladas<br/>reducidas * año<br/>(ton)</b> |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|-------------|------------------|--------------|-------------------|--|---|-------------|-----|----|---|----------|----------|----|----|----|----|-------------|-----|----|---|----------|----------|----|----|-------------|-----|-------------|-----|----------|----------|-------------|-----|---------|----------|----------|----------|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|-------------|-----|-------------|-----|----|---|---------|----------|---------|----------|----|---|------|---|----|---|----|---|----|---|----|---|----|---|------|---|
| <b>2025</b> | 76               | 1            | 8                 | 3251.04  | 3251.04   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 82           | 12                |  |   | <b>2027</b> | 172 | 35 | 6 | 8200.64  | 11451.68 | 18 | 9  | 6  | 10 | <b>2029</b> | 315 | 19 | 8 | 11610.66 | 23062.34 | 40 | 10 | 43          | 8   | 28          | 6   | 23       | 7        | <b>2031</b> | 499 | 50      | 7        | 13930.61 | 36992.96 | 14 | 7 | 8  | 9 | 22 | 7 | 31 | 6 | 90 | 5 | 21          | 8   | <b>2033</b> | 709 | 24 | 5 | 15187.7 | 52180.74 | 92      | 4        | 48 | 6 | 37   | 7 | 9  | 7 | 17 | 5 | 33 | 4 | 20 | 5 | 2  | 6 | 4/.7 | 5 |
| <b>2027</b> | 172              | 35           | 6                 | 8200.64  | 11451.68  |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 18           | 9                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 6            | 10                |  |   | <b>2029</b> | 315 | 19 | 8 | 11610.66 | 23062.34 | 40 | 10 | 43 | 8  |             |     | 28 | 6 |          |          | 23 | 7  | <b>2031</b> | 499 | 50          | 7   | 13930.61 | 36992.96 |             |     | 14      | 7        |          |          | 8  | 9 | 22 | 7 | 31 | 6 | 90 | 5 | 21 | 8 | <b>2033</b> | 709 |             |     | 24 | 5 |         |          | 15187.7 | 52180.74 | 92 | 4 | 48   | 6 | 37 | 7 | 9  | 7 | 17 | 5 | 33 | 4 | 20 | 5 | 2    | 6 |
| <b>2029</b> | 315              | 19           | 8                 | 11610.66   | 23062.34  |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 40           | 10                |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 43           | 8                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 28           | 6                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 23           | 7                 |  |   | <b>2031</b> | 499 | 50 | 7 | 13930.61 | 36992.96 | 14 | 7  | 8  | 9  | 22          | 7   | 31 | 6 | 90       | 5        | 21 | 8  |             |     | <b>2033</b> | 709 |          |          | 24          | 5   | 15187.7 | 52180.74 | 92       | 4        | 48 | 6 | 37 | 7 | 9  | 7 | 17 | 5 | 33 | 4 |             |     |             |     | 20 | 5 |         |          |         |          | 2  | 6 | 4/.7 | 5 | 1  | 5 |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
| <b>2031</b> | 499              | 50           | 7                 | 13930.61   | 36992.96  |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 14           | 7                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 8            | 9                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 22           | 7                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 31           | 6                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 90           | 5                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 21           | 8                 |  |   | <b>2033</b> | 709 | 24 | 5 | 15187.7  | 52180.74 | 92 | 4  | 48 | 6  | 37          | 7   | 9  | 7 | 17       | 5        | 33 | 4  | 20          | 5   |             |     | 2        | 6        | 4/.7        | 5   |         |          | 1        | 5        |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
| <b>2033</b> | 709              | 24           | 5                 | 15187.7  | 52180.74  |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 92           | 4                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 48           | 6                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 37           | 7                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 9            | 7                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 17           | 5                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 33           | 4                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 20           | 5                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 2            | 6                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
|             |                  | 4/.7         | 5                 |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |
| 1           | 5                |              |                   |  |   |             |     |    |   |          |          |    |    |    |    |             |     |    |   |          |          |    |    |             |     |             |     |          |          |             |     |         |          |          |          |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |             |     |             |     |    |   |         |          |         |          |    |   |      |   |    |   |    |   |    |   |    |   |    |   |      |   |

|             |       |                 |   |         |          |
|-------------|-------|-----------------|---|---------|----------|
| <b>2035</b> | TOTAL | 15              | 5 | 2503.85 | 54684.59 |
|             |       | 53              | 4 |         |          |
|             |       | 29              | 2 |         |          |
|             |       | san<br>bernardo | 1 |         |          |

Tabla 23. Implementación buses eléctricos en Ibagué. Fuente: Elaboración propia.

Siguiendo lo estipulado en la Ley para el año 2033, el 80% del total de la flota debe ser eléctrica lo que significa un promedio de 700 vehículos, con lo cual se cambiaría en su totalidad el restante de los últimos vehículos con tecnología Euro 4, y se dejarían en operación solamente 4 rutas con vehículos a diésel, las menos contaminantes las cuales son la ruta 15, 53, 29 y la ruta de san Bernardo, con las nuevas adquisiciones se sumarían aproximadamente 55 cargadores más ubicados estratégicamente en cada patio donde operarían las nuevas unidades de buses.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

Es importante el llevar a cabo proyectos que permitan la reducción de emisiones de GEI que no solo benefician al planeta sino también la salud de las personas que lo habitan, en el sector transporte el cual es el de mayor crecimiento en emisiones una interesante alternativa es la electrificación de este, es por esto que se desarrolló el estudio de lo que significaría en materia de emisiones la implementación de buses eléctricos en la ciudad de Ibagué.



Ilustración 26. Metodología general. Fuente: Elaboración propia.

Por medio del presente estudio se pudo conocer el inventario de emisiones de gases de efecto invernadero causados por la operación del sistema de transporte público colectivo de la ciudad de Ibagué, asimismo se pudo evaluar las potenciales reducciones de emisiones al implementar a la flota vehículos eléctricos, cumpliendo con los objetivos

planteados, fue de vital importancia el reconocer datos de operación teóricos de la flota obtenidos por medio de la empresa de transporte público de la ciudad, estos datos tuvieron que ser procesados para poder ingresarlos al software COPERT IV, después de conocer el inventario de emisiones fue importante el recurrir a diferentes estudios que a pesar de que la información comercial y teórica sobre estas nuevas tecnologías aún se está desarrollando, se logra hacer un análisis de costos y definir la metodología necesaria para la implementación de este tipo de tecnologías en general en cualquier ciudad y especificando los puntos necesarios para la correcta implementación de estos en la ciudad de Ibagué.

Para llevar a cabo este tipo de proyectos y en el caso específico de tomar decisiones frente a estas problemáticas es importante el conocer el tema de emisiones a fondo, relacionando el impacto del cambio climático al calentamiento global, conociendo no solo sus causas sino también sus consecuencias, y a su vez los sectores económicos más críticos en temas de emisión de contaminantes para así lograr llevar a cabo planes de reducción que permitan aportes significativos, reconociendo que sus consecuencias a corto y largo plazo no solo afectan al planeta y su biodiversidad sino a los humanos en general.

El sector transporte representa un importante puesto en temas de emisiones es por esto que debe ser tenido en cuenta en políticas de mejoramiento de la calidad del aire y reducción de emisiones que permitan evitar el cambio climático, siendo un sector que crece desmesuradamente y que tiene un avance relativamente lento en políticas de implementación de alternativas como vehículos eléctricos. A pesar de plantear esta alternativa como una posible solución para las emisiones del sector transporte es importante conocer sus ventajas y desventajas y la necesidad de implementar alternativas de producción de energía eléctrica renovable y sostenible, reduciendo las emisiones desde su origen, asimismo el brindar alternativas de uso final de baterías que eviten la contaminación.

A pesar de que a nivel internacional se han llevado a cabo diferentes cumbres y conferencias que terminan con compromisos para la reducción de emisiones, no todos los países participan de estas y no todos los que participan cumplen con los compromisos adquiridos, a nivel nacional se han logrado algunos avances como la mejora de combustibles, la creación de entidades en pro de la mejora en la calidad del aire, reducción

de impuestos a vehículos eléctricos, y también se ha logrado la implementación de políticas de electrificación del transporte público a largo plazo.

Por medio de la información obtenida por la empresa de transporte público colectivo de la ciudad de Ibagué SITSA S.A. se pudieron obtener los datos clave para conocer el inventario de emisiones de la ciudad, esto no sin antes realizar un estudio previo sobre el software COPERT IV y su utilización, la información inicial se procesa y por medio de diferentes análisis se logran obtener los datos de entrada para el software los cuales permiten finalmente conocer los resultados de emisiones actuales de diferentes tipos de contaminantes, allí se tienen en cuenta solo los Gases de Efecto Invernadero. Por otro lado, por medio de este software se pueden también conocer los factores de emisión que junto con las emisiones permiten hacer comparaciones con otros estudios en el país.

El resultado más representativo del presente estudio es la confirmación de una reducción de más de 53000 toneladas por año de CO<sub>2</sub> aproximadamente, lo cual significa un gran aporte en la reducción de emisiones y que daría un impulso a la electrificación del transporte en general, es importante aclarar que no solo se trata de alternativas de electrificación sino es también importante el motivar al uso del transporte público, haciéndolo más eficiente, mejorando su calidad y atrayendo a más usuarios que disminuyan el uso de transporte privado a base de combustibles fósiles.

En la propuesta de implementación se puede observar la importancia de actores como el gobierno no solo en el tema de financiación sino también en el de imposición de leyes y decretos que ayuden a mejorar el camino para la adopción de nuevas y más limpias tecnologías en el desarrollo del transporte.

Es importante también aclarar que el presente estudio solo tiene en cuenta las emisiones en la fase de operación del vehículo donde sus emisiones se reducen en un 100% pero no se tienen en cuenta las emisiones que se dan por la generación de energía eléctrica que varían según el lugar de aplicación, para una reducción de emisiones más completa se deben también proponer alternativas de generación de energía eléctrica sin emisiones como lo pueden ser la energía solar y eólica.

Los resultados en cuanto a reducción de emisiones se pueden desagregar en materia de rutas y buses específicos según su modelo para un estudio más detallado; conociendo las

emisiones por bus según su tecnología se puede realizar un estudio más a fondo de las formas que se pueden plantear de implementación gradual de este tipo de tecnologías, teniendo en cuenta que no solo se deben adquirir las unidades de vehículos que deben cumplir las necesidades de operación de la flota, sino también contar con una correcta infraestructura para su efectivo funcionamiento, con esto nos referimos a cargadores que puedan suplir las cargas nocturnas de estos vehículos; a su vez se conocen los tipos de vehículos más comerciales del momento que se podrían implementar en un caso hipotético, conociendo su autonomía y necesidad de carga para de esta forma definir la cantidad de cargadores necesarios. Finalmente, también se conocen los posibles costos de estos y la necesidad de apoyo gubernamental para llevar a cabo este tipo de proyectos.

En el caso del presente estudio se tuvo en cuenta una metodología top-down esto por los datos que se tenían, en este caso información característica de la flota y su operación, pero es importante aclarar que este tipo de estudios puede realizarse bajo diferentes metodologías y software, esto dependiendo los datos iniciales que se tengan ya sea como en este caso de un tipo de vehículo específico y su operación o en otros casos con estadísticas generales o datos tomados en campo; es importante en general el realizar para Colombia más estudios de esta índole que permitan identificar los beneficios y la necesidad de un cambio en los medios de transporte, motivando al uso del transporte público y la bicicleta y a la electrificación general del transporte.

Se espera que según lo pactado por el gobierno nacional se logre la electrificación del 100% del transporte público colectivo en la ciudad para el año 2035 lo que implicaría una flota entre 800 y 900 buses dependiendo el crecimiento de la ciudad y la población y un aproximado de 204 cargadores distribuidos en los patios de cada ruta según la demanda, y que permitirían una reducción de emisiones significativa.

La investigación bibliográfica llevada a cabo en el presente estudio permitió reconocer las principales perspectivas teóricas, metodológicas y en campo del tema de la electrificación del transporte público, haciendo un análisis sistemático del producto de investigación, realizando un balance equilibrado en toda la información encontrada sobre este tema, haciendo un correcto análisis que permite reconocer sus avances tecnológicos, su evolución en el tiempo y la importancia de conocer las variantes sobre este que se presentan constantemente. Por esta razón fue necesaria la aplicación de tres pasos

iniciando con la investigación general, pasando a la conceptualización y finalmente al uso de esta teoría en la singularidad del estudio. En este caso la investigación y análisis contribuyeron al estado de conocimiento siendo un andamio para la realización del estudio de emisiones que permitió que se ampliara a gran magnitud y se conceptualizaran temáticas que en un inicio a pesar de conocer lo que se quería llevar a cabo se desconocían sus particularidades a profundidad.

## **A. Anexo 1: Cáculo de emisiones en COPERT**

Para el presente estudio se determinaron la cantidad de emisiones de GEI por medio del modelo COPERT desarrollado por la Agencia Europea de Medio Ambiente en este caso para la flota de transporte público colectivo de la ciudad de Ibagué, este software brinda tanto emisiones como factores de emisión según la información que se tenga, clasificada en Tier 2 o Tier 3, esta última utilizada para este caso de estudio, que es el nivel más detallado en datos de entrada.

### **Datos de entrada:**

- Propiedades generales

Inicialmente se tiene en cuenta el año que se va a estudiar que para este caso debido a la información que se tenía y a las particularidades que se presentaron en los años de pandemia se tiene en cuenta el año 2019, respecto a este año por medio de la base de datos del IDEAM se obtienen temperaturas mínimas, máximas y humedad relativa de cada mes del año mencionado para la ciudad de Ibagué; por otro lado, se tienen las características de un viaje típico representado por la longitud de recorrido y el tiempo que se demora en recorrer esta distancia.

| Month     | Min Temperature [°C] | Max Temperature [°C] | Humidity [%] |
|-----------|----------------------|----------------------|--------------|
| January   | 19.2                 | 30.3                 | 75.9%        |
| February  | 19.6                 | 29.5                 | 83.9%        |
| March     | 19.4                 | 28.7                 | 76.9%        |
| April     | 19.3                 | 29                   | 86.4%        |
| May       | 19.4                 | 28.6                 | 88.5%        |
| June      | 19.7                 | 30.2                 | 79.8%        |
| July      | 19.3                 | 31.3                 | 73.6%        |
| August    | 20                   | 33.1                 | 63.8%        |
| September | 19.7                 | 32.6                 | 64.5%        |
| October   | 18.3                 | 29.2                 | 82.7%        |
| November  | 19.3                 | 28.3                 | 88.2%        |
| December  | 19.6                 | 28.7                 | 87.5%        |

Ilustración 27. Información meteorológica Ibagué.

| Trip Length [km] | Trip Duration [hour] |
|------------------|----------------------|
| 12               | 0.25                 |

Ilustración 28. Características de viaje.

- Propiedades del combustible

Esta caracterización es de gran importancia para el correcto cálculo de las emisiones, para el caso de estudio los vehículos analizados en este caso todos buses tamaño mediano de menos de 15 toneladas, se tuvieron en cuenta variables que trae COPERT de cada combustible por defecto, pero cambiando el contenido de azufre y la densidad según datos investigados previamente.

| Primary Fuel   | Specifications         |               |               |                 | Content In Species |             |             |             |             |             |             |             |             |
|----------------|------------------------|---------------|---------------|-----------------|--------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
|                | Energy Content [MJ/kg] | H:C Ratio [-] | O:C Ratio [-] | Density [kg/m3] | S [ppm wt]         | Pb [ppm wt] | Cd [ppm wt] | Cu [ppm wt] | Cr [ppm wt] | Ni [ppm wt] | Se [ppm wt] | Zn [ppm wt] | Hg [ppm wt] |
| Petrol Grade 1 | 43.774                 | 1.86          | 0             | 750             | 0                  | 0.0016      | 0.0002      | 0.0045      | 0.0063      | 0.0023      | 0.0002      | 0.033       | 0.0087      |
| Petrol Grade 2 | 43.774                 | 1.86          | 0             | 750             | 0                  | 0.0016      | 0.0002      | 0.0045      | 0.0063      | 0.0023      | 0.0002      | 0.033       | 0.0087      |
| Diesel Grade 1 | 42.695                 | 1.86          | 0             | 850             | 25                 | 0.0005      | 0.00005     | 0.0057      | 0.0085      | 0.0002      | 0.0001      | 0.018       | 0.0053      |
| Diesel Grade 2 | 42.695                 | 1.86          | 0             | 850             | 25                 | 0.0005      | 0.00005     | 0.0057      | 0.0085      | 0.0002      | 0.0001      | 0.018       | 0.0053      |
| LPG Grade 1    | 46.564                 | 2.525         | 0             | 520             | 0                  | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| LPG Grade 2    | 46.564                 | 2.525         | 0             | 520             | 0                  | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| CNG            | 48                     | 4             | 0             | 175             | 0                  | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           | 0           |
| Biodiesel      | 37.3                   | 1.95          | 0.11          | 890             | 0                  | 0.0005      | 0.00005     | 0.0057      | 0.0085      | 0.0002      | 0.0001      | 0.018       | 0.0053      |
| Bioethanol     | 28.8                   | 3             | 0.5           | 794             | 0                  | 0.0016      | 0.0002      | 0.0045      | 0.0063      | 0.0023      | 0.0002      | 0.033       | 0.0087      |

Ilustración 29. Especificaciones de combustible

- Caracterización del parque automotor

Este aspecto es de gran importancia para la determinación de emisiones ya que aquí se concretan los vehículos de estudio en este caso buses a diésel medianos de menos de 15 toneladas y también su tecnología que en este caso varía desde la Euro 3 a la Euro 6.

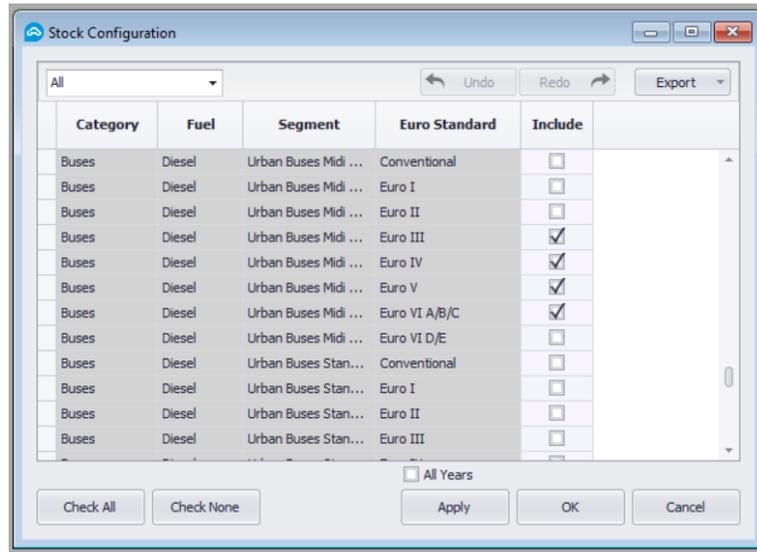


Ilustración 30. Configuración de inventario

- Kilometraje del parque automotor

El kilometraje de operación y acumulado se logró estimar con base en la información de operación brindada por la empresa SITSA de Ibagué, por medio de la cual se logró promediar el kilometraje diario por vehículo, clasificándolo posteriormente según su tecnología Euro y finalmente calculando con esto el kilometraje anual, con esto y conociendo su antigüedad y tiempo de operación se pudo promediar su kilometraje acumulado según su modelo.

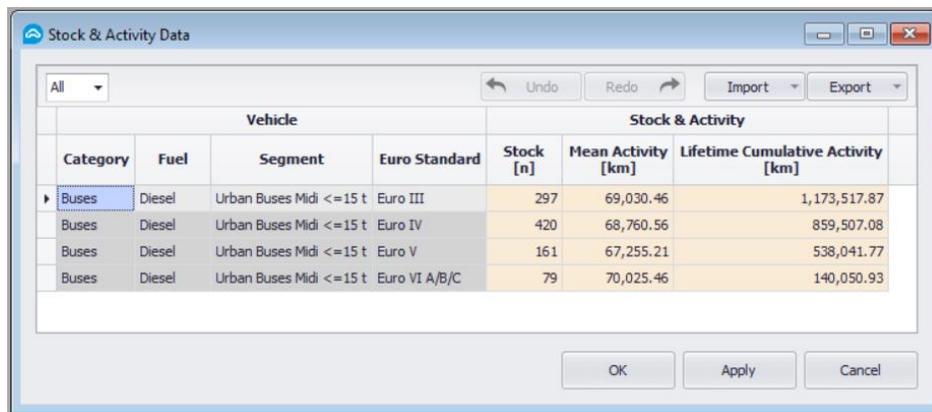
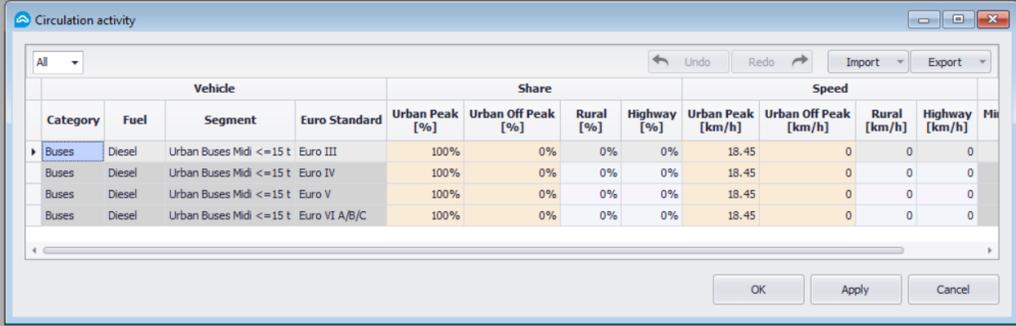


Ilustración 31. Datos de actividad

Adicional a esto, conocemos el inventario total de buses del parque automotor con lo que se logra completar la fila de stock y su kilometraje.

No se tienen en cuenta aspectos como el aire acondicionado ya que ningún bus de transporte público colectivo de la ciudad brinda este servicio en su vehículo.

Finalmente se llenan datos de circulación según el terreno de operación del vehículo y a su vez, se ingresan datos de velocidad calculados previamente.



| Category | Fuel   | Vehicle                 |               | Share          |                    |           |             | Speed             |                       |              |                |
|----------|--------|-------------------------|---------------|----------------|--------------------|-----------|-------------|-------------------|-----------------------|--------------|----------------|
|          |        | Segment                 | Euro Standard | Urban Peak [%] | Urban Off Peak [%] | Rural [%] | Highway [%] | Urban Peak [km/h] | Urban Off Peak [km/h] | Rural [km/h] | Highway [km/h] |
| Buses    | Diesel | Urban Buses Midi <=15 t | Euro III      | 100%           | 0%                 | 0%        | 0%          | 18.45             | 0                     | 0            | 0              |
| Buses    | Diesel | Urban Buses Midi <=15 t | Euro IV       | 100%           | 0%                 | 0%        | 0%          | 18.45             | 0                     | 0            | 0              |
| Buses    | Diesel | Urban Buses Midi <=15 t | Euro V        | 100%           | 0%                 | 0%        | 0%          | 18.45             | 0                     | 0            | 0              |
| Buses    | Diesel | Urban Buses Midi <=15 t | Euro VI A/B/C | 100%           | 0%                 | 0%        | 0%          | 18.45             | 0                     | 0            | 0              |

Ilustración 32. Datos de circulación.

Ya con estos datos es posible calcular las emisiones de GEI causadas por la flota de transporte público colectivo de la ciudad de Ibagué, los cuales se encuentran en el documento final de trabajo de grado.

## 6. Bibliografía

*Glosario ambiental: ¿Qué son los Gases de Efecto Invernadero (GEI)?* | WWF. (2018, April 3). <https://www.wwf.org.co/?uNewsID=325754>

*Emisiones de gases de efecto invernadero por país y sector (infografía)* | Noticias | Parlamento Europeo. (2018, March 7). <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20180301STO98928/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-por-pais-y-sector-infografia>

*Se alcanzan niveles récord de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera* | Noticias ONU. (2019, November 25). <https://news.un.org/es/story/2019/11/1465851>

*Why does Electric Mobility matter?* | UNEP - UN Environment Programme. (n.d.). Retrieved June 20, 2021, from <https://www.unep.org/explore-topics/transport/what-we-do/electric-mobility/why-does-electric-mobility-matter>

*TFG- Bernaldo de QuirA<sup>3</sup>s Aparicio, InA©s.* (n.d.).

*Movilidad – Ibagué como vamos.* (n.d.). Retrieved July 18, 2021, from <https://ibaguecomovamos.org/habitat/movilidad/>

*EMISIONES POR FUENTES MOVILES - IDEAM.* (n.d.). Retrieved July 18, 2021, from <http://www.ideam.gov.co/web/contaminacion-y-calidad-ambiental/emisiones-por-fuentes-moviles>

*BYD lidera el mercado de los buses eléctricos en Colombia* | Economía | Portafolio. (2020, February 6). <https://www.portafolio.co/economia/byd-lidera-el-mercado-de-los-buses-electricos-en-colombia-537874>

Aldama, Z. (2019, May 5). *Noticias de China: Viaje a Shenzhen, el lugar del mundo con más taxis y autobuses eléctricos.* [https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2019-05-05/vehiculos-electricos-shenzen-china-autobuses-taxis\\_1979546/](https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2019-05-05/vehiculos-electricos-shenzen-china-autobuses-taxis_1979546/)

Área Metropolitana del Valle de Aburrá; Universidad Pontificia Bolivariana. (2019). *Actualización inventario de emisiones atmosféricas del Valle de Aburrá - año 2018.*

Aristizabal, B., Mangones, S., Rojas, N., Gonzalez, C. M., Trejos, E., Cifuentes, F., Sandoval, F., Lopez Buitrago, L. D., Velasco Garcia, M., & Cuellar, O. (n.d.). *HERRAMIENTA PARA LA GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE EN MANIZALES A PARTIR DE MODELOS DE TRANSPORTE Y FACTORES DE EMISIÓN.*

Autocrash. (2019). *¿Qué son las normas Euro y por qué evolucionan?* *Autocrash*, 54. <https://www.revistaautocrash.com/que-son-las-normas-euro-y-por-que-evolucionan/>

- Ballesteros Benavides, H. O., & Leon Aristizabal, G. E. (2007). *INFORMACIÓN TÉCNICA SOBRE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y EL CAMBIO CLIMÁTICO*.  
<http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gases+de+Efecto+Invernadero+y+el+Cambio+Climatico.pdf/7fabbbd2-9300-4280-befe-c11cf15f06dd>
- BANCO MUNDIAL. (2021, April 12). *Transporte: Panorama general*.  
<https://www.bancomundial.org/es/topic/transport/overview>
- BID, B. I. de D., & Findeter, F. del D. (2018). *IBAGUÉ sostenible 2037*.
- Burck, J., Hagen, U., Höhne, N., Nascimento, L., & Bals, C. (2020). *Resultados 2020*.  
[www.germanwatch.org](http://www.germanwatch.org)
- Carmona Aparicio, L. G., Rincón Pérez, M. A., Castillo Robles, A. M., Galvis Remolina, B. R., Sáenz Pulido, H. E., Manrique Forero, R. A., & Pachón Quinche, J. E. (2016). Conciliación de inventarios top-down y bottom-up de emisiones de fuentes móviles en Bogotá, Colombia. *Revista Tecnura*, 20(49), 59.  
<https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.3.a04>
- Caro, S. T., Henríquez, P., & Osses, M. (2016). Análisis de variables significativas para la generación de un inventario de emisiones de fuentes móviles y su proyección. *Ingeniare*, 24, 32–39. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052016000500005>
- CERCARBONO. (2021). METODOLOGÍA M / T-ECC01 PARA PROYECTOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE GEI MEDIANTE LA MEJORA DE EFICIENCIA POR CAMBIO DE COMBUSTIBLE EN EL TRANSPORTE TERRESTRE.
- Christiansen, A. (2019, January 23). *El silencioso beneficio de los buses eléctricos - La Tercera*. <https://www.latercera.com/que-pasa/noticia/silencioso-beneficio-los-buses-electricos/496361/>
- DNP, D. N. de P. (2018). *CONPES 3943 Política Para Mejoramiento De La Calidad Del Aire*.
- DNP, D. N. de P. (2017). *Energy Demand Situation in Colombia*.  
[https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Energia/MCV - Energy Demand Situation VF.pdf](https://www.dnp.gov.co/Crecimiento-Verde/Documents/ejes-tematicos/Energia/MCV-Energy-Demand-Situation-VF.pdf)
- Duque, J. (2016). Sobre los efectos de la Contaminación Atmosférica en la Salud (Basado en el texto Clean the air for children, UNICEF, 2016). *Unicef*, 13.  
<http://www.eafit.edu.co/minisitios/calidad-aire/Documents/contaminacion-efectos-salud.pdf>
- Energía y Sociedad. (n.d.). 3.1. *El cambio climático y los acuerdos internacionales | Energía y Sociedad*. Retrieved June 25, 2021, from  
<http://www.energiaysociedad.es/manenergia/3-1-el-cambio-climatico-y-los-acuerdos-internacionales/>

- Espíndola, C., & Valderrama, J. O. (2012). Huella del carbono. Parte 1: conceptos, métodos de estimación y complejidades metodológicas. *Informacion Tecnologica*, 23(1), 163–176. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642012000100017>
- Fernández Fernández, Y., & Blanco, B. O. (2002). Transporte, externalidades y coste social. In *Cuadernos de Economía* (Vol. 25).
- Fernández, L., & Gutiérrez, M. (2013). Bienestar social, económico y ambiental para las presentes y futuras generaciones. *Informacion Tecnologica*, 24(2), 121–130. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642013000200013>
- Fleming, C. M., & Cook, A. (2008). The recreational value of Lake McKenzie, Fraser Island: An application of the travel cost method. *Tourism Management*, 29(6), 1197–1205. <https://doi.org/10.1016/J.TOURMAN.2008.02.022>
- Gaitán, M., & Cárdenas, P. A. (2017). *Guía para la elaboración de Inventarios de Emisiones Atmosféricas*. [http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones\\_atmosfericas\\_contaminantes/documentos\\_relacionados/GUIA\\_PARA\\_LA\\_ELABORACION\\_DE\\_INVENTARIOS\\_DE\\_EMISIONES\\_ATMOSFERICAS.pdf](http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/emisiones_atmosfericas_contaminantes/documentos_relacionados/GUIA_PARA_LA_ELABORACION_DE_INVENTARIOS_DE_EMISIONES_ATMOSFERICAS.pdf)
- García Arbelaez, C., Barrera, X., Gómez, R., & Suárez Castaño, R. (2015). *EL ABC DE LOS COMPROMISOS DE COLOMBIA PARA LA COP21 CONTENIDO* (WWF-Colombia). [www.wwf.org.co](http://www.wwf.org.co)
- Gil Velásquez, L. N. (2018). *MODELO DE NEGOCIO PARA INCENTIVAR EL USO DE BUSES ELÉCTRICOS EN EL VALLE DE ABURRÁ A PARTIR DE LA COMPENSACIÓN VOLUNTARIA DE CARBONO*. Universidad EIA.
- Giraldo Amaya, L. A. (2005). *Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes* (Vol. 2002). Universidad de los Andes.
- Granada Aguirre, L., & Valencia Rodríguez, M. (2010). La modelación y la gestión en el mejoramiento de la calidad del aire. *Libre Empresa*, 7(2), 63–87.
- Gobierno de Colombia. (2020). Actualización de la Contribución Determinada a Nivel Nacional de Colombia (NDC). 10.
- Grutter, J. M. (2014). *Rendimiento Real de Buses Híbridos y Eléctricos*. [www.repic.ch](http://www.repic.ch)
- Hoffmann, D. (2016). ¿Qué son los Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCVC)? *Ccvc*, 1–6.
- ICEX. (2019, April). *La ciudad de Shenzhen acoge el primer Encuentro Empresarial España-China*. <https://www.icex.es/icex/es/navegacion-principal/todos-nuestros->

servicios/informacion-de-mercados/paises/navegacion-principal/noticias/NEW2019819607.html?idPais=CN

- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLERÍA. (2016). INVENTARIO NACIONAL Y DEPARTAMENTAL DE GASES EFECTO INVERNADERO - COLOMBIA. *Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. IDEAM, PNUD, MADS, DNP, CANCELLERÍA, FMAM. Bogotá DC.*
- Instituto Nacional de Ecología-WGA-Semarnat. (2009). Modelos empleados en la elaboración de inventarios de emisiones vehiculares. In *Guía metodológica para la estimación de emisiones vehiculares en ciudades mexicanas* (pp. 53–73). <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones/libros/618/modelos.pdf>
- Kogan, E. (2019, October 6). *Cuántos autos hay en el mundo y cuántos se fabrican anualmente - The Morning Call*. <https://www.mcall.com/hoyla-aut-cuantos-autos-hay-en-el-mundo-y-cuantos-se-fabrican-anualmente-20160923-story.html>
- Lefebvre, B., Armijos Leray, J. P., Oriol Prats, J., & Ascencio Rojas, R. (2020, July 16). *Los buses eléctricos en Guayaquil muestran el potencial de la implementación local de las NDCs para apoyar la recuperación sostenible - Sostenibilidad*. <https://blogs.iadb.org/sostenibilidad/es/los-buses-electricos-en-guayaquil-muestran-el-potencial-de-la-implementacion-local-de-las-ndcs-para-apoyar-la-recuperacion-sostenible/>
- Li, X., Castellanos, S., & Maassen, A. (2019). How to Enable Electric Bus Adoption in Cities Worldwide : a Guiding Report for City Transit Agencies and Bus Operating Entities. *WRI Ross Center*, 62.
- Li, Y., Zhan, C., de Jong, M., & Lukszo, Z. (2016). Business innovation and government regulation for the promotion of electric vehicle use: lessons from Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production*, 134, 371–383. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.013>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia Jefe, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., J B Robin, M., Chen, Y., Zhou, X., Maycock, T., Tignor, M., & Waterfield, T. (2019). *Calentamiento global de 1,5 °C*. IPCC. [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)
- Medellin, P. (2019, May 27). *Estas son las principales barreras para la implementación de buses eléctricos en las áreas urbanas - Instituto de Estudios Urbanos*. WRI Ross Center. <http://ie.u.unal.edu.co/medios/noticias-del-ieu/item/estas-son-las-principales-barreras-para-la-implementacion-de-buses-electricos-en-las-areas-urbanas>
- Mena Roa, M. (2021, February 19). • *Gráfico: Europa lidera la carrera de los vehículos eléctricos | Statista*. <https://es.statista.com/grafico/22026/paises-con-mayor-porcentaje-de-vehiculos-electricos-respecto-a-las-ventas-matriculaciones-de-turismos-nuevos-en-2019/>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *ANÁLISIS DE IMPACTO NORMATIVO DEFINICIÓN DEL PROBLEMA NORMA NACIONAL DE EMISIONES GENERADAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES.*

Ministerio de Energía, & Unidad de Planeación Minero Energética. (2019). *Establecer Recomendaciones en Materia de Infraestructura de Recarga para la Movilidad Eléctrica en Colombia para los Diferentes Segmentos: Buses, Motos, Taxis, BRT. 010.*

Mojica, C., & Lefevre, B. (2018, December 14). *Los buses eléctricos transforman el transporte público.* <https://blogs.iadb.org/transporte/es/los-autobuses-electricos-pueden-transformar-el-transporte-publico-de-america-latina/>

Montañez Pedraza, E. (2019). Estudio de factibilidad financiera para la implementación de un sistema integral de movilidad con buses eléctricos dirigida al raizal, residente y turista de la isla de San Andrés y providencia. *Estudio de Factibilidad Financiera Para La Implementación de Un Sistema Integral de Movilidad Con Buses Eléctricos Dirigida Al Raizal, Residente y Turista de La Isla de San Andrés y Providencia Presentado Por: Efrén Junior Montañez Pedraza Colegio de Estu, 11(1), 1–14.* [http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484\\_SISTEM\\_PEMB ETUNGAN\\_TERPUSAT\\_STRATEGI\\_MELESTARI](http://scioteca.caf.com/bitstream/handle/123456789/1091/RED2017-Eng-8ene.pdf?sequence=12&isAllowed=y%0Ahttp://dx.doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2008.06.005%0Ahttps://www.researchgate.net/publication/305320484_SISTEM_PEMB ETUNGAN_TERPUSAT_STRATEGI_MELESTARI)

Motoa Franco, F. (2018, February 6). *Retos de Bogotá para incorporar los buses eléctricos en TransMilenio - Bogotá - ELTIEMPO.COM.* <https://www.eltiempo.com/bogota/retos-de-bogota-para-incorporar-los-buses-electricos-en-transmilenio-179698>

Naciones Unidas. (2019, March 28). *Miles de muertos, millones de desplazados... los efectos del cambio climático se aceleran | Noticias ONU.* <https://news.un.org/es/story/2019/03/1453581>

Naciones Unidas. (2020, December 9). *Las emisiones de CO2 rompen otro récord: un calentamiento global catastrófico amenaza el planeta | Noticias ONU.* <https://news.un.org/es/story/2020/12/1485312>

Naciones Unidas. (2019, September 18). *Las ciudades, “causa y solución” del cambio climático | Noticias ONU.* <https://news.un.org/es/story/2019/09/1462322>

Ocampo González, D. (2019). *Determinación de los costos de operación de vehículos eléctricos en el transporte como estrategia de movilidad sostenible. Caso de estudio Manizales.* Universidad Nacional de Colombia.

OMS, O. M. de la S. (2018, May 2). *Calidad del aire ambiente (exterior) y salud.* [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)

- OMS, O. M. de la S. (2016, September 27). *La OMS publica estimaciones nacionales sobre la exposición a la contaminación del aire y sus repercusiones para la salud*. <https://www.who.int/es/news/item/27-09-2016-who-releases-country-estimates-on-air-pollution-exposure-and-health-impact>
- ONU. (2019, September 22). *Esto es lo que dicen los científicos: el cambio climático llega antes y más fuerte de lo previsto | Noticias ONU*. <https://news.un.org/es/story/2019/09/1462482>
- ONU, programa para el medio ambiente. (2019, November 26). *El mundo debe reducir las emisiones 7,6% anual en la próxima década para lograr objetivo de 1,5°C*. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/el-mundo-debe-reducir-las-emisiones-76-anual-en-la>
- Orbea, J. (2017). *flotas eléctricas : Experiencias internacionales*.
- Organización Meteorológica Mundial. (2019). *Boletín de la OMM sobre los gases de efecto invernadero, edición 2008*.
- Ortiz Gonzalez, N. F., & Rios Moreno, J. A. (2019). *INVENTARIO PRELIMINAR DE EMISIONES POR FUENTES MÓVILES EN RUTA PARA LA CIUDAD DE VILLAVICENCIO*. Universidad Santo Tomas.
- Pierantonelli, M., & Quintilla, T. (2019). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE OMNIBUS ELECTRICO PARA LA UNIVERSIDAD DE VILLA MARIA. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 23, 13–24.
- Plaza, D. (2020, June 2). *¿Cómo es el motor de un coche eléctrico? Funcionamiento, partes y tipos - Motor.es*. <https://www.motor.es/noticias/motor-coche-electrico-202067941.html>
- Quadis. (n.d.). *10 ventajas del coche eléctrico frente al de combustión*. Retrieved June 26, 2021, from <https://www.quadis.es/articulos/10-ventajas-del-coche-electrico-frente-al-de-combustion/106942>
- Quiros Aparicio, I. B. (2018). *Ventajas e inconvenientes del vehículo eléctrico*. Universidad Pontificia Comillas.
- Ramirez, L. (2021, January 5). *Bogotá es la ciudad con la mayor flota eléctrica | Bogota.gov.co*. <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/movilidad/transmilenio/bogota-es-la-ciudad-con-la-mayor-flota-electrica>
- Revista Energía. (2018, December 7). *COP24: Un millón de vidas podrían salvarse para 2050 a través de la acción climática – Revista Energía*. <https://www.revistaenergia.com/16734/>

- Revista Energía. (2018, December 7). *COP24: Un millón de vidas podrían salvarse para 2050 a través de la acción climática – Revista Energía*.  
<https://www.revistaenergia.com/16734/>
- Revista Energía. (2018, December 7). *COP24: Un millón de vidas podrían salvarse para 2050 a través de la acción climática – Revista Energía*.  
<https://www.revistaenergia.com/16734/>
- Roas Valera, L. I. (2011). *Los vehículos eléctricos*.
- Sáez, S. (2020, February 12). *Los combustibles fósiles causan 4,5 millones de muertes al año - Climática*. <https://www.climatica.lamarea.com/contaminacion-muertes-greenpeace/>
- Saka, F., Tamblay, S., & Gschwender, A. (2021). *ELECTROMOVILIDAD EN EL TRANSPORTE PÚBLICO: LA EXPERIENCIA DE SANTIAGO DE CHILE* (Vol. 22).
- Sclar, R., Gorguinpour, C., Castellanos, S., & Li, X. (2019). Barriers to Adopting Electric Buses. *WRI World Resources Institute*, 60.  
<https://wrirosscities.org/sites/default/files/barriers-to-adopting-electric-buses.pdf>
- Sebastián, M. (2019). La electrificación del transporte. *Presupuesto y Gasto Público*, 59–77. [www.omio.es](http://www.omio.es)
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2019). *Inventario de Emisiones de Fuentes Móviles y Fuentes Fijas Industriales - año 2018*. 1–19.  
<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:No+Title#0>
- Segura, P. (2007, June 1). *Transporte y cambio climático • Ecologistas en Acción*. No. 53.  
<https://www.ecologistasenaccion.org/20911/transporte-y-cambio-climatico/>
- Semana. (2015, December 15). *El problema de subsidiar los combustibles fósiles*.  
<https://www.semana.com/economia/articulo/el-problema-subsidiar-combustibles-fosiles-colombia-mundo/217234/>
- Turismo Rama. (2020, January 4). *Shenzhen, ciudad de las Zanjas Profundas - Turismorama*. <https://turismorama.com/china/shenzhen-ciudad-de-las-zanjas-profundas/>
- Ulloa, C. (2020, December 3). *Chile inaugura una gran terminal de buses eléctricos*.  
<https://cnnespanol.cnn.com/2020/12/03/chile-inaugura-una-de-las-terminales-de-buses-electricos-mas-grandes-de-america-latina/>
- US EPA, O. (n.d.). *Sources of Greenhouse Gas Emissions*. Retrieved June 20, 2021, from <https://www.epa.gov/ghgemissions/sources-greenhouse-gas-emissions>

- Valencia, M. C. (2019). *Actualización Del Inventario De Emisiones Por Fuentes Móviles Y Estimación De Emisiones Atmosféricas Por Resuspensión Y Distribución De Combustible En La Ciudad De Manizales*. Universidad Nacional de Colombia, Sede Manizales.
- Vallejo Uribe, F. (2019, July 11). *Sancionada ley que da beneficios a propietarios de vehículos eléctricos en Colombia*. <https://www.vehiculoselectricos.co/aprobada-ley-que-da-beneficios-a-propietarios-de-vehiculos-electricos-en-colombia/>
- Vallejo Uribe, F. (2021, January 9). *Bogotá será la ciudad con la mayor flota de buses eléctricos por fuera de China con 1.485 vehículos*. <https://www.vehiculoselectricos.co/bogota-sera-la-ciudad-con-la-mayor-flota-de-buses-electricos-por-fuera-de-china-con-1-485-vehiculos/>
- Vived, A. (2018, December 26). *Shenzhen: la ciudad de los 16.000 autobuses eléctricos (y ahora van a por los taxis)*. <https://www.lavanguardia.com/natural/si-existe/20181226/453646371650/shenzhen-la-ciudad-de-los-16000-autobuses-electricos-y-ahora-van-a-por-los-taxis.html>
- Webedia Brand Services. (2019, February 13). *Shenzhen, la ciudad china que solo usa autobuses eléctricos - ë-Citroën - Xataka*. <https://e-citroen.xataka.com/shenzhen-ciudad-china-que-solo-usa-autobuses-electricos/>
- Xue, L., & Zhou, W. (2018, April 4). *How Did Shenzhen, China Build World's Largest Electric Bus Fleet? | World Resources Institute*. World Resources Institute. [https://www.wri.org/insights/how-did-shenzhen-china-build-worlds-largest-electric-bus-fleet?utm\\_](https://www.wri.org/insights/how-did-shenzhen-china-build-worlds-largest-electric-bus-fleet?utm_)
- Zumba Álvarez, W. M., Van Dijck, K., J. M. A., Pérez, P., & Quito, C. (2018). Evaluación de la demanda energética de buses con motores de combustión interna, en rutas reales; para implementar buses eléctricos. *Fundación de La Energía de La Comunidad de Madrid. Conserjería de Economía y Hacienda de La Comunidad de Madrid, Espana.*, 70–95. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/15032%0Ahttp://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/7609>