



Facultad de Ciencia y Tecnología

Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz

**Comparación de energía, emisiones, tiempo y costo de diferentes medios  
de transporte en una ciudad intermedia.**

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de:

**Ingeniero Mecánico Automotriz**

Autor:

**Diego Esteban Rosero López**

Director:

**Ing. Gustavo Alvarez-Coello, M.Sc.**

Cuenca – Ecuador

2024

## **Dedicatoria**

Este trabajo le dedico en primer lugar a Dios, por haberme dado la valentía y las fuerzas para culminar esta gran etapa de mi vida, por ponerme en el camino a las personas correctas que han sido un apoyo en todo este arduo camino, que sin duda alguna ha sido con un final satisfactorio.

A mis padres, Estuardo y Viviana, por confiar en mí incluso en los momentos más difíciles, por ser pilares fundamentales en este proceso y en mi vida en general, por ser un ejemplo de superación, esfuerzo, valentía y honradez para toda su familia y por su amor incondicional.

A mis hermanos, en especial David y Ariana, por estar presentes en cada momento, por ser mi motivación y ganas de seguir hasta el final.

A mi amigo Pablo Andrés Arizaga Montalván que desde el cielo me protege y me guía en el día a día.

Finalmente, a mis dos personas especiales en este mundo, mi hija Martina y mi esposa Belén, quienes han sido mi motor para cada paso que he dado y han estado ahí para mí cuando más lo he necesitado.

### **Agradecimiento**

Quiero agradecer a la Universidad del Azuay y la Facultad de Ciencia y Tecnología, por haberme dado la oportunidad que aprender y formarme en sus aulas, a todo el personal docente y administrativo por guiarme en este camino.

Quiero hacer un agradecimiento especial al Ing. Gustavo Alvarez-Coello, por ser quien me ha guiado, apoyado y aportado con sus conocimientos durante mi formación profesional y durante todo el proceso de este trabajo de investigación.

Así mismo, quiero dar mi más profundo agradecimiento al Ing. Daniel Cordero-Moreno, por todo el apoyo y soporte brindando para el desarrollo de la tesis. De igual manera brindar un agradecimiento especial a todo el personal de talleres de la escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz por todos los años compartidos, experiencias y enseñanzas vividas.

Un agradecimiento infinito a todos mis compañeros, quienes hicieron de esta etapa de mi vida una experiencia única e inolvidable, amigos que con el tiempo se han convertido en familia.

# Índice de contenido

Dedicatoria .....	ii
Agradecimiento .....	iii
Introducción .....	1
Problemática .....	1
I.    Pregunta de investigación .....	3
II.   Hipótesis .....	3
III.  Objetivo general .....	3
IV.  Objetivos específicos .....	3
Marco teórico .....	4
Motivo de análisis .....	4
Ciudades intermedias .....	4
Congestión vehicular .....	4
Contaminación ambiental .....	8
Movilidad sostenible .....	8
Vehículos eléctricos .....	9
Bicicleta eléctrica .....	11
Costo de energía eléctrica en Ecuador .....	12
Costo de combustibles en Ecuador .....	13
Materiales y métodos.....	15
Bicicleta eléctrica.....	15
Vehículos a combustión interna .....	15
GPS.....	16
Vehículo eléctrico .....	16
Vehículos a combustión interna .....	17
Rutas preestablecidas .....	17
Filtración y suavización de datos.....	18
Filtración de datos GPS.....	18
Suavización de velocidad.....	19
Suavización de altura y pendiente .....	21
Dinámica vehicular.....	26
Factor de emisión .....	29
Resultados.....	32

<b>Consumo energético .....</b>	<b>32</b>
<b>Emisiones contaminantes .....</b>	<b>33</b>
<b>Tiempo.....</b>	<b>43</b>
<b>Costo.....</b>	<b>44</b>
<b>Conclusiones.....</b>	<b>46</b>
<b>Recomendaciones.....</b>	<b>53</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>55</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1. Vehículos a combustión interna. ....</b>	<b>15</b>
<b>Tabla 2. Rutas preestablecidas. ....</b>	<b>18</b>
<b>Tabla 3. Extracto de datos entregados por GPS VBOX Sport a 20 Hz. ....</b>	<b>19</b>
<b>Tabla 4. Extracto de datos filtrados a 1 Hz. ....</b>	<b>19</b>
<b>Tabla 5. Factor de emisión para vehículos a gasolina livianos de pasajeros. ....</b>	<b>29</b>
<b>Tabla 6. Factor de CH<sub>4</sub> para vehículos a gasolina livianos de pasajeros. ....</b>	<b>30</b>
<b>Tabla 7. Factor de N<sub>2</sub>O para vehículos a gasolina livianos de pasajeros. ....</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 8. Factor de emisiones contaminantes de una termoeléctrica de Fuel Oil. ....</b>	<b>32</b>
<b>Tabla 9. Energía requerida [kWh] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 10. Emisiones contaminantes [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>35</b>
<b>Tabla 11. Emisiones contaminantes [g] considerando el 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>36</b>
<b>Tabla 12. Tiempo [min] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>44</b>
<b>Tabla 13. Costo [\$USD] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>45</b>

# Índice de figuras

<b>Figura 1. Objetivos de la UE para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.....</b>	<b>2</b>
<b>Figura 2. Principales fabricantes de automóviles a nivel mundial según sus ventas en el año 2021. ....</b>	<b>5</b>
<b>Figura 3. Resultados de encuesta a percepción.....</b>	<b>6</b>
<b>Figura 4. Nivel de servicio viario.....</b>	<b>7</b>
<b>Figura 5. Venta de vehículos eléctricos a nivel mundial entre el año 2016 a 2022. ....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 6. Venta de vehículos eléctricos a nivel mundial entre el año 2016 a 2022. ....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 7. Resumen de incentivos a movilidad eléctrica. ....</b>	<b>11</b>
<b>Figura 8. Bicicletas eléctricas vendidas en Europa. ....</b>	<b>12</b>
<b>Figura 9. Precios de gasolina en la región. ....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 10. Precios de Diesel en la región.....</b>	<b>14</b>
<b>Figura 12. Vehículo eléctrico Chock G2.....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 13. Rutas preestablecidas. ....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 14. Velocidad original. ....</b>	<b>20</b>
<b>Figura 15. Velocidad Suavizada Cubic Spline. ....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 16. Comparación de velocidades.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 17. Altitud GPS VBOX Sport.....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 18. Altitud GPS Visualizer. ....</b>	<b>25</b>
<b>Figura 19. Suavización de pendiente.....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 20. Fuerzas externas que actúan sobre el vehículo. ....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 21. Potencia generada. ....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 22. Energía demandada. ....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 23. Energía requerida [kWh] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 24. Emisiones de CO [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 25. Comparación de emisiones de CO [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>37</b>

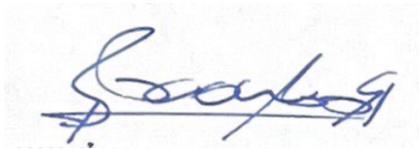
<b>Figura 26. Emisiones de NO<sub>x</sub> [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 27. Comparación de emisiones de NO<sub>x</sub> [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>38</b>
<b>Figura 28. Emisiones de CO<sub>2</sub> [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 29. Comparación de emisiones de CO<sub>2</sub> [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 30. Emisiones de PM<sub>10</sub> [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 31. Comparación de emisiones de PM<sub>10</sub> [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 32. Emisiones de PM<sub>2,5</sub> [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 33. Comparación de emisiones de PM<sub>2,5</sub> [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 34. Emisiones de N<sub>2</sub>O [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 35. Comparación de emisiones de N<sub>2</sub>O [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>42</b>
<b>Figura 36. Emisiones de CH<sub>4</sub> [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 37. Comparación de emisiones de CH<sub>4</sub> [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas. ....</b>	<b>43</b>
<b>Figura 38. Tiempo [min] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.</b>	<b>44</b>
<b>Figura 39. Costo [USD] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.</b>	<b>46</b>
<b>Figura 40. Energía promedio [%] de cada modo de transporte en las rutas pre establecidas.....</b>	<b>47</b>
<b>Figura 41. Promedio de emisiones contaminantes [%] producidas por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas (para modos de transporte eléctrico se considera el 100% de energía producida por termoeléctrica).....</b>	<b>49</b>

<b>Figura 42. Promedio de emisiones contaminantes [%] producidas por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas (para modos de transporte eléctrico se considera el 12,35% de energía producida por termoeléctrica).....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 43. Promedio de tiempo [%] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 44. Promedio de costo [%] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.....</b>	<b>53</b>

## Resumen

Las ciudades han evolucionado creando infraestructuras para el uso de vehículos como medios de transporte, lo que ha generado que exista una alta contaminación en el aire. Hoy en día, las ciudades intermedias buscan opciones de movilidad sostenible que sean amigable con el medio ambiente. Esta investigación tiene como objetivo realizar una comparación de rendimiento energético, ambiental, operacional y económico de diferentes modos de transporte como son bicicletas eléctricas, vehículos a combustión interna y vehículo eléctrico donde se determina cuál es el más conveniente para una ciudad intermedia, el caso de estudio se desarrolló en la ciudad de Cuenca, Ecuador. Mediante instrumentación GPS, métodos de suavización de pendiente, suavización de velocidad y dinámica vehicular se analizaron distintas variables como distancia, tiempo, velocidad, aceleración, pendiente, energía requerida y emisiones contaminantes producidos por cada medio de transporte en las rutas preestablecidas. Con los resultados obtenidos, se concluye que la bicicleta eléctrica y el vehículo eléctrico son los medios de transporte que generan menos emisiones contaminantes y a un menor costo para recorrer la misma distancia que un vehículo a combustión por lo que la movilidad eléctrica resulta una opción viable y recomendable en una ciudad intermedia. En un futuro esta información puede ser útil para el gobierno local impulse nuevas políticas de movilidad y tanto el sector público como privado fomenten al desarrollo de infraestructura para modos de transporte eléctricos.

**Palabras clave:** Rendimiento energético, ambiental, operacional y económico. Movilidad sostenible, modos de transporte, ciudad intermedia.



.....  
**Ing. Robert Rockwood**  
Coordinador de escuela.



Firmado electrónicamente por:  
**GUSTAVO ANDRES  
ALVAREZ COELLO**

.....  
**Ing. Gustavo Alvarez-Coello, M.Sc.**  
Director de trabajo de titulación.

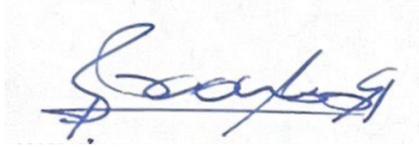


.....  
**Diego Rosero López**  
Autor.

## Abstract

Cities have evolved by creating infrastructure for the use of vehicles as means of transportation, which has led to high air pollution. Nowadays, intermediate cities are looking for sustainable mobility options that are environmentally friendly. This research aims to compare the energy, environmental, operational and economic performance of different modes of transportation such as electric bicycles, internal combustion vehicles and electric vehicles to determine which is the most convenient for an intermediate city. The case study was developed in the city of Cuenca, Ecuador. Using GPS instrumentation, slope smoothing, speed smoothing and vehicle dynamics methods, different variables such as distance, time, speed, acceleration, slope, energy required and polluting emissions produced by each means of transportation were analyzed in the pre-established routes. With the results obtained, it is concluded that the electric bicycle and the electric vehicle are the means of transportation that generate fewer polluting emissions and at a lower cost to travel the same distance as a combustion vehicle, so electric mobility is a viable and recommendable option in an intermediate city. In the future, this information can be useful for the local government to promote new mobility policies and for both the public and private sectors to promote the development of infrastructure for electric modes of transportation.

**Keywords:** Energy, environmental, operational, and economic performance. Sustainable mobility, modes of transport, intermediate city.

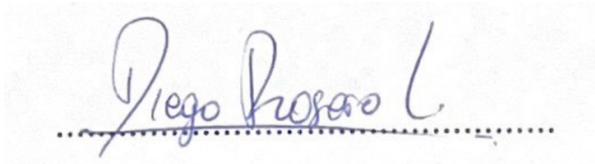


.....  
**Ing. Robert Rockwood**  
School coordinator.



Escaneado al crear este documento por:  
**GUSTAVO ANDRES  
ALVAREZ COELLO**

.....  
**Ing. Gustavo Alvarez-Coello, M.Sc.**  
Thesis Director.



.....  
**Diego Rosero López**  
Author.

# **Comparación de energía, emisiones, tiempo y costo de diferentes medios de transporte en una ciudad intermedia.**

**Comparison of energy, emissions, time and cost of different means of transport in an intermediate city**

**Diego Esteban Rosero-López**  
Gustavo Andrés Alvarez-Coello, Daniel Cordero-Moreno

Escuela de Ingeniería Mecánica Automotriz  
Universidad del Azuay  
[diegorosero26@es.uazuay.edu.ec](mailto:diegorosero26@es.uazuay.edu.ec)

## **Introducción**

### **Problemática**

Todo vehículo requiere de energía para su funcionamiento, los vehículos convencionales obtienen su energía a partir de los combustibles fósiles como la gasolina y el diésel. La combustión a altas temperaturas libera contaminantes a la atmósfera como, por ejemplo: hidrocarburos (HC), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), material particulado (PM), monóxido de carbono (CO), óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>) y compuestos orgánicos volátiles (COV), entre otros (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2016).

El CO<sub>2</sub> está presente de forma natural en la atmósfera, en las últimas décadas la emisión de CO<sub>2</sub> y otros contaminantes está provocando una rápida aceleración en el efecto invernadero, por lo que se teme que se dé una importante alteración del clima y elevaciones en el nivel de los océanos. Como en todos los países desarrollados, el transporte es el principal responsable de emisiones de CO<sub>2</sub>, explicando con un indicador que, de cada 100 kilómetros recorridos en un automóvil, se emiten 20 kg de CO<sub>2</sub>, lo que equivale a 40.000 m<sup>3</sup> de aire (Estevan & Sanz, 1996).

Los medios de transporte son los responsables de las emisiones del 25% de CO<sub>2</sub>, 87% del CO y del 66% de NO<sub>x</sub>. No todos los medios de transporte emiten los mismos gases contaminantes y en misma proporción, esto dependerá del tipo de motor y si utiliza como

combustible gasolina o diésel; en el caso de los vehículos a gasolina, generalmente emiten monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, hidrocarburos y compuestos de plomo, mientras que los vehículos a diésel emiten partículas sólidas en forma de hollín, generando humos negros, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno y anhídrido sulfuroso procedente del azufre contenido en el combustible (Twenergy, 2019).

El objetivo de la Unión Europea en cuanto a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, está en lograr disminuir el promedio de CO<sub>2</sub> en vehículos nuevos a 95 g/km y en los vehículos comerciales ligeros lograr reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> promedio a 147 g/km. Por otra parte, se ha planteado como objetivo reducir el consumo de petróleo para el transporte en un 70% para el 2050, en comparación con el año 2008, además se busca reducir las emisiones de gases de efecto invernadero de combustibles en el transporte marítimo hasta en un 40% para el año 2050, en comparación con el año 2005. Para el año 2030 se pretende reducir en un 20% las emisiones de gases de efecto invernadero, en comparación al año 2008 y para el año 2050 conseguirá una reducción de gases de efecto invernadero de un 60%, en comparación al año 1990 (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2016).

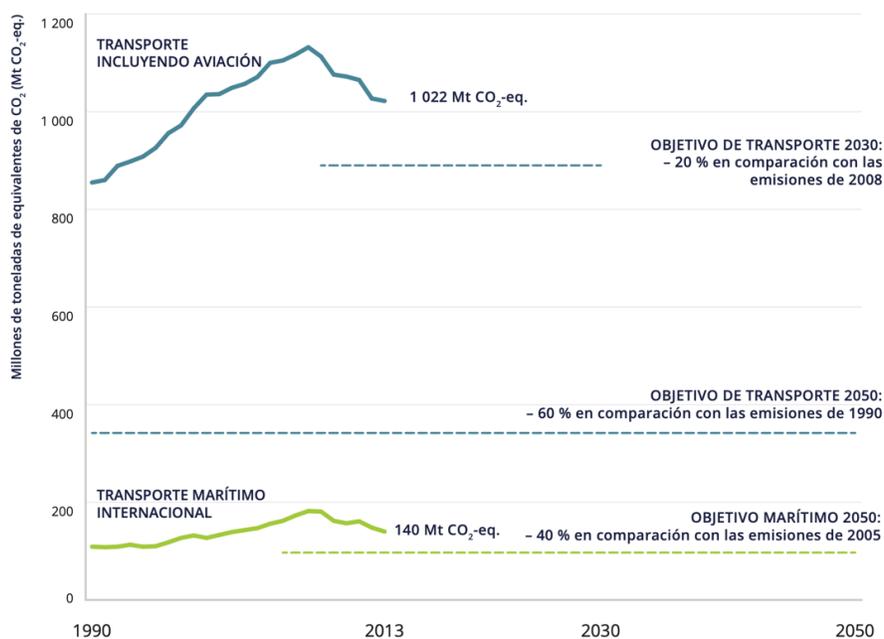


Figura 1. Objetivos de la UE para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

Fuente: (Agencia Europea del Medio Ambiente, 2016).

## **I. Pregunta de investigación**

¿En que medida la movilidad eléctrica puede ser considerada como un medio de transporte sostenible en cuanto a energía, emisiones, tiempo y costo en una ciudad intermedia?

## **II. Hipótesis**

La movilidad eléctrica ha venido en constante crecimiento y desarrollo a nivel mundial, principalmente por ser amigable con el medio ambiente al ser medios de transporte que no producen emisiones de gases contaminantes al medio ambiente. Dentro de una ciudad intermedia, la movilidad eléctrica es altamente efectiva, considerando las distancias a recorrer, características de rutas y tiempo de duración de cada recorrido.

## **III. Objetivo general**

- Evaluar el rendimiento energético, ambiental, operacional y económico entre vehículos de combustión interna, vehículo eléctrico y bicicleta eléctrica en una ciudad intermedia.

## **IV. Objetivos específicos**

- Determinar la energía requerida por cada medio de transporte mediante la obtención de datos de cada ruta.
- Estimar emisiones contaminantes de los medios de transporte con factores de emisión.
- Contabilizar el tiempo transcurrido en los diferentes medios de transporte en cada ruta.
- Estimar el costo del uso de cada medio de transporte en las rutas de estudio.
- Comparar los resultados entre los diferentes medios de transporte en una ciudad intermedia.

## **Marco teórico**

### **Motivo de análisis**

Mediante este trabajo de investigación, se busca comparar la cantidad de energía, emisiones, tiempo y costos que requieren diferentes medios de transporte en una ciudad intermedia, con la finalidad impulsar a la movilidad sostenible en una ciudad intermedia e implementar nuevas tecnologías para cumplir con la demanda requerida por la misma. Estos estudios surgen por la congestión vehicular existente hoy en día, la excesiva contaminación ambiental producida por el parque automotor y en busca de presentar una propuesta para una movilidad sostenible. Este caso de estudio se llevará a cabo en la ciudad de Cuenca, Ecuador.

### **Ciudades intermedias**

Según la ONU-Habit (2012), las ciudades se dividen en tres grupos, menor, intermedia y grande, siendo las ciudades intermedias las que cuentan con una cantidad de habitantes que oscila entre los 50.000 y 1 millón. Según el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (2023), Cuenca cuenta con una población de 801.609 habitantes, por lo que a Cuenca se le reconoce como una ciudad intermedia.

### **Congestión vehicular**

El parque automotor crece año tras año, generando un uso desmedido del uso de vehículos en las ciudades. Aproximadamente existen 500 millones de vehículos a nivel mundial, lo que es causante de uso de espacios públicos y la expansión de las ciudades (Alcaldía de Cuenca, 2015a).

Los principales fabricantes de vehículos según sus ventas a nivel mundial son: Toyota con 9,56 millones de vehículos vendidos, Volkswagen con 8,88 millones de vehículos vendidos y Hyundai – Kia con un total de 6,67 millones de vehículos vendidos en el año 2021 (Orús, Statista, 2022a).

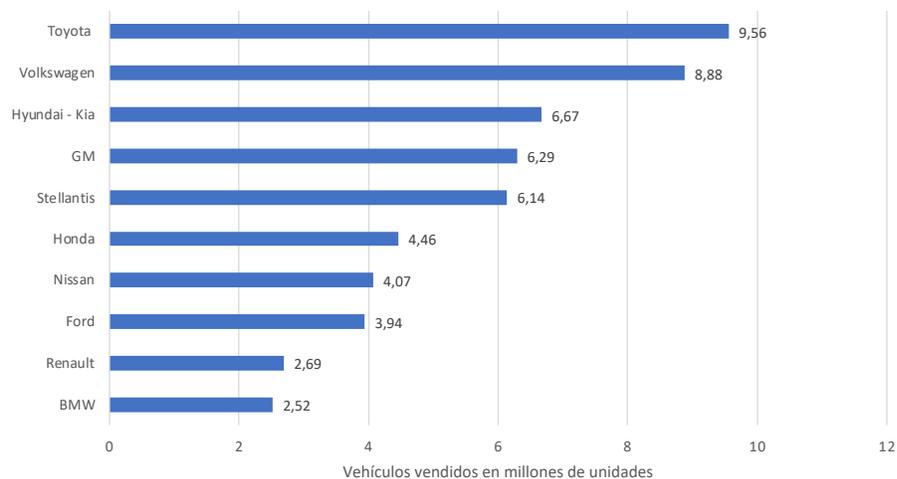


Figura 2. Principales fabricantes de automóviles a nivel mundial según sus ventas en el año 2021.

Fuente: (Orús, Statista, 2022a).

La venta de vehículos en los últimos años se vio liderada por China y Estados Unidos, siendo estos los países que más vehículos vendían anualmente. Sin duda, en el año 2020 las ventas anuales de vehículos bajaron en todos los países debido a la pandemia de COVID-19, pero China y Estados Unidos se mantuvieron siendo los mayores vendedores de vehículos en el mundo con un total de 20'177.700 y 3'401.800 de vehículos vendidos respectivamente (Orús, Statista, 2022b).

En el año 2021, China volvió a marcar la diferencia siendo el país con mayor aportación al parque automotor a nivel mundial, registrando un total de ventas de 21.485.500 vehículos, sin embargo, Estados Unidos sufrió una baja en sus ventas con un total de 3.350.100 vehículos vendidos, ubicándose este año como el tercer país en ventas de vehículos y registrando su volumen más bajo de unidades vendidas en los últimos 15 años. Japón fue el segundo país con más vehículos vendidos en el 2021 con un total de 3.675.700 vehículos (Orús, Statista, 2022b).

En Cuenca, el año 2020 se registraron 82.351 vehículos matriculados (EMOV EP, 2020), hasta noviembre del 2021 se encontraban matriculados 91.888 vehículos y alrededor de 116.000 vehículos que habían cumplido ya con la revisión técnica vehicular (EMOV EP, 2021).

En Cuenca, el coche ha permitido que su ciudadanía vea factible el vivir alejado del centro de la ciudad, dando como resultado la expansión de la ciudad y el incremento de uso del

vehículo privado. Al vehículo se lo ha relacionado con comodidad y estatus social, colaborando con el incremento del parque automotor y a su vez transformado la ciudad para crear espacios donde se adapten a las necesidades de un vehículo, despojando así al peatón del espacio urbano (Alcaldía de Cuenca, 2015a).

Es importante reconocer la ocupación del suelo para espacios destinados a infraestructuras de transporte, tanto como sistemas viarios y aparcamientos, ya que estos generan una reducción al espacio urbano ocupado por el peatón (Estavan y Sanz, 1996).

Según la Ilustre Municipalidad de Cuenca (2015a), en una encuesta realizada a percepción sobre la forma de movilidad respecto al destino de los habitantes de la ciudad de Cuenca, el medio de transporte más utilizado es el auto (vehículo privado) y el bus (transporte público), siendo estos los principales causantes de la congestión vehicular en la ciudad.

FORMA DE MOVILIDAD RESPECTO AL DESTINO (PORCENTAJES)						
DESTINO	CAMINANDO	COMO CICLISTA	EN AUTO	EN BUS	EN TAXI	TOTAL
A trabajar	18%	1%	43%	36%	1%	100%
A estudiar	12%	5%	25%	57%	1%	100%
De compras	11%	1%	41%	42%	6%	100%
Ocio	31%	8%	32%	25%	4%	100%
Al Centro Histórico	17%	1%	33%	45%	3%	100%
A las afueras	1%	0,3%	49%	47%	3%	100%

*Figura 3. Resultados de encuesta a percepción.*

*Fuente: (Alcaldía de Cuenca, 2015a).*

Para calificar la saturación vehicular en Cuenca, se ha clasificado el nivel de servicio viario. El nivel de servicio es una medida cualitativa de las condiciones de circulación en una vía, dichas condiciones se ven afectadas por la velocidad, tiempo recorrido, seguridad, etc. (Alcaldía de Cuenca, 2015a). Se han clasificado en los siguientes niveles:

- **Nivel A:** Representa circulación a flujo libre.
- **Nivel B:** Rango de flujo libre, se empieza a observar otros vehículos integrantes de la circulación.
- **Nivel C:** Rango de flujo estable, la operación de los usuarios se empieza a ver afectada por interacciones con los demás usuarios.

- **Nivel D:** Circulación de densidad elevada.
- **Nivel E:** Circulación cerca del límite de la capacidad viaria.
- **Nivel F:** Condiciones de flujo forzado.

Bajo estos niveles de servicio viario, se puede observar que la saturación vial en Cuenca, en nivel de servicio A representa un 12,53%, nivel de servicio B 23,49%, nivel de servicio C 21,52%, nivel de servicio D 34,43%, nivel de servicio E 1,42% y nivel de servicio F 1,61% (Alcaldía de Cuenca, 2015a).

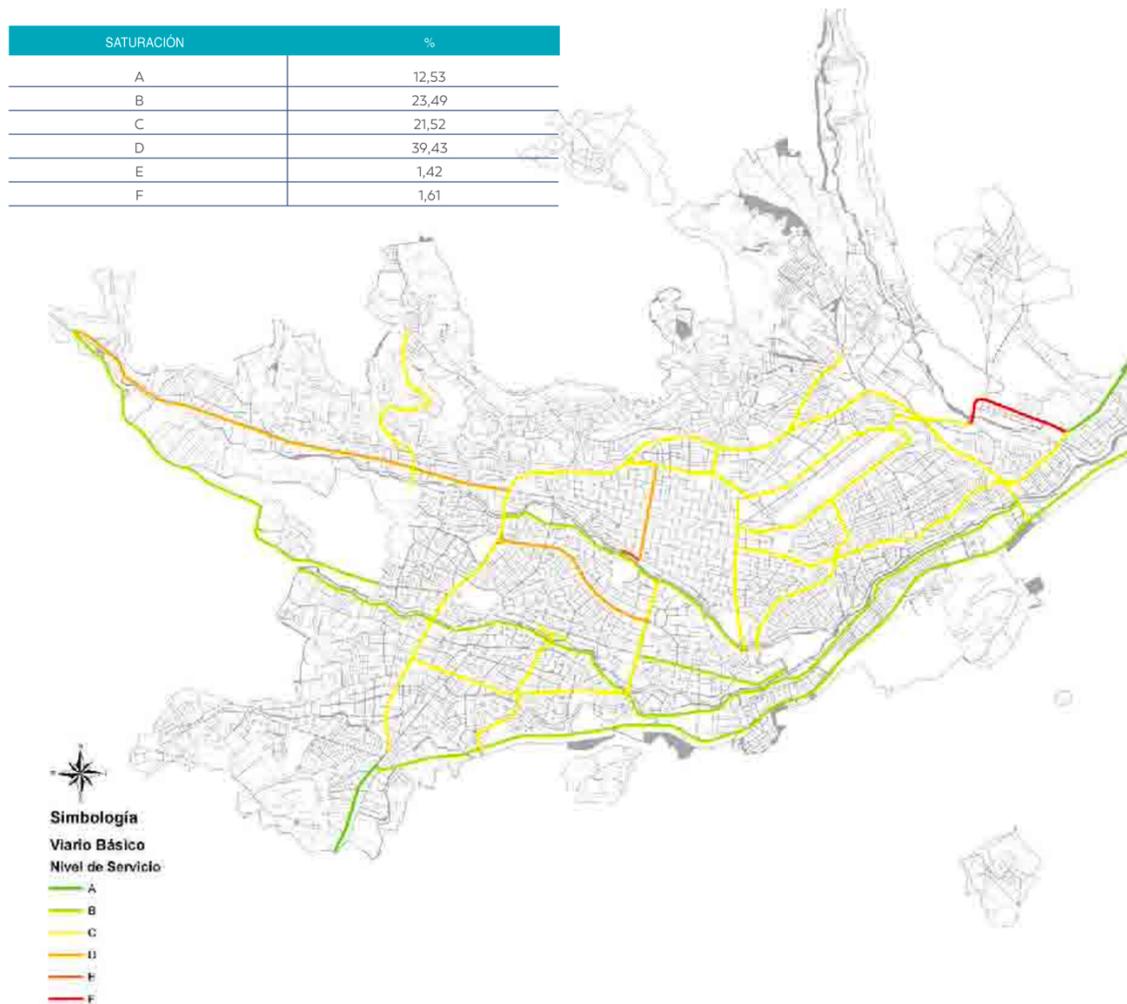


Figura 4. Nivel de servicio viario.  
Fuente: (Alcaldía de Cuenca, 2015a)

## **Contaminación ambiental**

El parque automotor es uno de los principales causantes de la contaminación ambiental, siendo el principal contribuyente en emisiones de CO y NO<sub>x</sub>. En Barcelona (España), aproximadamente el 83,5% de emisiones contaminantes son emitidas por el parque automotor (Toro, et al., 2001). Según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el CO<sub>2</sub> es el gas de efecto invernadero (GEI) más importante, mismo que es propio del ser humano y tiene efectos en la naturaleza. El transporte representa el 13,1% de emisiones de CO<sub>2</sub> a nivel global (IPCC, 2008).

En la ciudad de Cuenca, el 94,5% de CO emitido es correspondiente al tráfico vehicular de la ciudad (EMOV EP, 2020). Según la EMOV EP (2014), en el inventario de emisiones atmosféricas del cantón Cuenca, indica los siguientes porcentajes de emisiones contaminantes a causa del parque automotor:

- CO<sub>2</sub>: 58,40%
- PM<sub>10</sub>: 55,60%
- PM<sub>2,5</sub>: 42,40%
- NO<sub>x</sub>: 71,20%
- N<sub>2</sub>O: 79,20%
- CH<sub>4</sub>: 4,20%
- CO: 94,90%

## **Movilidad sostenible**

Los medios de transporte tanto de personas como de bienes, se han convertido en uno de los principales marcos estratégicos dentro de la sociedad, basándose en una movilidad sostenible dentro de un marco económico, medio ambiental, tráfico generado y uso de medios de transporte públicos masivos (Guillamón & Hoyos, sf).

La movilidad sostenible tiene como principal objetivo reducir la congestión vehicular, contaminación ambiental y uso de combustibles fósiles (Galindo & Meneses , 2017). La movilidad sostenible se puede guiar por cuatro metas planteadas: acceso equitativo, seguridad y protección, eficiencia, contaminación y capacidad de repuesta a problemas climáticos. Estas metas comprenden una visión general de la movilidad sostenible,

entendiendo que para efectuarse correctamente se deberá llevar a cabo por igual las metas estableciendo compromiso entre ellas (Mohieldin & Vandycke , 2017).

Una de las medidas a tomar dentro de la estrategia española para una movilidad sostenible se encuentra priorizar el transporte público, vehículo privado limpio y eficiente, nuevas tecnologías en sistemas de tracción y eficiencia energética y servicios públicos de transporte (Colegio de Ingenieros de Caminos, 2010). Dentro de las medidas a tomar se diversifican en áreas de territorio, cambio climático, calidad de aire y ruido, seguridad y salud y gestión de la demanda.

Dentro de los planes para lograr una movilidad sostenible se presentaba el uso de vehículo privado limpio y eficiente, por lo que se ha enfocado el estudio en la movilidad eléctrica, principalmente en los vehículos eléctricos y bicicletas eléctricas.

### **Vehículos eléctricos**

Los vehículos eléctricos existen desde hace más de un siglo; sin embargo, no tuvieron éxito debido a sus elevados costos, baja autonomía y velocidad limitada, con excepción de algunos medios de transporte como trenes eléctricos o trolebuses. Los medios de transporte eléctricos han sido acogidos en los últimos años con el fin de reducir los gases de efecto invernadero (López & Galarza, 2016).

La venta de vehículos eléctricos en el 2005 era de 2.000 vehículos anuales; mientras que, la venta de vehículos eléctricos a batería (VEB) y vehículos híbridos eléctricos (VEHs) ha crecido en la última década, llegando a vender 550.000 unidades en el año 2015 (López & Galarza, 2016). Cada año la demanda de vehículos eléctricos ha aumentado considerablemente, llegando a venderse hasta 18 millones de unidades en el 2022 (Carrier, 2023).

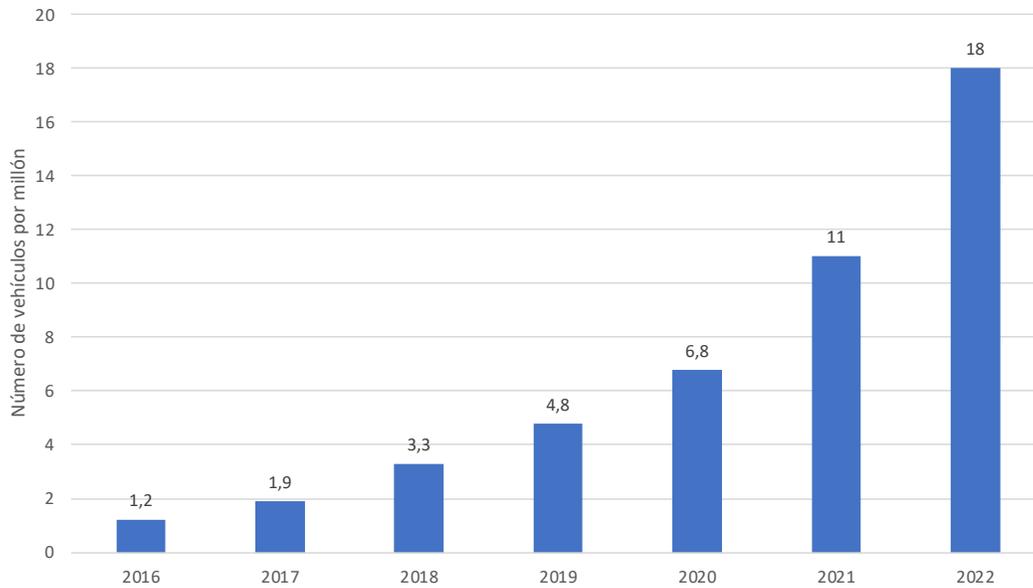


Figura 5. Venta de vehículos eléctricos a nivel mundial entre el año 2016 a 2022.

Fuente: (Carlier, 2023).

Según la ONU en el año 2018 Noruega reportó que el 45% de ventas de vehículos representaban a vehículos eléctricos.

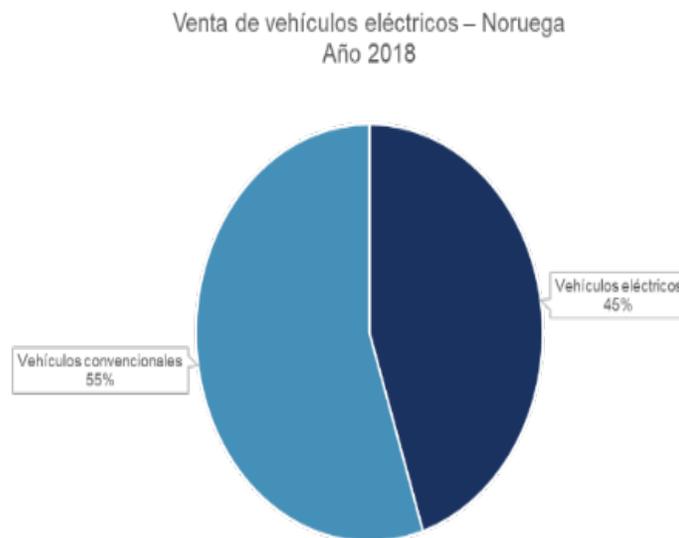


Figura 6. Venta de vehículos eléctricos a nivel mundial entre el año 2016 a 2022.

Fuente: (Mañez Gomis, Bermúdez From, & Araya Salas, 2018).

En varios países de la región se han presentado diferentes incentivos económicos para los usuarios que opten por adquirir vehículos eléctricos; en Ecuador, se ha incentivado con la exención del IVA, exención de impuestos aduaneros, exención de impuestos a consumos especiales, tarifa eléctrica diferenciada y exención de impuesto ambiental (López & Galarza, 2016).

INCENTIVO /PAÍS	ARGENTINA	BRASIL *	COLOMBIA	COSTA RICA**	CHILE	ECUADOR	MÉXICO	URUGUAY
Exención de IVA		●	●			●		
Exención de permiso de circulación		●		●			●	
Exención de programas de restricción vehicular			●	●	●		●	
Exención de impuestos aduaneros			●	●		●		●
Exención de impuesto a consumos especiales				●		●		
Tarifa eléctrica diferenciada					●	●	●	
Exención de impuesto ambiental					●	●		

\*\* En el caso de Brasil, los incentivos son a nivel estatal, no federal.  
 \*\* Basado en actual propuesta de ley sobre movilidad eléctrica en Costa Rica.

Figura 7. Resumen de incentivos a movilidad eléctrica.

Fuente: (López & Galarza, 2016).

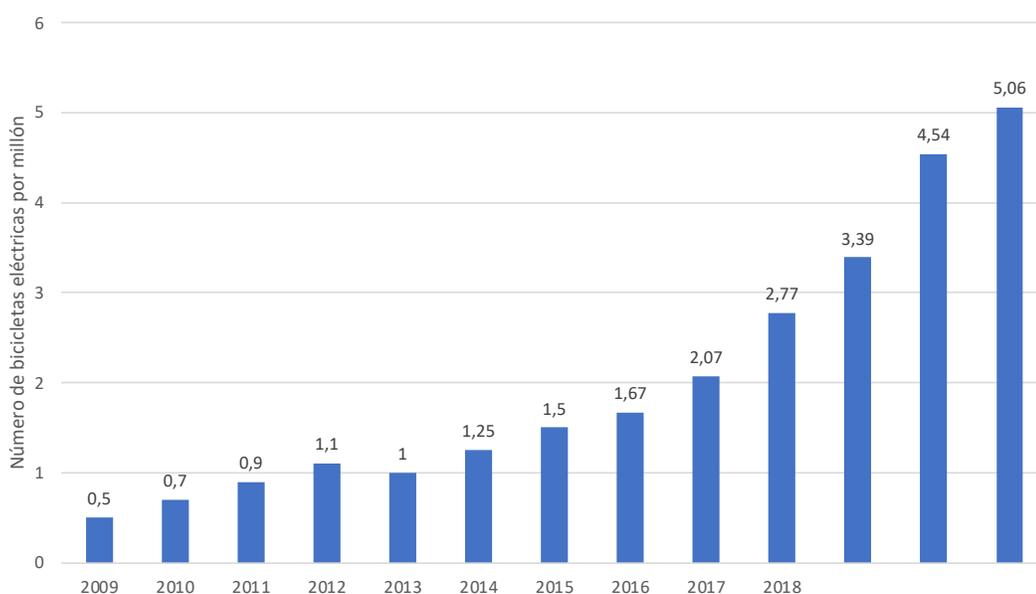
## Bicicleta eléctrica

La bicicleta eléctrica presenta una alternativa para una movilidad amigable con el medio ambiente, marcando una diferencia con la bicicleta convencional ya que la bicicleta eléctrica cuenta con un pedaleo asistido, misma que reduce el esfuerzo del usuario para movilizarse de un punto a otro y siendo un medio de transporte que no emite gases de efecto invernadero. Las bicicletas eléctricas cuentan con una autonomía de alrededor de 30 kilómetros (BBVA, 2021).

La bicicleta eléctrica alcanza hasta una velocidad entre 0 y 40 km/h aproximadamente, siendo esta una desventaja sobre medios de transporte que utilicen como fuente de energía los derivados del petróleo, ya que estos pueden alcanzar una mayor velocidad y autonomía (Urzán, Moncada, & Escobar, 2017).

En el año 2010, fueron producidas aproximadamente 29 millones de bicicletas eléctricas, representando un 24.7% de incremento con respecto al año 2009. Para el 2011, solo en China se registraron 120 millones de bicicletas eléctricas, representando el 90% del mercado mundial. Se estima que para el año 2016, se encuentren 466 millones de bicicletas eléctricas circulando (Urzán, Moncada, & Escobar , 2017).

Europa ha sido el mercado con mayor consumo de bicicletas eléctricas, siendo así que en el año 2021 ha llegado 5.6 millones de bicicletas eléctricas (Statista Research Department, 2023).



*Figura 8. Bicicletas eléctricas vendidas en Europa.*

*Fuente:* (Statista Research Department, 2023).

### **Costo de energía eléctrica en Ecuador**

El Directorio de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNR), determinó que el precio de la energía eléctrica en el Ecuador se mantenga en 9,2 centavos de dólar por cada Kilovatio-hora (CUSD/kWh) para usuario comercial o residencial, costo que se ha mantenido desde el año 2020 (Ministerio de Energía y Minas, 2022).

De acuerdo a la resolución nro. ARCERNR-009/2022, la tarifa residencial se divide en tres categorías:

- **Categoría 1:** Consumo menor o igual a 150 kWh mensuales, el costo será de 9,20 ¢USD/kWh.
- **Categoría 2:** Consumo mayor a 150 kWh y menor o igual a 300 kWh mensuales, el costo será de 9,40 ¢USD/kWh.
- **Categoría 3:** Consumo mayor a 300 kWh mensuales, el costo será de 9,60 ¢USD/kWh.

Así mismo, la tarifa comercial se divide en cinco categorías:

- **Categoría 1:** Consumo menor o igual a 150 kWh mensuales, el costo será de 9,20 ¢USD/kWh.
- **Categoría 2:** Consumo mayor a 150 kWh y menor o igual a 300 kWh mensuales, el costo será de 9,40 ¢USD/kWh.
- **Categoría 3:** Consumo mayor a 300 kWh y menor o igual a 500 kWh mensuales, el costo será de 9,60 ¢USD/kWh.
- **Categoría 4:** Consumo mayor a 500 kWh y menor o igual 1.000 kWh mensual, el costo será de 9,80 ¢USD/kWh.
- **Categoría 5:** Consumo mayor a 1.000 kWh mensual, el costo será de 10,00 ¢USD/kWh.

### **Costo de combustibles en Ecuador**

Ecuador es uno de los países con precios más bajos en combustibles de la región, clasificando para el sector automotriz dos tipos de gasolina: Extra o Ecopaís y Diesel. El valor de la gasolina Extra o Ecopaís es de 2,40 dólares por galón estadounidense (USD/GAL), mientras que el valor del Diesel es de 1,75 dólares por galón estadounidense (USD/GAL) (Global Petrol Prices, 2023).

Con base en los datos de Global Petrol Price (2023) se han obtenido los datos de los precios de gasolina en la región, encontrándose Ecuador en el tercer lugar del país con precio más bajo de gasolina en la región.

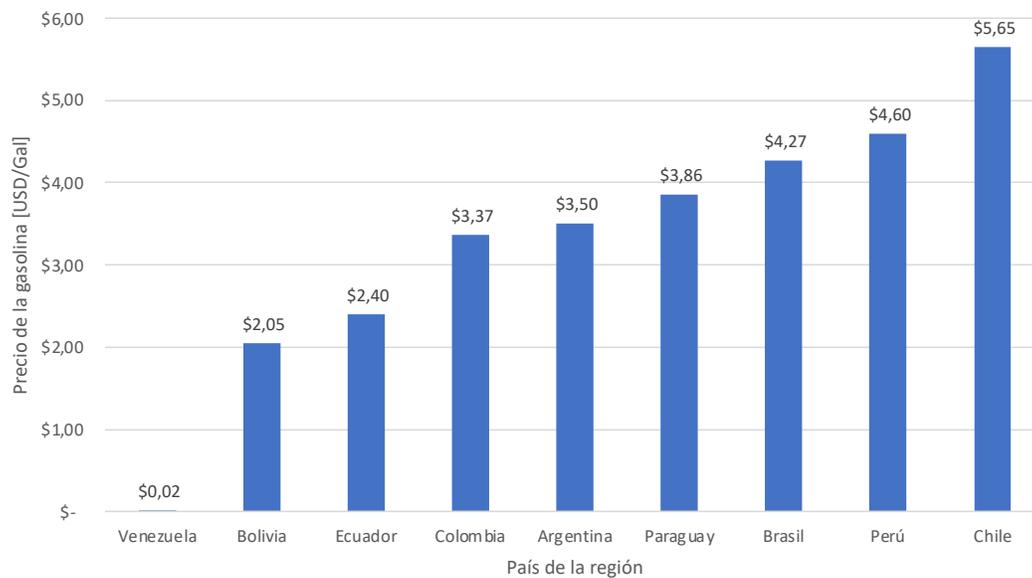


Figura 9. Precios de gasolina en la región.

Fuente: (Elaboración del autor, 2023).

De igual manera, en base a los datos de Global Petrol Price (2023) se han obtenido los datos de los precios de Diesel en la región, siendo Ecuador el segundo país de la región con precios de Diesel más bajos.

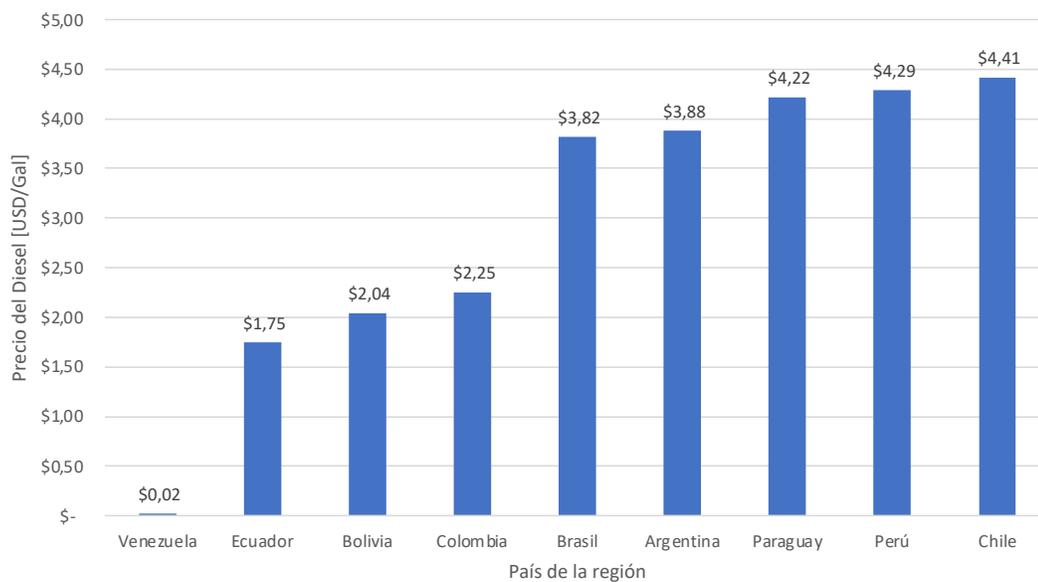


Figura 10. Precios de Diesel en la región.

Fuente: (Elaboración del autor, 2023).

## **Materiales y métodos.**

### **Bicicleta eléctrica**

La bicicleta eléctrica utilizada en el estudio previo “Evaluación de una bicicleta eléctrica como alternativa de movilidad en la ciudad de Cuenca” fue una bicicleta tipo montaña, con rin de 26 pulgadas, así mismo cuenta con un motor de potencia nominal de 500 W, peso de 5,2 kg, torque de impulso de 60 Nm y motor de voltaje de 25 VAC. La batería es de litio con un voltaje de 36 V, capacidad de 14,25 Ah, contenido energético de 515 Wh y un peso aproximado de 3,5 kg (Alvarez, et al., 2018).

### **Vehículos a combustión interna**

*Tabla 1. Vehículos a combustión interna.*

*Fuente: (Elaboración de autor, 2023).*

<b>Marca</b>	<b>Modelo</b>	<b>Año</b>	<b>Cilindraje [cm<sup>3</sup>]</b>
<b>Chevrolet</b>	Aveo Emotion	2010	1600
	Captiva	2016	2400
	Aveo Activo	2012	1600
	Aveo Activo	2011	1600
	Grand Vitara	2007	2000
	Corsa	2007	1800
	Luv D-Max	2008	2500
<b>Hyundai</b>	Tucson IX	2015	2000
	Accent	2004	1600
	Sonata	2015	2000
	i10	2012	1100
<b>Kia</b>	Rio Stylus	2007	1500
<b>Toyota</b>	Yaris	2011	2000

## GPS

Para la obtención de datos de los recorridos realizados, se utilizó un GPS VBOX Sport, mismo que al finalizar las rutas nos proporciona información de latitud, longitud, velocidad y tiempo con una frecuencia de 20 Hz, misma que posteriormente era filtrada a 1 Hz para mejor manejo de datos tomando un dato por segundo.

Según la información obtenida de su ficha técnica, el GPS VBOX Sport tiene una precisión de velocidad de  $\pm 0,1$  km/h y una precisión de  $\pm 5$  metros de altura y posición. El GPS cuenta con un 95% de CEP, es decir, el 95% de lectura de datos de posición se encuentran dentro del círculo de radio indicado (VBOX Automotive, 2022).



*Figura 11. GPS VBOX Sport.*

## Vehículo eléctrico

El vehículo eléctrico utilizado para realizar el estudio de datos ha sido un Dayang Chock G2 del año 2020, mismo que fue proporcionado por la Universidad del Azuay. De acuerdo con la ficha técnica obtenida, este vehículo cuenta con 9 baterías libres de plomo coloidal, potencia nominal de 6 kW, autonomía de 150 kilómetros y una velocidad máxima de 65 km/h, los neumáticos tiene la medida 165/70R15.



*Figura 12. Vehículo eléctrico Chock G2.*

## Vehículos a combustión interna

Los datos obtenidos de los vehículos de combustión interna fueron tomados del estudio “*Evaluation of the electric bicycle as an alternative mobility in the city Cuenca, Ecuador*” realizado por Alvarez et al., (2018). En este estudio se utilizan varios vehículos de diferentes marcas, modelos y año de fabricación, para realizar una comparativa más amplia, entre las marcas utilizadas son: Chevrolet, Kía, Hyundai y Toyota.

## Rutas preestablecidas

Alvarez et al., (2018) en su estudio, determinaron seis rutas para el análisis de datos, mismas que fueron tomadas para el caso de estudio. Las rutas fueron tomadas con base en el plan de movilidad de la ciudad de Cuenca 2015 – 2025, proyecto “Tranvía de los Cuatro Ríos de Cuenca” y posibles escenarios de circulación, cubriendo el casco urbano de la ciudad de Cuenca.

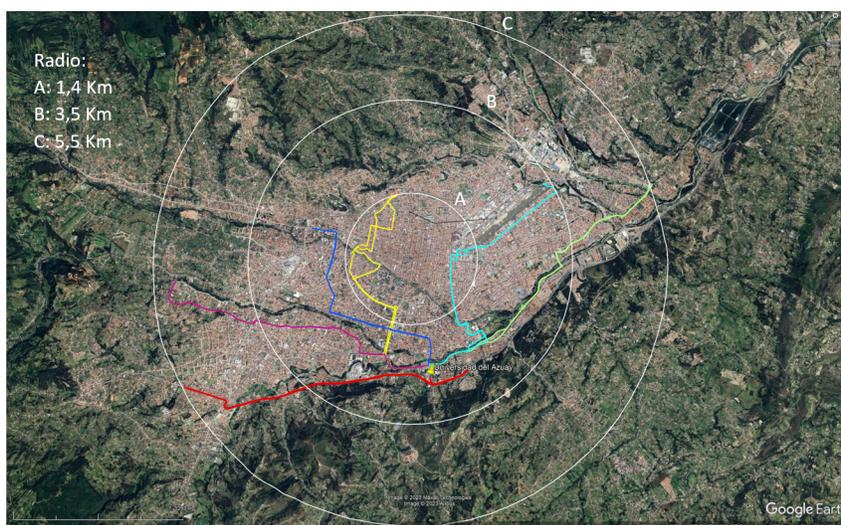


Figura 13. Rutas preestablecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

Definiendo las rutas de la siguiente manera:

*Tabla 2. Rutas preestablecidas.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).*

Ruta 1	UDA – Colegio Borja – UDA	
Ruta 2	UDA – Colegio Pasos – UDA	
Ruta 3	UDA – Supermaxi de las Américas – UDA	
Ruta 4	UDA – Universidad Católica – UDA	
Ruta 5	UDA – Graiman – UDA	
Ruta 6	UDA – Redondel Mujeres de Piedra – UDA	

### **Filtración y suavización de datos**

#### **Filtración de datos GPS**

Como se indicó anteriormente, las características del GPS VBOX Sport nos proporciona información de velocidad, tiempo, latitud y longitud a una frecuencia de 20 Hz., es decir, proporciona datos cada 0.05 segundos, por lo que se obtiene 20 datos por segundo, para un mejor manejo de datos se realizó la filtración de datos a 1 Hz. O un dato por segundo. Así mismo se aplicó una conversión de datos de latitud y longitud, ya que los datos brindados por el GPS se obtienen en minutos, para dicha conversión se realizó una división para 60 y -60 respectivamente en los datos de latitud y longitud.

Tabla 3. Extracto de datos entregados por GPS VBOX Sport a 20 Hz.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

Tiempo	Velocidad original	Altitud	Latitud	Longitud
[s]	[km/h]	[m]	[-]	[-]
0	0	2549.6	-175.208	4740.091
0.05	0	2549.6	-175.208	4740.091
0.1	0	2549.6	-175.208	4740.091
0.15	0	2549.59	-175.208	4740.091
0.2	0	2549.59	-175.208	4740.091
0.25	0	2549.59	-175.208	4740.091
0.3	0	2549.58	-175.208	4740.091
0.35	0	2549.58	-175.208	4740.091
0.4	0	2549.58	-175.208	4740.091
0.45	0	2549.58	-175.208	4740.091
0.5	0	2549.58	-175.208	4740.091
0.55	0	2549.58	-175.208	4740.091
0.6	0	2549.57	-175.208	4740.091
0.65	0.06	2549.57	-175.208	4740.091
0.7	0.12	2549.57	-175.208	4740.091
0.75	0.14	2549.57	-175.208	4740.091
0.8	0.13	2549.58	-175.208	4740.091
0.85	0.12	2549.58	-175.208	4740.091
0.9	0.11	2549.58	-175.208	4740.091
0.95	0.14	2549.58	-175.208	4740.091
1	0.17	2549.58	-175.209	4740.091

Tabla 4. Extracto de datos filtrados a 1 Hz.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

Tiempo	Velocidad original	Latitud	Longitud
[s]	[km/h]	[-]	[-]
0	0	-2.92013717	-79.00151667
1	0.17	-2.92014167	-79.00152083
2	0	-2.92014533	-79.00152667
3	0	-2.92014717	-79.00153267
4	0	-2.92014800	-79.00153750
5	0	-2.92015050	-79.00154017
6	0.46	-2.92015150	-79.00154250
7	1.23	-2.92014767	-79.00153600
8	1.07	-2.92014400	-79.00152417
9	0.17	-2.92013533	-79.00152083
10	1.15	-2.92013100	-79.00151633

### Suavización de velocidad

La suavización de velocidad se realizó aplicando la interpolación de datos con la función de spline cúbicos; esta función es una de las más empleadas por su precisión en ajuste de datos y ya que su cálculo no es complejo de ejecutar (Díaz , 1998).

En este estudio, se realizó la suavización de velocidad con Cubic Spline en un programa desarrollado en Microsoft Excel, tomando datos en un intervalo de tiempo cada cinco segundos, ya que en este intervalo de tiempo se representa de mejor manera el suavizado acercándose a la potencia real y teórica del vehículo con respecto a la aceleración.

El polinomio cúbico en el  $i$ -ésimo intervalo entre los puntos  $(x_i, y_i)$  y  $(x_{i+1}, y_{i+1})$  se define de la siguiente manera:

$$S(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i \quad (1)$$

Cubic Spline se realiza el ajuste con los dos puntos extremos del intervalo, por lo que:

$$S(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i = d_i \quad (2)$$

$$S(x) = a_i(x - x_i)^3 + b_i(x - x_i)^2 + c_i(x - x_i) + d_i = a_i h^3 + b_i h^2 + c_i h + d_i \quad (3)$$

Siendo  $h_i = x - x_i$

Para determinar las curvas y pendientes que se cruzan, se necesita la primera y segunda derivada, quedando de la siguiente manera:

$$S'(x) = 3a_i(x - x_i)^2 + 2b_i(x - x_i) + c_i \quad (4)$$

$$S''(x) = 6a_i(x - x_i) + 2b_i \quad (5)$$

La segunda derivada se le representa por  $S_i$  y  $S_{i+1}$  según el intervalo tomado. Para obtener la constante  $c_i$  se debe despejar  $a_i$ ,  $b_i$  y  $d_i$  para a su vez reemplazar en la ecuación 5.

Es importante definir la condición que los dos polinomios se unen en un punto, para este caso  $x = x_i$ , así se procede a calcular el  $i$ -ésimo intervalo y el extremo derecho. Igualando estas dos ecuaciones y sustituyendo los valores de  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$  y  $d_i$ , se obtiene la siguiente igualdad:

$$h_{i-1}S_{i-1} + (2h_{i-1} + 2h_i)S_i + h_iS_{i+1} = 6\left(\frac{y_{i+1}-y_i}{h_i} - \frac{y_i-y_{i-1}}{h_{i-1}}\right) \quad (6)$$

Esta ecuación se aplica en todos los puntos internos desde  $i = 2$  hasta  $i = n - 1$ , como resultados obtenemos un total de  $n - 2$  ecuaciones. Finalmente se procede a resolver este sistema de ecuaciones mediante el método Gaussiano, teniendo así una suavización en cada uno de los intervalos tomados.

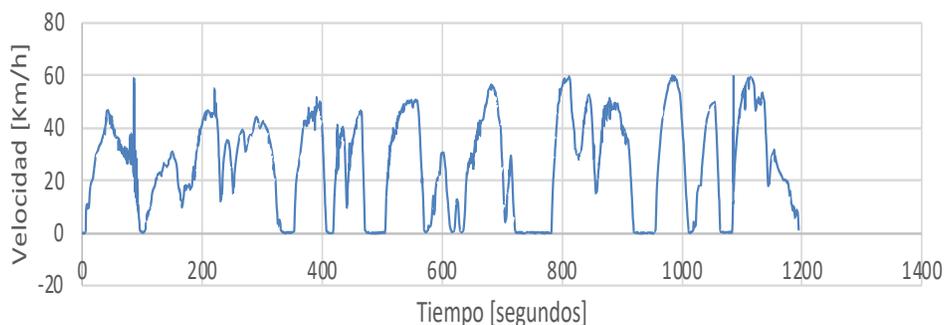


Figura 14. Velocidad original.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

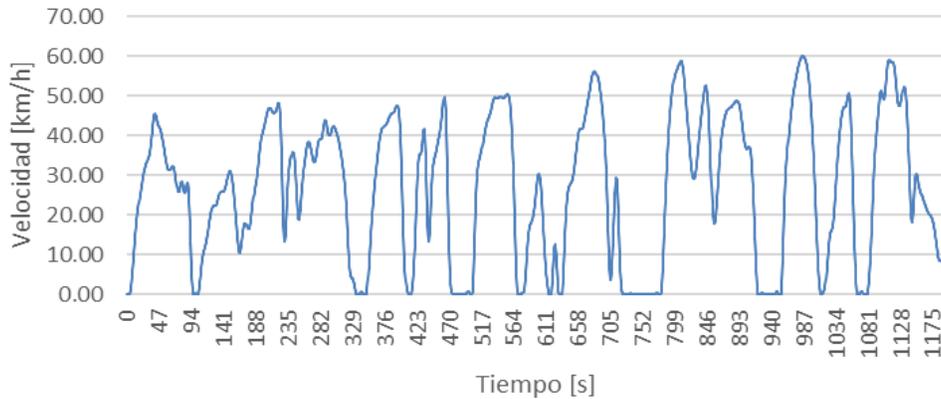


Figura 15. Velocidad Suavizada Cubic Spline.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

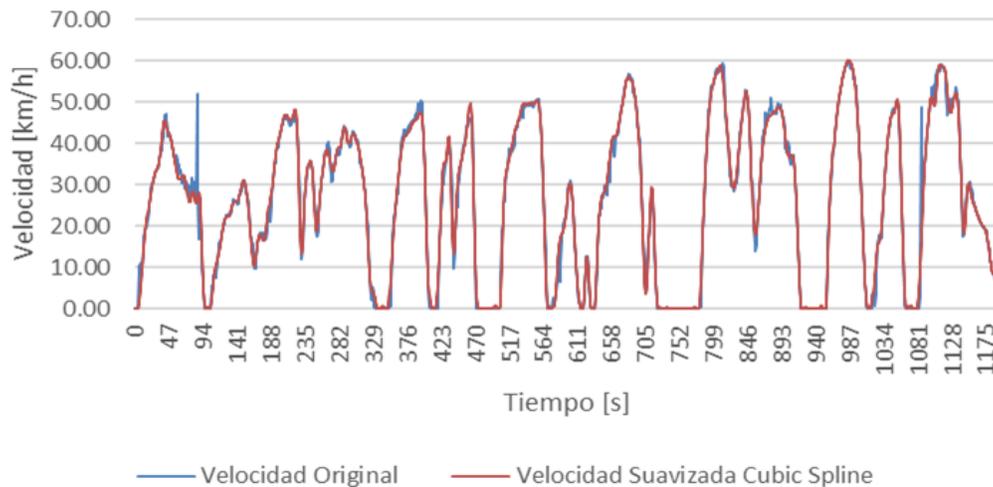


Figura 16. Comparación de velocidades.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

### Suavización de altura y pendiente

Mediante la página web de GPS Visualizer (2019), se obtienen datos más precisos de altitud [m], pendiente [%], distancia [km] e intervalo de distancia [m]. GPS Visualizer realiza la entrega de datos mediante un archivo de texto [.txt], los mismos que se copiaron a un documento Microsoft Excel para proceder con los cálculos de suavización de altura y pendiente.

La suavización de altura y pendiente se llevó a cabo según el Reglamento (UE) 2016/646 de la Comisión de 20 de abril de 2016, el mismo que refiere a un método de pretratamiento de datos para verificar la calidad de los mismo. El Reglamento (UE) 2916/646 recomienda corregir los datos interpolados si se da la siguiente condición.

$$|h_{GPS}(t) - h_{map}(t)| > 40 \text{ m} \quad (7)$$

La corrección de la altitud se aplicará de forma que:

$$h(t) = h_{map}(t) \quad (8)$$

donde:

$h(t)$  – altitud del vehículo tras el examen y la verificación fundamental de la calidad de los datos en el punto de datos  $t$  [m sobre el nivel del mar].

$h_{GPS}(t)$  – altitud del vehículo con GPS en el punto de datos  $t$  [m sobre el nivel del mar].

$h_{map}(t)$  – altitud del vehículo según el mapa topográfico en el punto de datos  $t$  [m sobre el nivel del mar].

Para realizar la corrección de datos de altitud instantánea del vehículo, la altitud  $h(0)$  al comienzo del trayecto  $d(0)$  se obtendrá con GPS, y a continuación se verificará que es correcta con la información proporcionada por un mapa topográfico. La desviación no deberá ser superior a 40m. los datos de altitud instantánea  $h(t)$  deberán corregirse si se da la siguiente condición:

$$|h(t) - h(t - 1)| > \frac{v(t)}{3,6 * \sin 45^\circ} \quad (9)$$

La corrección de la altitud se aplicará de forma que:

$$h_{corr}(t) = h_{corr}(t - 1) \quad (10)$$

Donde:

$h(t)$  – altitud del vehículo tras el examen y verificación fundamental de la calidad de los datos en el punto de dato  $t$  [m sobre el nivel del mar].

$h(t - 1)$  – altitud del vehículo tras el examen y la verificación fundamental de la calidad de los datos en el punto de datos  $t-1$  [m sobre el nivel del mar].

$v(t)$  – velocidad del vehículo en el punto de datos  $t$  [km/h].

$h_{corr}(t)$  – altitud instantánea corregida del vehículo en el punto de datos  $t$  [m sobre el nivel del mar].

$h_{corr}(t - 1)$  – altitud instantánea corregida del vehículo en el punto de datos  $t-1$  [m sobre el nivel del mar].

La distancia total  $d_{tot}[m]$  cubierta por un trayecto se determinará sumando las distancias instantáneas  $d_i$ .

La distancia instantánea  $d_i$  se determinará como:

$$d_i = \frac{v_i}{3,6} \quad (11)$$

Donde:

$d_i$  – distancia instantánea [m].

$v_i$  – velocidad instantánea del vehículo [km/h].

La altitud de cada punto de ruta discreto  $d$  se calculará interpolando la altitud instantánea  $h_{corr}(t)$  como:

$$h_{int}(d) = h_{corr}(0) + \frac{h_{corr}(1) - h_{corr}(0)}{d_1 - d_0} * (d - d_0) \quad (12)$$

Donde:

$h_{int}(d)$  – altitud interpolada en el punto de ruta discreto  $d$  [m sobre el nivel del mar].

$h_{corr}(0)$  – altitud corregida inmediatamente antes del respectivo punto de ruta  $d$  [m sobre el nivel del mar].

$h_{corr}(1)$  – altitud corregida inmediatamente después del respectivo punto de ruta  $d$  [m sobre el nivel del mar].

$d$  – distancia acumulativa recorrida hasta el punto de ruta discreto  $d$  [m].

$d_0$  – distancia acumulativa recorrida hasta la medición inmediatamente antes del respectivo punto de ruta  $d$  [m].

$d_i$  – distancia acumulativa recorrida hasta la edición inmediatamente después del respectivo punto de ruta  $d$  [m].

Con los datos de altitud obtenidos, se procede a realizar la primera ronda de suavización, siendo  $d_a$  y  $d_e$  los puntos primero y último de la ruta respectivamente. La primera ronda de suavización se aplica de la siguiente manera:

$$road_{grade,1}(d) = \frac{h_{int}(d+200m) - h_{int}(d_a)}{(d+200m)} \quad para \quad d \leq 200 \text{ m} \quad (13)$$

$$road_{grade,1}(d) = \frac{h_{int}(d+200m) - h_{int}(d-200m)}{(d+200m) - (d-200m)} \quad para \quad 200m < d < (d_e - 200m) \quad (14)$$

$$road_{grade,1}(d) = \frac{h_{int}(d_e) - h_{int}(d-200m)}{d_e - (d-200m)} \quad para \quad d \geq (d_e - 200m) \quad (15)$$

$$h_{int,sm,1}(d) = h_{int,sm,1}(d - 1m) + road_{grade,1}(d), \quad d = d_a + 1 + a + d_e \quad (16)$$

$$h_{int,sm,1}(d_a) = h_{int}(d_a) + road_{grade,1}(d_a) \quad (17)$$

Donde:

$road_{grade,1}(d)$  – pendiente de la carretera suavizada en el punto de ruta discreto considerado tras la primera ronda de suavizado [m/m].

$h_{int}(d)$  – altitud interpolada en el punto de ruta discreto considerado  $d$  [m sobre el nivel del mar].

$h_{int,sm,1}(d)$  – altitud interpolada suavizada, tras la primera ronda de suavizado en el punto de ruta discreto considerado  $dd$  [m sobre el nivel del mar].

$d$  – distancia acumulativa recorrida en el punto de ruta discreto considerado [m].

$d_a$  – punto de ruta de referencia a una distancia de 0 metros [m].

$d_e$  – distancia acumulativa recorrida hasta el último punto de ruta discreto [m].

Se realiza una segunda ronda de suavización, donde:

$$road_{grade,2}(d) = \frac{h_{int,sm,1}(d+200m) - h_{int,sm,1}(d_a)}{(d+200m)} \text{ para } d \leq 200m \quad (18)$$

$$road_{grade,2}(d) = \frac{h_{int,sm,1}(d+200m) - h_{int,sm,1}(d-200m)}{(d+200m) - (d-200m)} \text{ para } 200m < d < (d_e - 200m) \quad (19)$$

$$road_{grade,2}(d) = \frac{h_{int,sm,1}(d_e) - h_{int,sm,1}(d-200m)}{d_e - (d-200m)} \text{ para } d \geq (d_e - 200m) \quad (20)$$

Donde:

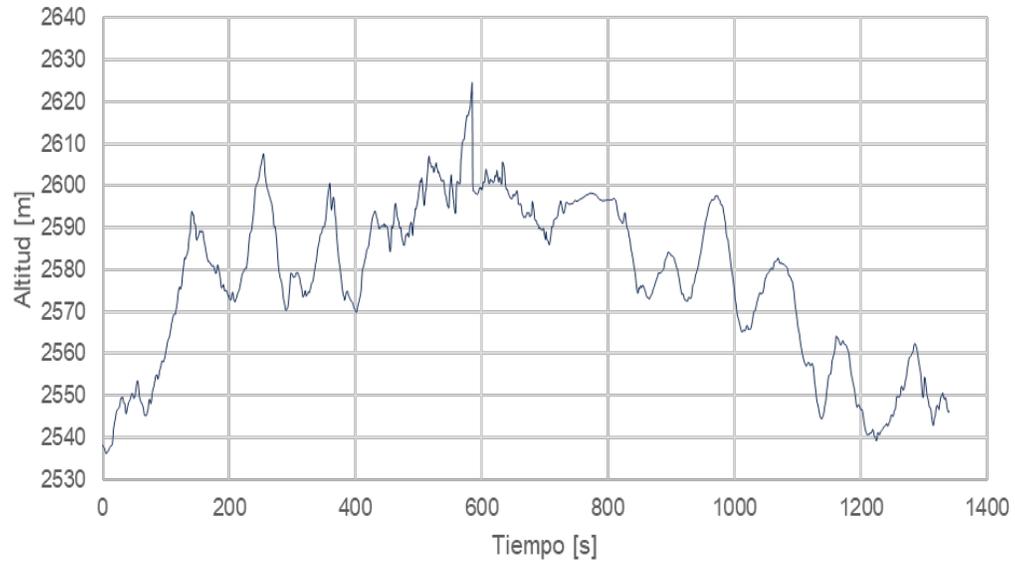
$road_{grade,2}$  – pendiente de la carretera suavizada en el punto de la ruta discreto considerado tras la segunda ronda de suavizado [m/m].

$h_{int,sm,1}$  – altitud interpolada suavizada, tras la primera ronda de suavizado en el punto de ruta discreto  $dd$  [m sobre el nivel del mar].

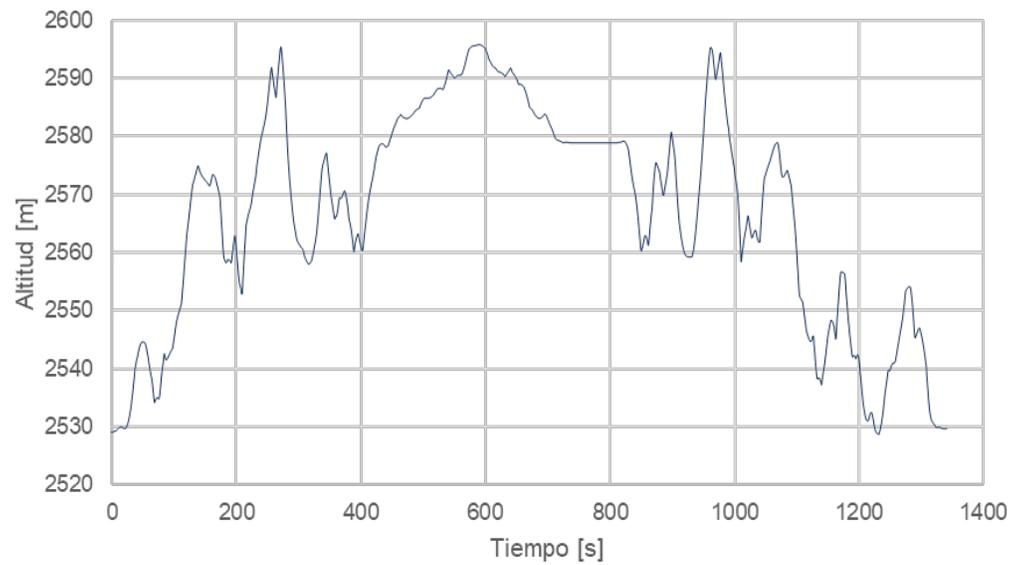
$d$  – distancia acumulativa recorrida en el punto de ruta discreto considerado [m].

$d_a$  – punto de ruta de referencia a una distancia de 0 metros [m].

$d_e$  – distancia acumulativa recorrida hasta el último punto de ruta discreto [m].



*Figura 17. Altitud GPS VBOX Sport.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).*



*Figura 18. Altitud GPS Visualizer.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).*

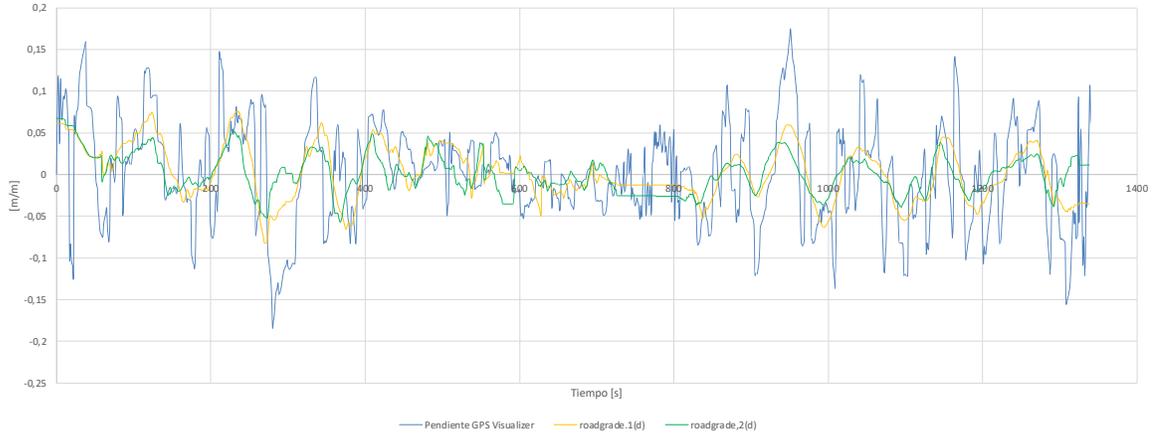


Figura 19. Suavización de pendiente.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

### Dinámica vehicular

Mediante un análisis de dinámica vehicular, se realiza el estudio de las principales fuerzas externas que ejercen sobre el vehículo cuando se encuentra en movimiento, las mismas que son fuerzas gravitatorias, de arrastre aerodinámico longitudinales y de resistencia de rodadura en las ruedas (Agudelo , Moreno , & Perez , 2010).

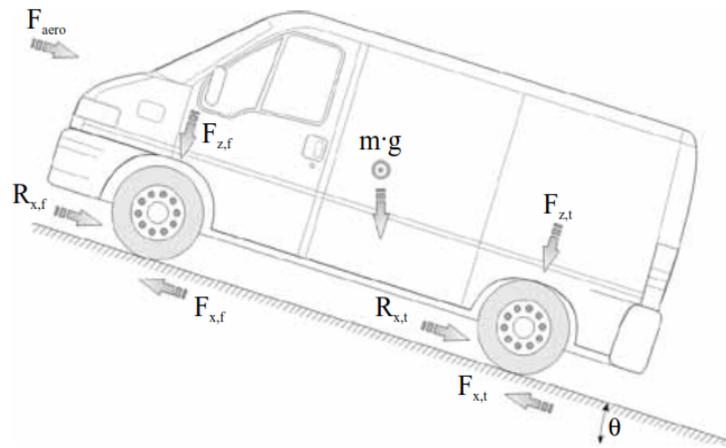


Figura 20. Fuerzas externas que actúan sobre el vehículo.  
Fuente: (Agudelo , Moreno , & Perez , 2010).

El análisis de dinámica vehicular se realizó de la siguiente manera:

$$F_x = F_d + R_x + R_g + R_i \quad (21)$$

Donde:

$F_x$  – Fuerzas en las ruedas [N].

$F_d$  – Fuerza de arrastre [N].

$R_x$  – Resistencia a la rodadura [N].

$R_g$  – Resistencia a la pendiente [N].

$R_i$  – Resistencia a la inercia [N].

Para el cálculo de las fórmulas complementarias, se define de la siguiente manera:

$$F_d = \frac{1}{2} * C_d * \rho_{aire} * A_f * v^2 \quad (22)$$

Donde:

$C_d$  – Coeficiente de arrastre [-].

$\rho_a$  – Densidad del aire [Kg/m<sup>3</sup>].

$A_f$  – Área frontal [m<sup>2</sup>].

$v$  – Velocidad [m/s].

$$R_x = f_r * m * g * \cos\theta \quad (23)$$

Donde:

$f_r$  – Coeficiente de resistencia a la rodadura [-].

$m$  – masa [Kg].

$g$  – gravedad [m/s<sup>2</sup>].

$\theta$  – pendiente [°].

$$R_g = m * a * \sin\theta \quad (24)$$

Donde:

$m$  – masa [Kg].

$a$  – aceleración [m/s<sup>2</sup>].

$\theta$  – pendiente [°].

$$R_i = m * a \quad (25)$$

Donde:

$m$  – masa [Kg].

$a$  – aceleración [m/s<sup>2</sup>].

Una vez calculada todas las fuerzas que se aplican en el vehículo en movimiento, se procedió a calcular la potencia y energía generada por el vehículo, de la siguiente manera:

$$P_x = F_x * v \quad (26)$$

$$E = P_w * \Delta t \quad (27)$$

Donde:

$P_w$  – Potencia [kW].

$E$  – Energía consumida [kWh]

$\Delta t$  – Diferencial de tiempo ( $t_{i-1} - t_i$ ) [s].

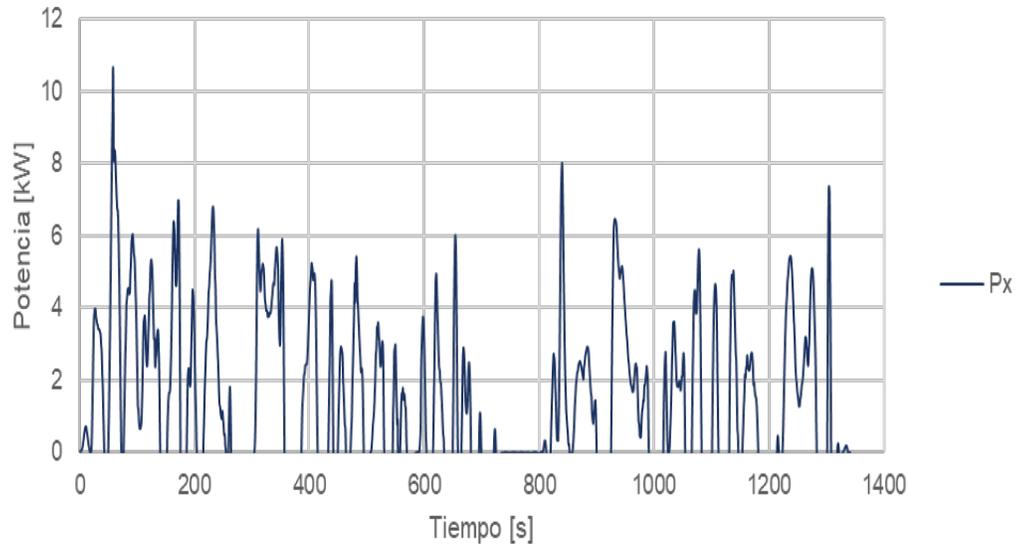


Figura 21. Potencia generada.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

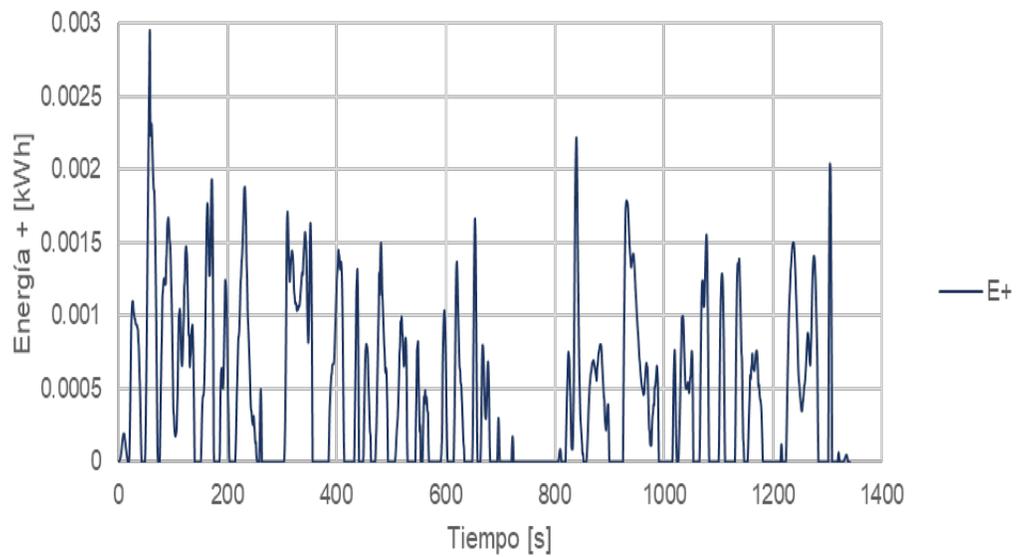


Figura 22. Energía demandada.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

## Factor de emisión

Los medios de transporte generan gases de efecto invernadero directos como el CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> y N<sub>2</sub>O, así como también produce varios gases como es la materia particulada PM<sub>10</sub> y PM<sub>2,5</sub>, CO y NO<sub>x</sub>. La estimación de emisiones en los medios de transporte terrestre se puede realizar a partir del combustible consumido o la distancia recorrida por los vehículos (IPCC, 2006).

Los factores de emisiones utilizados son los presentados en las siguientes tablas:

*Tabla 5. Factor de emisión para vehículos a gasolina livianos de pasajeros.*

*Fuente: (US-EPA, 2008).*

Contaminante	[g/milla]	[g/Km]
CO	9.4	5.8409
NO <sub>x</sub>	0.693	0.4306
CO <sub>2</sub>	368.4	228.9137
PM <sub>10</sub>	0.0044	0.0027
PM <sub>2,5</sub>	0.0041	0.0025

Tabla 6. Factor de CH<sub>4</sub> para vehículos a gasolina livianos de pasajeros.

Fuente: (US-EPA, 2020).

Contaminante	Año	[g/milla]	Año	[g/Km]
CH <sub>4</sub>	2000	0.0175	2000	0.010874
	2001	0.0105	2001	0.006524
	2002	0.0102	2002	0.006338
	2003	0.0095	2003	0.005903
	2004	0.0078	2004	0.004847
	2005	0.0075	2005	0.00466
	2006	0.0076	2006	0.004722
	2007	0.0072	2007	0.004474
	2008	0.0072	2008	0.004474
	2009	0.0071	2009	0.004412
	2010	0.0071	2010	0.004412
	2011	0.0071	2011	0.004412
	2012	0.0071	2012	0.004412
	2013	0.0071	2013	0.004412
	2014	0.0071	2014	0.004412
	2015	0.0068	2015	0.004225
	2016	0.0065	2016	0.004039
	2017	0.0054	2017	0.003355
	2018	0.0052	2018	0.003231

Tabla 7. Factor de N<sub>2</sub>O para vehículos a gasolina livianos de pasajeros.

Fuente: (US-EPA, 2020).

Contaminante	Año	[g/milla]	Año	[g/Km]
N <sub>2</sub> O	2000	0.0175	2000	0.010874
	2001	0.0212	2001	0.013173
	2002	0.0207	2002	0.012862
	2003	0.0181	2003	0.011247
	2004	0.0085	2004	0.005282
	2005	0.0067	2005	0.004163
	2006	0.0075	2006	0.00466
	2007	0.0052	2007	0.003231
	2008	0.0049	2008	0.003045
	2009	0.0046	2009	0.002858
	2010	0.0046	2010	0.002858
	2011	0.0046	2011	0.002858
	2012	0.0046	2012	0.002858
	2013	0.0046	2013	0.002858
	2014	0.0046	2014	0.002858
	2015	0.0042	2015	0.00261
	2016	0.0038	2016	0.002361
	2017	0.0018	2017	0.001118
2018	0.0016	2018	0.000994	

En Ecuador, al sur del país se cuenta con la Central Termoeléctrica El Descanso perteneciente a la empresa ELECAUSTRO S.A., misma que genera 19,2 MW de energía eléctrica para el austro ecuatoriano, misma que cuenta con cuatro grupos de combustión interna con una potencia nominal de 4,8 MW cada uno (ELECAUSTRO S.A., 2022).

En Ecuador, la producción de energía en el año 2022 fue de 28.870 GWh, de los cuales el 84,91% fue producida por hidroeléctricas, 12,35% por termoeléctricas, 1,61% por interconexión y 1,13% por generación no convencional (CENACE, 2022).

Tabla 8. Factor de emisiones contaminantes de una termoeléctrica de Fuel Oil.

Fuente: (Alvarez, Coello, López , & Ordoñez, 2018).

Contaminante	[g/GJ]	[g/kWh]
CO	100	0.3600
NO <sub>x</sub>	1150	4.1400
CO <sub>2</sub>	76000	273.5978
PM <sub>10</sub>	3	0.0108
PM <sub>2,5</sub>	3	0.0108
N <sub>2</sub> O	1.75	0.0063
CH <sub>4</sub>	3	0.0108

## Resultados

Una vez realizado el análisis de datos de cada medio de transporte en las diferentes rutas pre establecidas, se puede determinar la factibilidad que tiene el utilizar como medio de transporte alternativo y sostenible la bicicleta eléctrica y el vehículo eléctrico en una ciudad intermedia, es por eso que se presentan a continuación los resultados obtenidos de consumo energético, emisiones contaminantes, tiempo y costos generados por cada medio de transporte en cada ruta.

### Consumo energético

La energía requerida por cada medio de transporte es analizada a partir de la dinámica vehicular, dado como resultados la energía consumida por cada medio de transporte en cada ruta pre establecida, dando como resultados positivos para la movilidad eléctrica ya que el consumo energético es menor al presentado por un vehículo de combustión interna.

Tabla 9. Energía requerida [kWh] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

Energía consumida [kWh]					
RUTA 1		RUTA 2		RUTA 3	
Medio de Transporte	Energía [kWh]	Medio de Transporte	Energía [kWh]	Medio de Transporte	Energía [kWh]
Bicicleta Eléctrica	0,090	Bicicleta Eléctrica	0,074	Bicicleta Eléctrica	0,070
Vehículo Eléctrico	0,626	Vehículo Eléctrico	0,528	Vehículo Eléctrico	0,652
Vehículo MCI	1,260	Vehículo MCI	0,942	Vehículo MCI	1,170
RUTA 4		RUTA 5		RUTA 6	
Medio de Transporte	Energía [kWh]	Medio de Transporte	Energía [kWh]	Medio de Transporte	Energía [kWh]
Bicicleta Eléctrica	0,079	Bicicleta Eléctrica	0,124	Bicicleta Eléctrica	0,060
Vehículo Eléctrico	0,707	Vehículo Eléctrico	0,789	Vehículo Eléctrico	0,655
Vehículo MCI	1,030	Vehículo MCI	1,005	Vehículo MCI	0,943

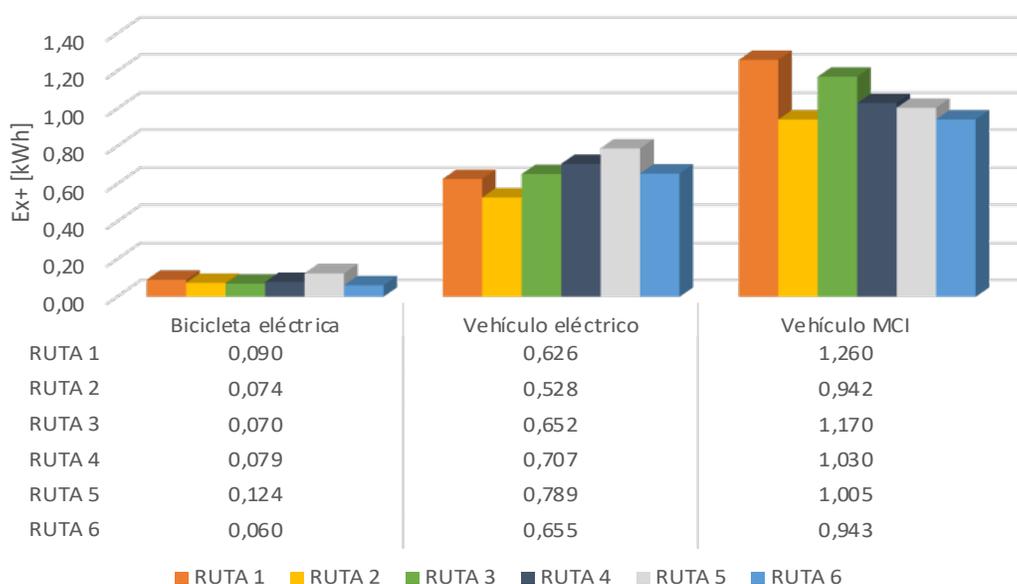


Figura 23. Energía requerida [kWh] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

## Emisiones contaminantes

En el estudio realizado se analizó los principales contaminantes nocivos para la salud y el medio ambiente; entendiendo que los medios de transporte son una de las principales fuentes de emisiones contaminantes. De esta manera se puede demostrar que el vehículo eléctrico y la bicicleta eléctrica son amigables con el medio ambiente ya que sus emisiones contaminantes son menores a las emisiones contaminantes producidas por el vehículo a combustión interna.

Tabla 10. Emisiones contaminantes [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

<b>Emisiones Contaminantes [g]</b>							
<b>RUTA 1</b>							
<b>Medio de Transporte</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>CO2</b>	<b>PM10</b>	<b>PM2,5</b>	<b>N2O</b>	<b>CH4</b>
Bicicleta Eléctrica	0,033	0,377	24,939	0,001	0,001	0,001	0,001
Vehículo Eléctrico	0,225	2,593	171,336	0,007	0,007	0,004	0,007
Vehículo MCI	75,138	5,539	2944,761	0,035	0,032	0,036	0,055
<b>RUTA 2</b>							
<b>Medio de Transporte</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>CO2</b>	<b>PM10</b>	<b>PM2,5</b>	<b>N2O</b>	<b>CH4</b>
Bicicleta Eléctrica	0,027	0,305	20,160	0,001	0,001	0,000	0,001
Vehículo Eléctrico	0,190	2,187	144,511	0,006	0,006	0,003	0,006
Vehículo MCI	79,432	5,856	3113,057	0,037	0,034	0,049	0,061
<b>RUTA 3</b>							
<b>Medio de Transporte</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>CO2</b>	<b>PM10</b>	<b>PM2,5</b>	<b>N2O</b>	<b>CH4</b>
Bicicleta Eléctrica	0,025	0,288	19,048	0,001	0,001	0,000	0,001
Vehículo Eléctrico	0,235	2,700	178,413	0,007	0,007	0,004	0,007
Vehículo MCI	65,302	4,814	2559,277	0,030	0,028	0,030	0,048
<b>RUTA 4</b>							
<b>Medio de Transporte</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>CO2</b>	<b>PM10</b>	<b>PM2,5</b>	<b>N2O</b>	<b>CH4</b>
Bicicleta Eléctrica	0,028	0,320	21,131	0,001	0,001	0,000	0,001
Vehículo Eléctrico	0,254	2,925	193,303	0,008	0,008	0,004	0,008
Vehículo MCI	75,695	5,580	2966,599	0,035	0,032	0,042	0,058
<b>RUTA 5</b>							
<b>Medio de Transporte</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>CO2</b>	<b>PM10</b>	<b>PM2,5</b>	<b>N2O</b>	<b>CH4</b>
Bicicleta Eléctrica	0,045	0,513	33,914	0,001	0,001	0,001	0,001
Vehículo Eléctrico	0,284	3,265	215,750	0,009	0,009	0,005	0,009
Vehículo MCI	83,316	6,142	3265,290	0,039	0,036	0,045	0,064
<b>RUTA 6</b>							
<b>Medio de Transporte</b>	<b>CO</b>	<b>NOx</b>	<b>CO2</b>	<b>PM10</b>	<b>PM2,5</b>	<b>N2O</b>	<b>CH4</b>
Bicicleta Eléctrica	0,022	0,250	16,537	0,001	0,001	0,000	0,001
Vehículo Eléctrico	0,236	2,711	179,190	0,007	0,007	0,004	0,007
Vehículo MCI	79,031	5,826	3097,337	0,037	0,034	0,037	0,058

Tabla 11. Emisiones contaminantes [g] considerando el 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

<b>Emisiones Contaminantes [g]</b>							
<b>RUTA 1</b>							
Medio de Transporte	CO	NOx	CO2	PM10	PM2,5	N2O	CH4
Bicicleta Eléctrica	0,0040	0,047	3,080	0,00012	0,00012	0,000071	0,00012
Vehículo Eléctrico	0,028	0,320	21,160	0,00084	0,00084	0,00049	0,00084
Vehículo MCI	75,138	5,539	2944,761	0,035	0,032	0,036	0,055
<b>RUTA 2</b>							
Medio de Transporte	CO	NOx	CO2	PM10	PM2,5	N2O	CH4
Bicicleta Eléctrica	0,0033	0,038	2,490	0,00010	0,00010	0,000057	0,00010
Vehículo Eléctrico	0,023	0,270	17,847	0,00070	0,00070	0,00041	0,00070
Vehículo MCI	79,432	5,856	3113,057	0,037	0,034	0,049	0,061
<b>RUTA 3</b>							
Medio de Transporte	CO	NOx	CO2	PM10	PM2,5	N2O	CH4
Bicicleta Eléctrica	0,003	0,036	2,352	0,000093	0,000093	0,000054	0,000093
Vehículo Eléctrico	0,029	0,333	22,034	0,00087	0,00087	0,00051	0,00087
Vehículo MCI	65,302	4,814	2559,277	0,030	0,028	0,030	0,048
<b>RUTA 4</b>							
Medio de Transporte	CO	NOx	CO2	PM10	PM2,5	N2O	CH4
Bicicleta Eléctrica	0,0035	0,039	2,610	0,00010	0,00010	0,000060	0,00010
Vehículo Eléctrico	0,031	0,361	23,873	0,00094	0,00094	0,00055	0,00094
Vehículo MCI	75,695	5,580	2966,599	0,035	0,032	0,042	0,058
<b>RUTA 5</b>							
Medio de Transporte	CO	NOx	CO2	PM10	PM2,5	N2O	CH4
Bicicleta Eléctrica	0,0055	0,063	4,188	0,00017	0,00017	0,00010	0,00017
Vehículo Eléctrico	0,035	0,403	26,645	0,0011	0,0011	0,00061	0,0011
Vehículo MCI	83,316	6,142	3265,290	0,039	0,036	0,045	0,064
<b>RUTA 6</b>							
Medio de Transporte	CO	NOx	CO2	PM10	PM2,5	N2O	CH4
Bicicleta Eléctrica	0,0027	0,031	2,042	0,000081	0,000081	0,000047	0,000081
Vehículo Eléctrico	0,029	0,335	22,130	0,00087	0,00087	0,00051	0,00087
Vehículo MCI	79,031	5,826	3097,337	0,037	0,034	0,037	0,058

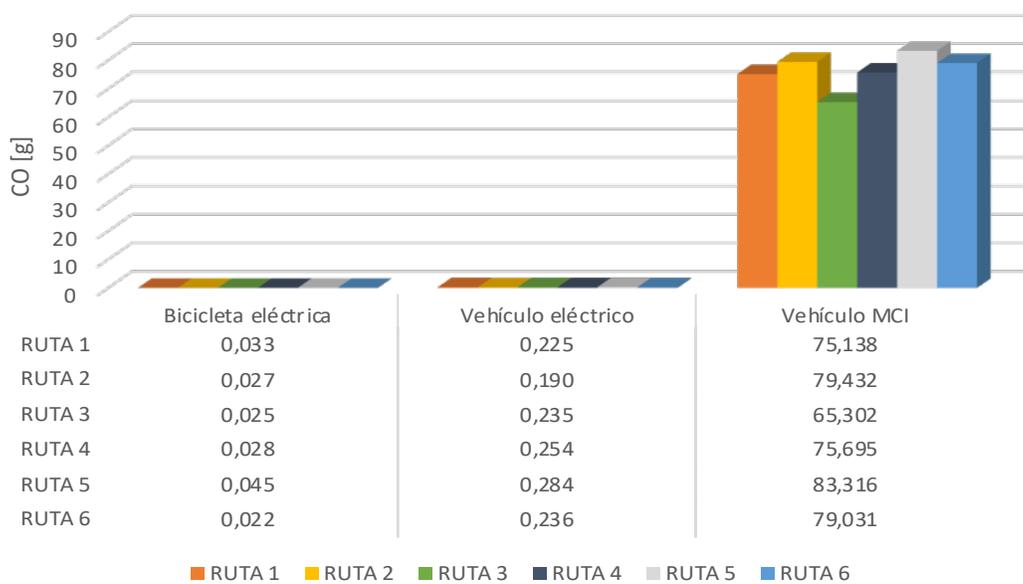


Figura 24. Emisiones de CO [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

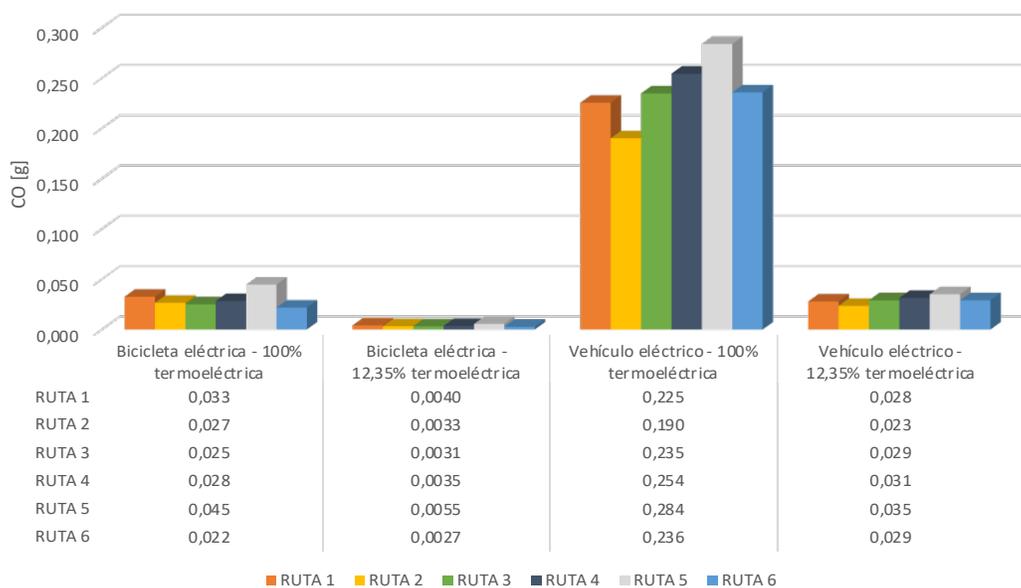


Figura 25. Comparación de emisiones de CO [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

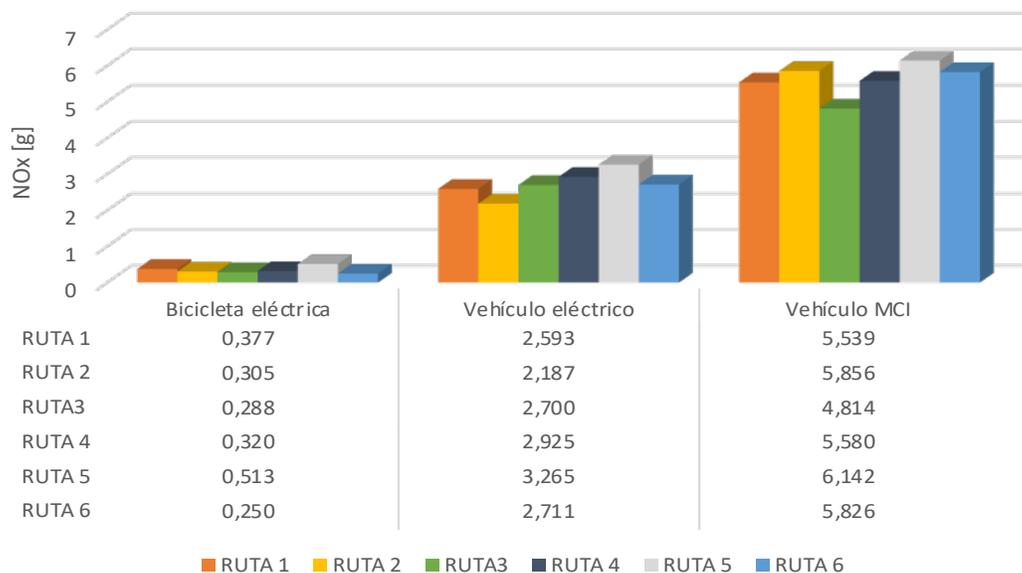


Figura 26. Emisiones de NO<sub>x</sub> [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

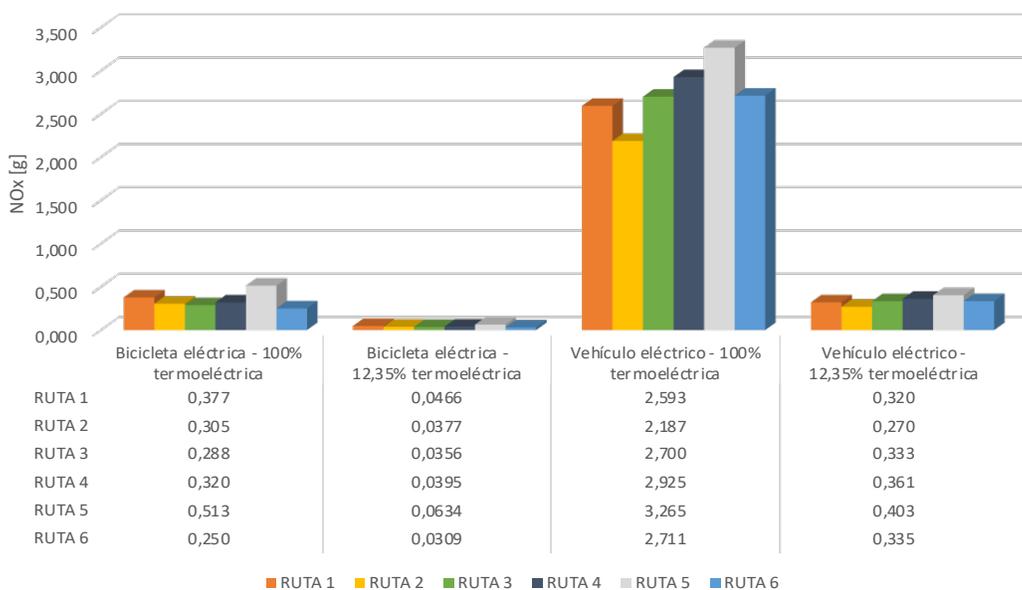


Figura 27. Comparación de emisiones de NO<sub>x</sub> [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

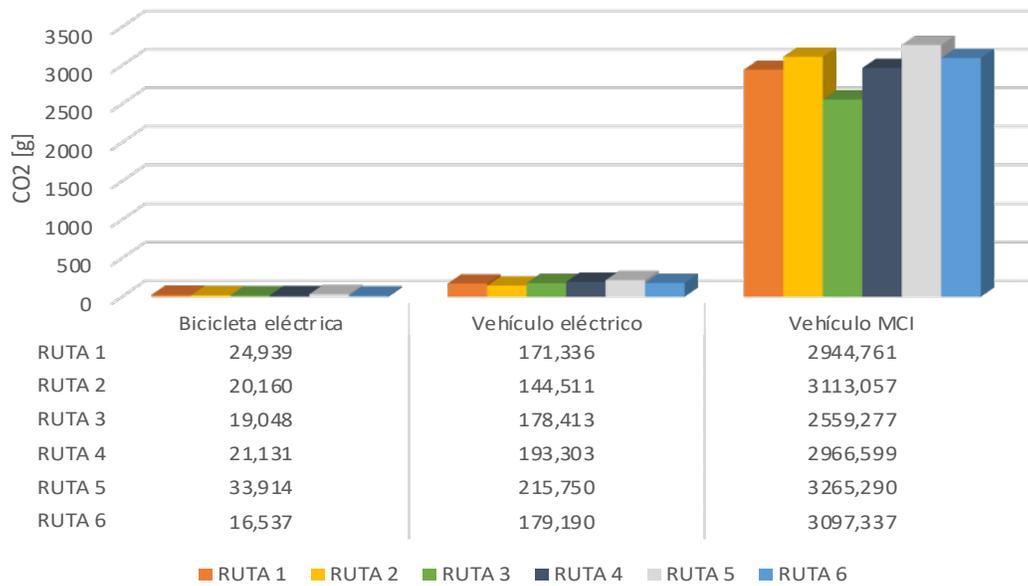


Figura 28. Emisiones de CO<sub>2</sub> [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

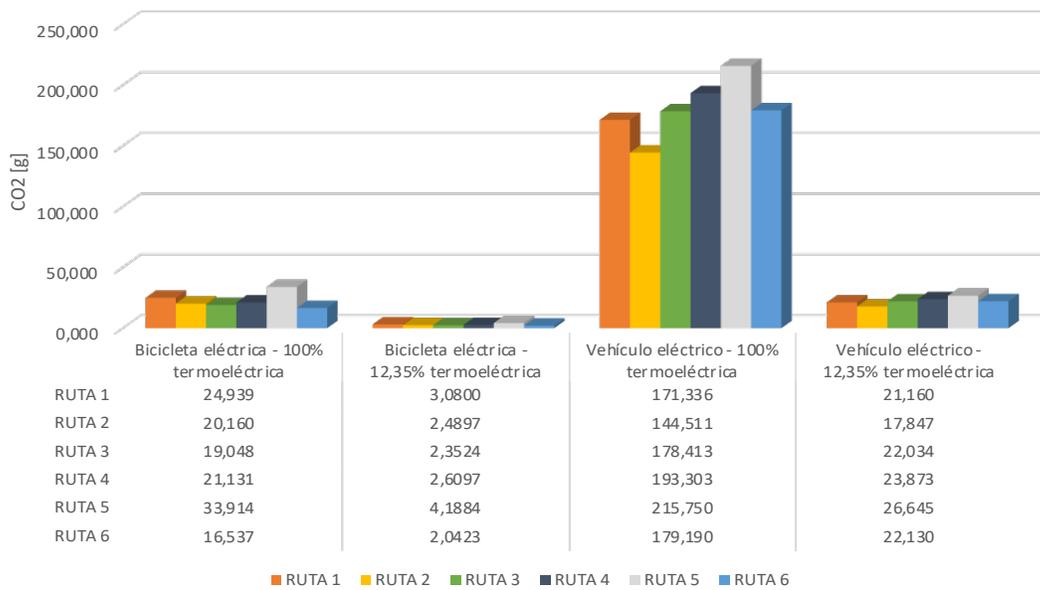


Figura 29. Comparación de emisiones de CO<sub>2</sub> [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

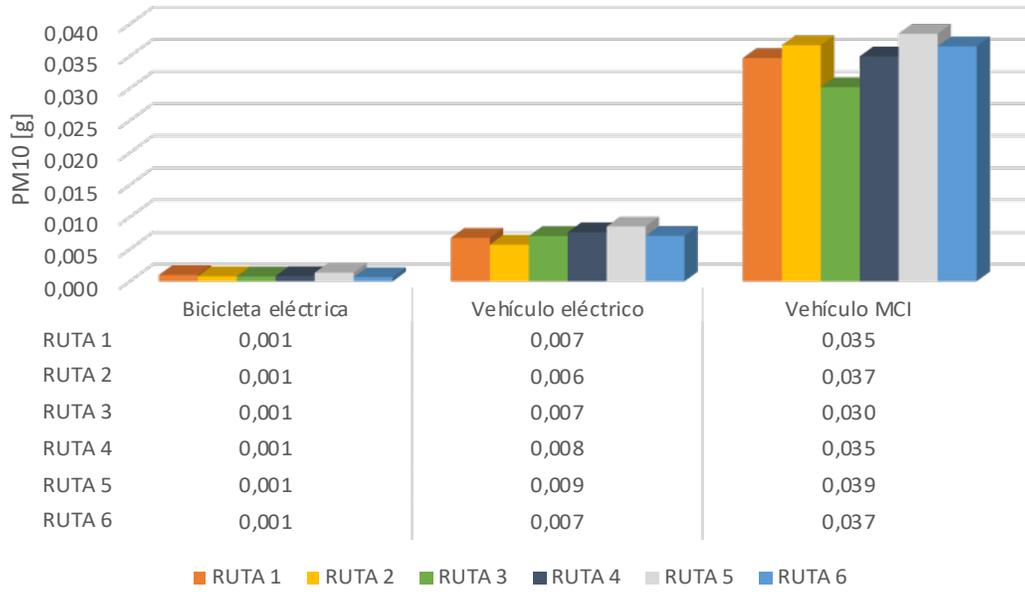


Figura 30. Emisiones de PM10 [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

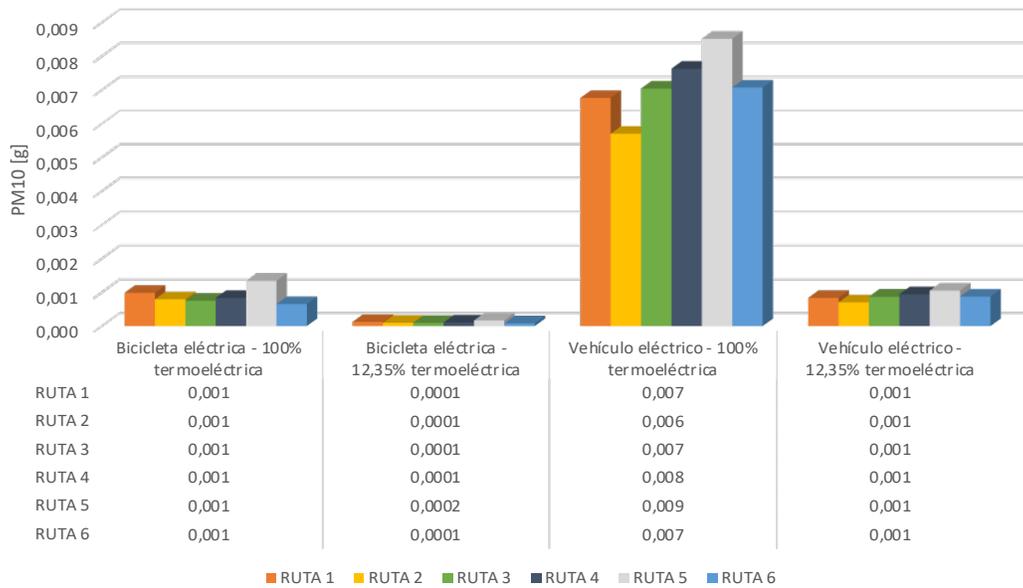


Figura 31. Comparación de emisiones de PM10 [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

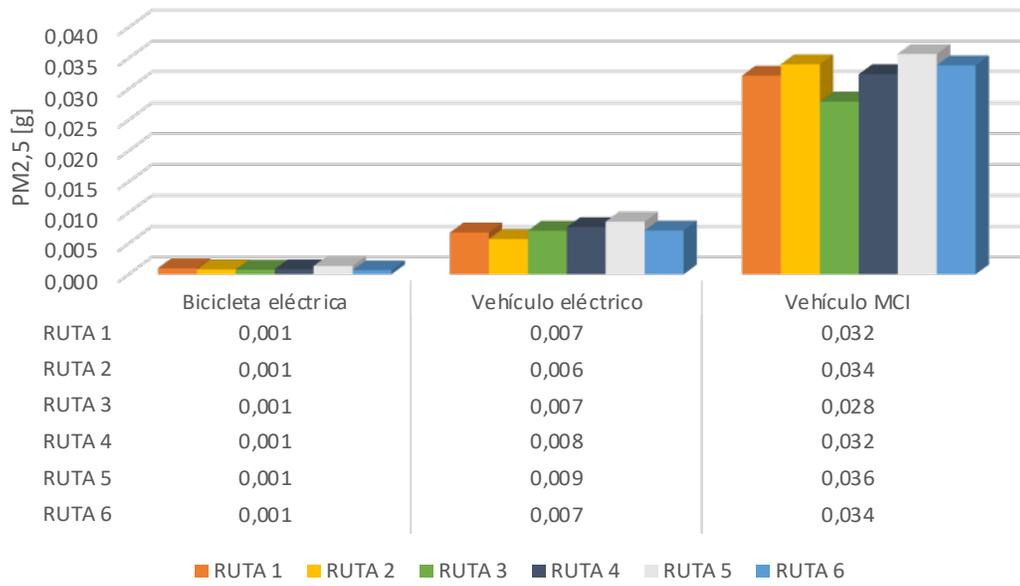


Figura 32. Emisiones de PM2,5 [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

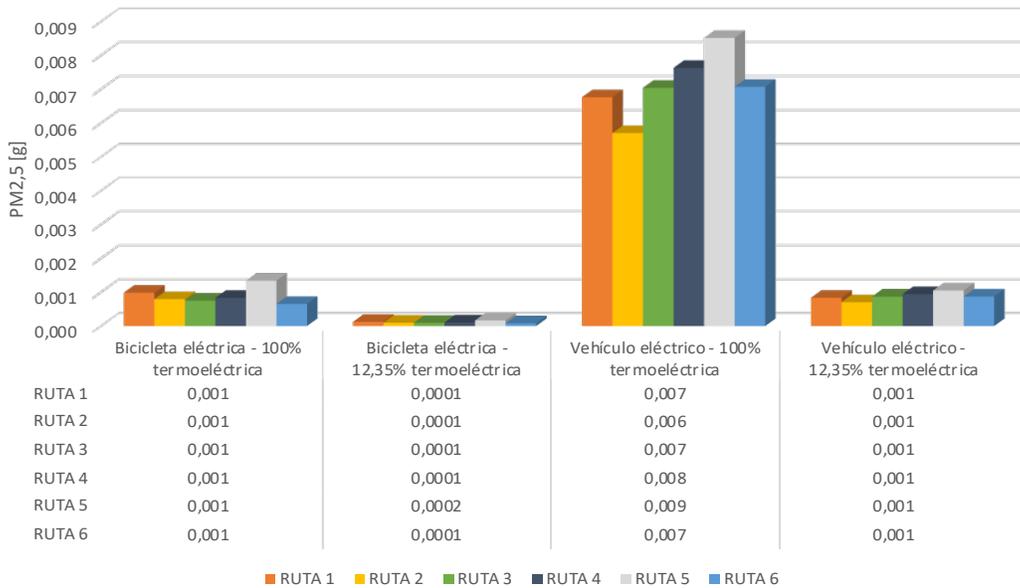


Figura 33. Comparación de emisiones de PM2,5 [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

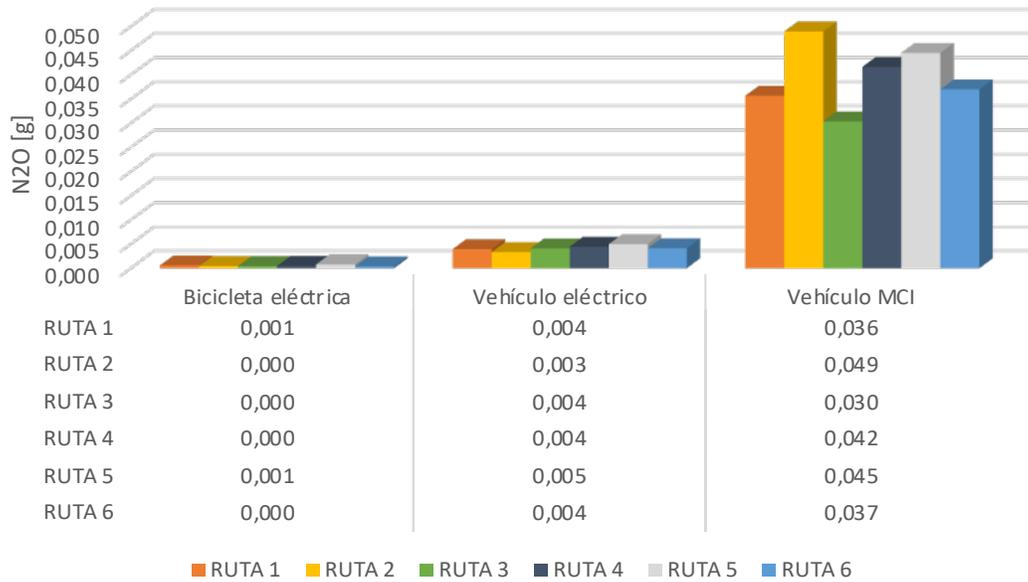


Figura 34. Emisiones de  $N_2O$  [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

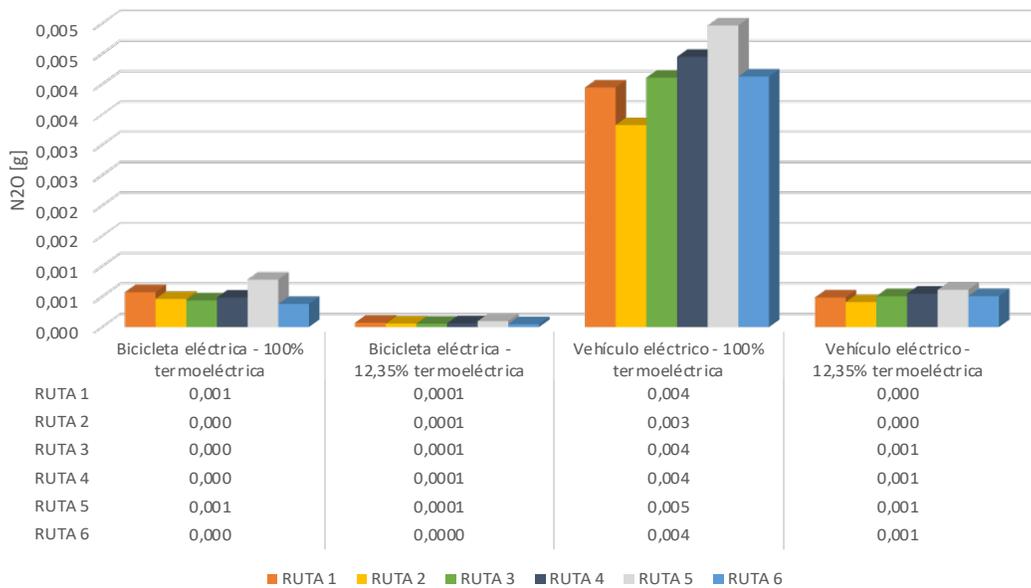


Figura 35. Comparación de emisiones de  $N_2O$  [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

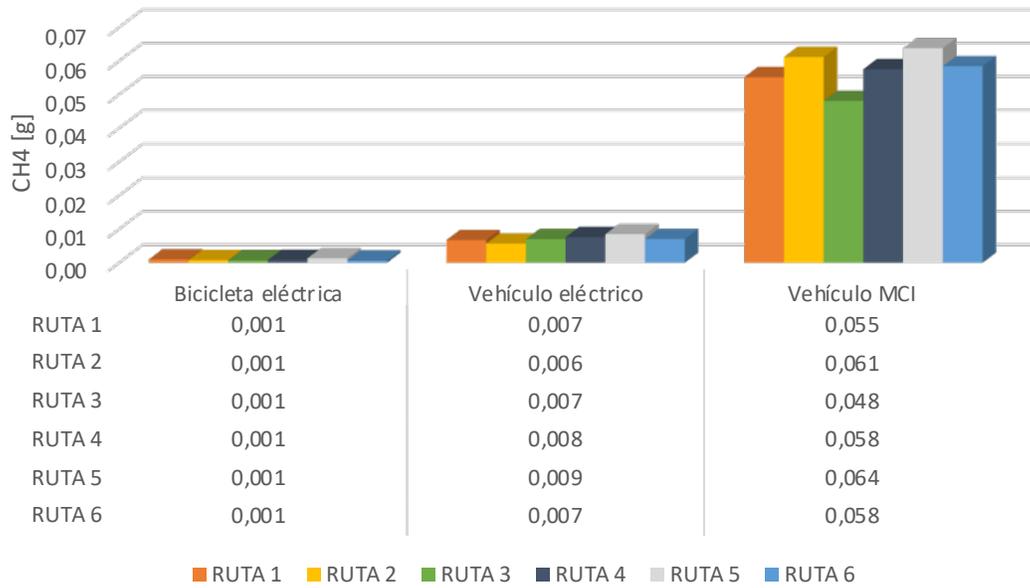


Figura 36. Emisiones de CH<sub>4</sub> [g] considerando el 100% de producción de energía en termoeléctrica para cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

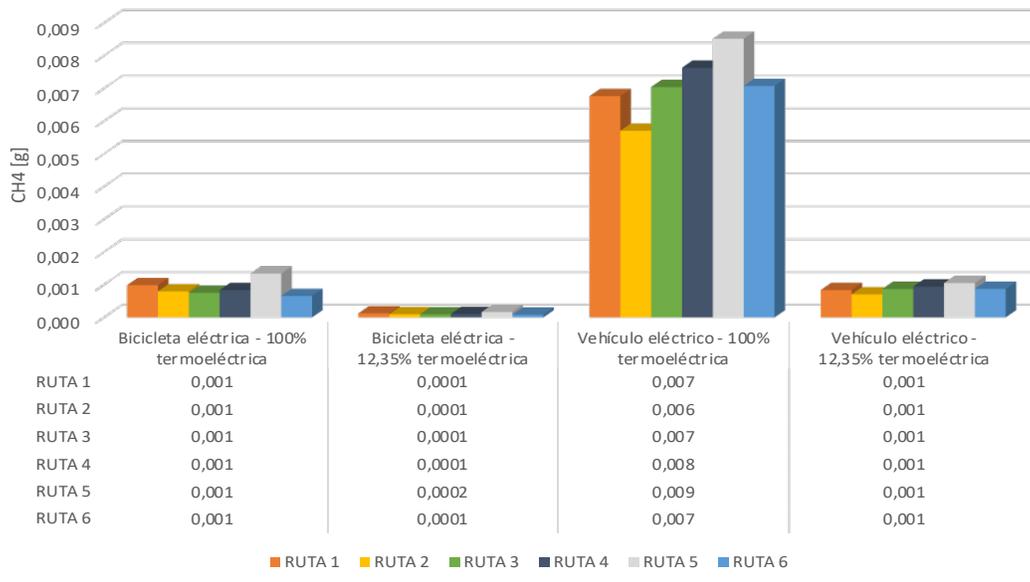


Figura 37. Comparación de emisiones de CH<sub>4</sub> [g] considerando el 100% vs 12,35% de producción de energía en termoeléctrica para los modos de transporte eléctricos en las rutas pre establecidas.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

## Tiempo

El tiempo tomado de cada medio de transporte en las diferentes rutas marca una tendencia similar tanto en el vehículo eléctrico como en el vehículo a combustión interno;

sin embargo, el tiempo que toma la bicicleta eléctrica en las diferentes rutas pre establecidas es mayor, considerando que la velocidad máxima alcanzada por este medio de transporte es de 25 km/h aproximadamente.

Tabla 12. Tiempo [min] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

RUTA 1		RUTA 2		RUTA 3	
Medio de Transporte	Tiempo [min]	Medio de Transporte	Tiempo [min]	Medio de Transporte	Tiempo [min]
Bicicleta Eléctrica	32	Bicicleta Eléctrica	36	Bicicleta Eléctrica	34
Vehículo Eléctrico	22	Vehículo Eléctrico	24	Vehículo Eléctrico	33
Vehículo MCI	20	Vehículo MCI	32	Vehículo MCI	31
RUTA 4		RUTA 5		RUTA 6	
Medio de Transporte	Tiempo [min]	Medio de Transporte	Tiempo [min]	Medio de Transporte	Tiempo [min]
Bicicleta Eléctrica	38	Bicicleta Eléctrica	43	Bicicleta Eléctrica	45
Vehículo Eléctrico	44	Vehículo Eléctrico	37	Vehículo Eléctrico	28
Vehículo MCI	44	Vehículo MCI	33	Vehículo MCI	24

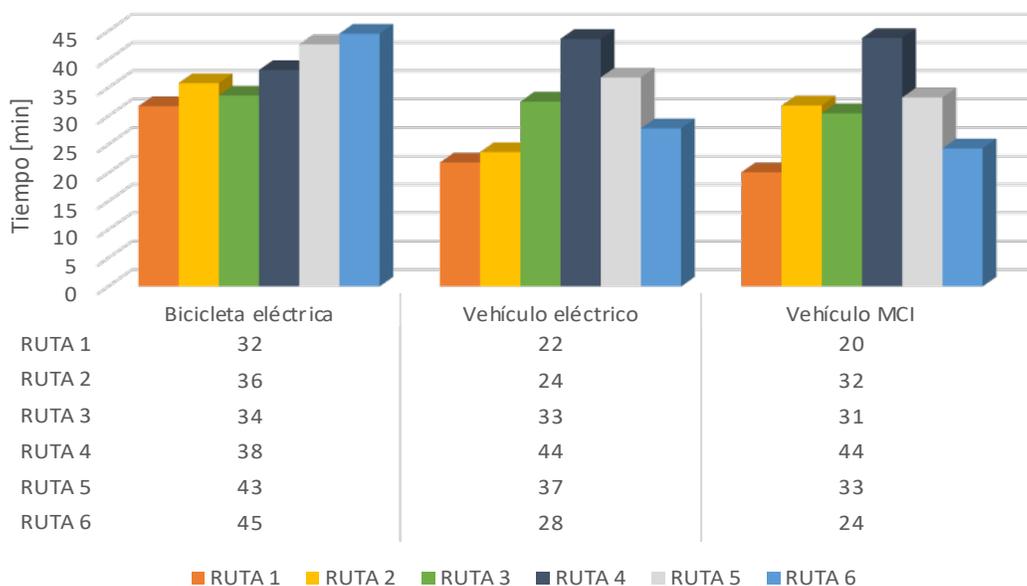


Figura 38. Tiempo [min] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

## Costo

Los costos generados por la bicicleta eléctrica y el vehículo eléctrico son menores en todas las rutas en comparación con el vehículo a combustión interna, considerando que los costos de los medios de transporte eléctricos fueron calculados por diferentes tarifas del sector eléctrico tanto residencial como comercial, mientras que los costos generados por el vehículo eléctrico fueron considerados por el valor de la gasolina Eco País en el Ecuador.

Tabla 13. Costo [USD] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.  
Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

Costos [USD]								
RUTA 1								
Medio de Transporte	Costo - Tarifa residencial / Categoría 1	Costo - Tarifa residencial / Categoría 2	Costo - Tarifa residencial / Categoría 3	Costo - Tarifa comercial / Categoría 1	Costo - Tarifa comercial / Categoría 2	Costo - Tarifa comercial / Categoría 3	Costo - Tarifa comercial / Categoría 4	Costo - Tarifa comercial / Categoría 5
Bicicleta Eléctrica	0,008	0,008	0,009	0,008	0,008	0,009	0,009	0,009
Vehículo Eléctrico	0,058	0,059	0,060	0,058	0,059	0,060	0,061	0,063
Vehículo MCI	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760	0,760
RUTA 2								
Medio de Transporte	Costo - Tarifa residencial / Categoría 1	Costo - Tarifa residencial / Categoría 2	Costo - Tarifa residencial / Categoría 3	Costo - Tarifa comercial / Categoría 1	Costo - Tarifa comercial / Categoría 2	Costo - Tarifa comercial / Categoría 3	Costo - Tarifa comercial / Categoría 4	Costo - Tarifa comercial / Categoría 5
Bicicleta Eléctrica	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007	0,007
Vehículo Eléctrico	0,049	0,050	0,051	0,049	0,050	0,051	0,052	0,053
Vehículo MCI	0,721	0,721	0,721	0,721	0,721	0,721	0,721	0,721
RUTA 3								
Medio de Transporte	Costo - Tarifa residencial / Categoría 1	Costo - Tarifa residencial / Categoría 2	Costo - Tarifa residencial / Categoría 3	Costo - Tarifa comercial / Categoría 1	Costo - Tarifa comercial / Categoría 2	Costo - Tarifa comercial / Categoría 3	Costo - Tarifa comercial / Categoría 4	Costo - Tarifa comercial / Categoría 5
Bicicleta Eléctrica	0,006	0,007	0,007	0,006	0,007	0,007	0,007	0,007
Vehículo Eléctrico	0,060	0,061	0,063	0,060	0,061	0,063	0,064	0,065
Vehículo MCI	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550	0,550
RUTA 4								
Medio de Transporte	Costo - Tarifa residencial / Categoría 1	Costo - Tarifa residencial / Categoría 2	Costo - Tarifa residencial / Categoría 3	Costo - Tarifa comercial / Categoría 1	Costo - Tarifa comercial / Categoría 2	Costo - Tarifa comercial / Categoría 3	Costo - Tarifa comercial / Categoría 4	Costo - Tarifa comercial / Categoría 5
Bicicleta Eléctrica	0,007	0,007	0,008	0,007	0,007	0,008	0,008	0,008
Vehículo Eléctrico	0,065	0,066	0,068	0,065	0,066	0,068	0,069	0,071
Vehículo MCI	0,737	0,737	0,737	0,737	0,737	0,737	0,737	0,737
RUTA 5								
Medio de Transporte	Costo - Tarifa residencial / Categoría 1	Costo - Tarifa residencial / Categoría 2	Costo - Tarifa residencial / Categoría 3	Costo - Tarifa comercial / Categoría 1	Costo - Tarifa comercial / Categoría 2	Costo - Tarifa comercial / Categoría 3	Costo - Tarifa comercial / Categoría 4	Costo - Tarifa comercial / Categoría 5
Bicicleta Eléctrica	0,011	0,012	0,012	0,011	0,012	0,012	0,012	0,012
Vehículo Eléctrico	0,073	0,074	0,076	0,073	0,074	0,076	0,077	0,079
Vehículo MCI	1,040	1,040	1,040	1,040	1,040	1,040	1,040	1,040
RUTA 6								
Medio de Transporte	Costo - Tarifa residencial / Categoría 1	Costo - Tarifa residencial / Categoría 2	Costo - Tarifa residencial / Categoría 3	Costo - Tarifa comercial / Categoría 1	Costo - Tarifa comercial / Categoría 2	Costo - Tarifa comercial / Categoría 3	Costo - Tarifa comercial / Categoría 4	Costo - Tarifa comercial / Categoría 5
Bicicleta Eléctrica	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006	0,006
Vehículo Eléctrico	0,060	0,062	0,063	0,060	0,062	0,063	0,064	0,065
Vehículo MCI	0,716	0,716	0,716	0,716	0,716	0,716	0,716	0,716

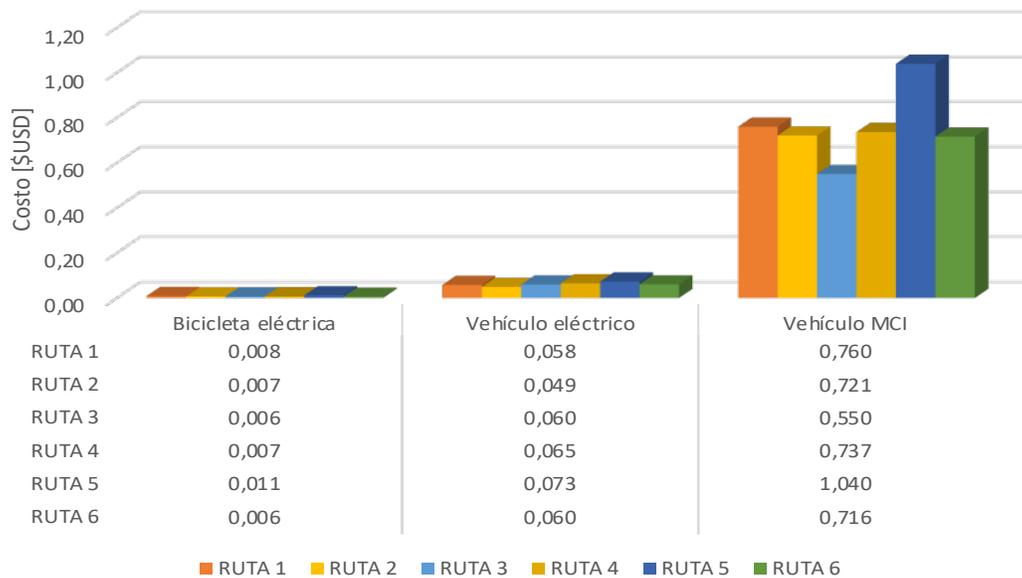


Figura 39. Costo [\$USD] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

## Conclusiones

La energía requerida por cada medio de transporte varía en función de la distancia recorrida, tipo de vehículo y condiciones de cada ruta. La bicicleta eléctrica es el modo de transporte que menor cantidad de energía requiere, con un promedio de 0,083 [kWh], el vehículo eléctrico requiere un promedio de energía de 0,659 [kWh] y el vehículo a combustión interna requiere de 1,058 [kWh] en promedio dentro de las rutas pre establecidas. Los resultados nos muestran que la bicicleta eléctrica requiere tan solo el 7,82% de energía en relación al vehículo de combustión interna mientras que el vehículo eléctrico requiere el 62,30% de energía en relación al vehículo de combustión interna, por lo que se puede decir que los modos de transporte eléctrico son una alternativa para la movilidad en una ciudad intermedia.

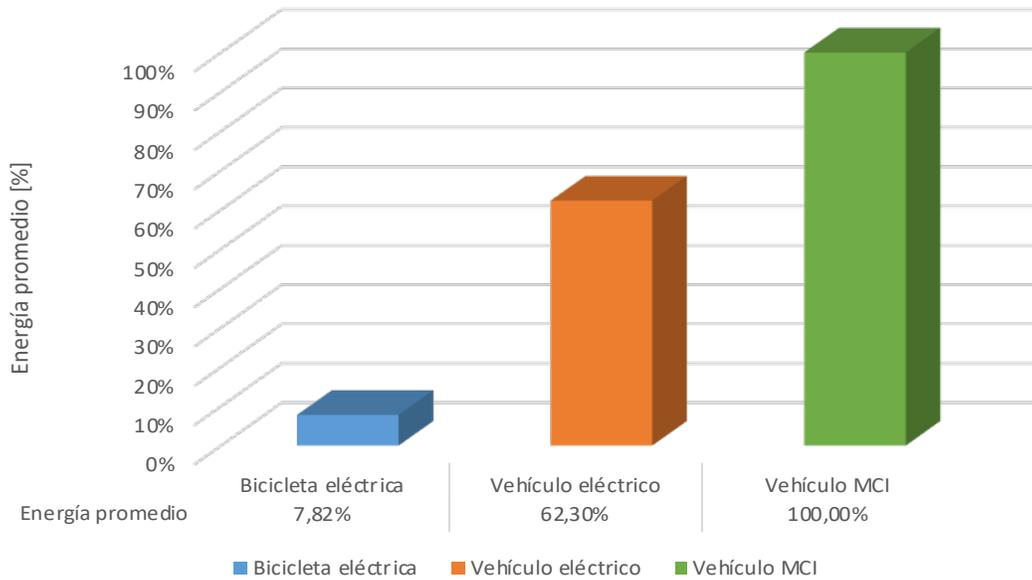


Figura 40. Energía promedio [%] de cada modo de transporte en las rutas pre establecidas.  
 Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

Con respecto a las emisiones contaminantes generadas por cada medio de transporte varía según la distancia recorrida, tipo de vehículo y condiciones de cada ruta. Los modos de transporte eléctricos emiten menos contaminantes que los vehículos a combustión interna, en el caso del CO la bicicleta eléctrica emite el 0,04% y el vehículo eléctrico emite el 0,31% de monóxido de carbono con relación al vehículo de combustión interna. Las emisiones correspondientes a NO<sub>x</sub>, la bicicleta eléctrica genera en promedio 0,34 gramos, el vehículo eléctrico 2,73 gramos y el vehículo a combustión interna 5,63 gramos, siendo así la bicicleta eléctrica el modo de transporte que menor emisiones produce de este contaminante y representando el 6,08% con respecto al vehículo a combustión interna, mientras que el vehículo eléctrico produce el 48,53% con respecto al vehículo de combustión interna. Con respecto al CO<sub>2</sub>, la bicicleta eléctrica produce en promedio 22,62 gramos lo que representa el 0,76% con respecto al vehículo de combustión interna, el vehículo eléctrico produce un promedio de 180,42 gramos lo que representa el 6,03% con respecto al vehículo de combustión interna, siendo el vehículo de combustión interna un generador de emisiones promedio dentro de las rutas pre establecidas de 2991,05 gramos de dióxido de carbono. Dentro de los contaminantes de PM10, la bicicleta eléctrica genera un promedio de 0,001 gramos, el vehículo eléctrico 0,007 gramos y el vehículo a combustión interna 0,035 gramos,

lo que indica que la bicicleta eléctrica produce el 2,53% de dicho contaminante con relación al vehículo a combustión interna y el vehículo eléctrico el 20,19%. Para los contaminantes correspondientes a PM<sub>2,5</sub> la bicicleta eléctrica y el vehículo eléctrico producen la misma cantidad en promedio que el PM<sub>10</sub> dentro de las rutas pre establecidas, mientras que el vehículo a combustión interna emite 0,033 gramos, siendo así la bicicleta eléctrica la responsable de una emisión del 2,73% con respecto al vehículo a combustión interna y el vehículo eléctrico emite el 21,80% de emisiones contaminantes de PM<sub>2,5</sub> con respecto al vehículo a combustión interna. En emisiones de N<sub>2</sub>O, la bicicleta eléctrica genera un promedio de 0,001 gramos, el vehículo eléctrico un promedio de 0,004 gramos y el vehículo a combustión interna un promedio de 0,040 gramos en las rutas pre establecidas, siendo así la bicicleta eléctrica el modo de transporte que menos emisiones emiten con el 1,31% con respecto al vehículo de combustión interna y siendo el vehículo eléctrico el responsable de emitir el 10,47% con respecto al vehículo de combustión interna. Finalmente, dentro del análisis de los gases contaminantes generados por los diferentes modos de transporte en las seis rutas pre establecidas nos encontramos con el CH<sub>4</sub>, donde la bicicleta eléctrica produce un promedio de 0,001 gramos, el vehículo eléctrico 0,007 gramos y el vehículo a combustión interna 0,057 gramos, correspondiendo a la bicicleta eléctrica el 1,56% y 12,41% al vehículo eléctrico con respecto al vehículo a combustión interna. Todo esto considerando el peor escenario, es decir, considerando que la producción de energía es 100% por fuentes termoeléctricas.

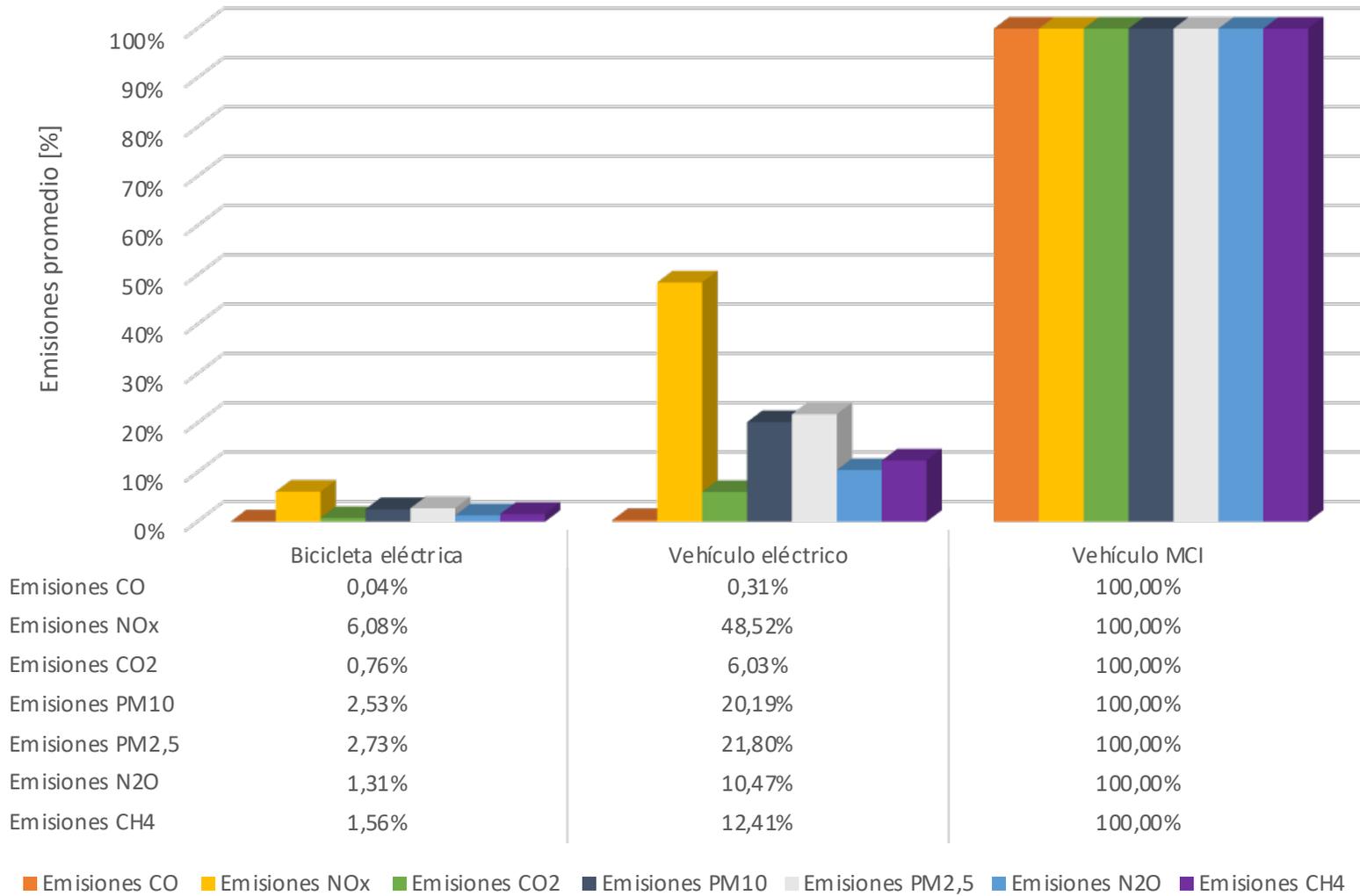


Figura 41. Promedio de emisiones contaminantes [%] producidas por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas (para modos de transporte eléctrico se considera el 100% de energía producida por termoeléctrica).

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

Considerando la producción de energía a un 12,35% mediante termoeléctricas como lo ha sido en el Ecuador hasta el año 2022, la contaminación ambiental producida por los medios de transporte eléctricos con respecto al vehículo de combustión interna es la siguiente:

- **CO:** Vehículo eléctrico 0,005%, bicicleta eléctrica 0,038%.
- **NOx:** Vehículo eléctrico 0,75%, bicicleta eléctrica 5,99%.
- **CO<sub>2</sub>:** Vehículo eléctrico 0,09%, bicicleta eléctrica 0,74%.
- **PM<sub>10</sub>:** Vehículo eléctrico 0,31%, bicicleta eléctrica 2,49%.
- **PM<sub>2,5</sub>:** Vehículo eléctrico 0,34%, bicicleta eléctrica 2,69%.
- **N<sub>2</sub>O:** Vehículo eléctrico 0,16%, bicicleta eléctrica 1,29%.
- **CH<sub>4</sub>:** Vehículo eléctrico 0,19%, bicicleta eléctrica 1,53%.

En general, se demuestra que los modos de transporte eléctricos generan menor cantidad de contaminantes con relación al vehículo de combustión interna, demostrando que los mismos brinda un menor impacto ambiental y a la salud de los habitantes.

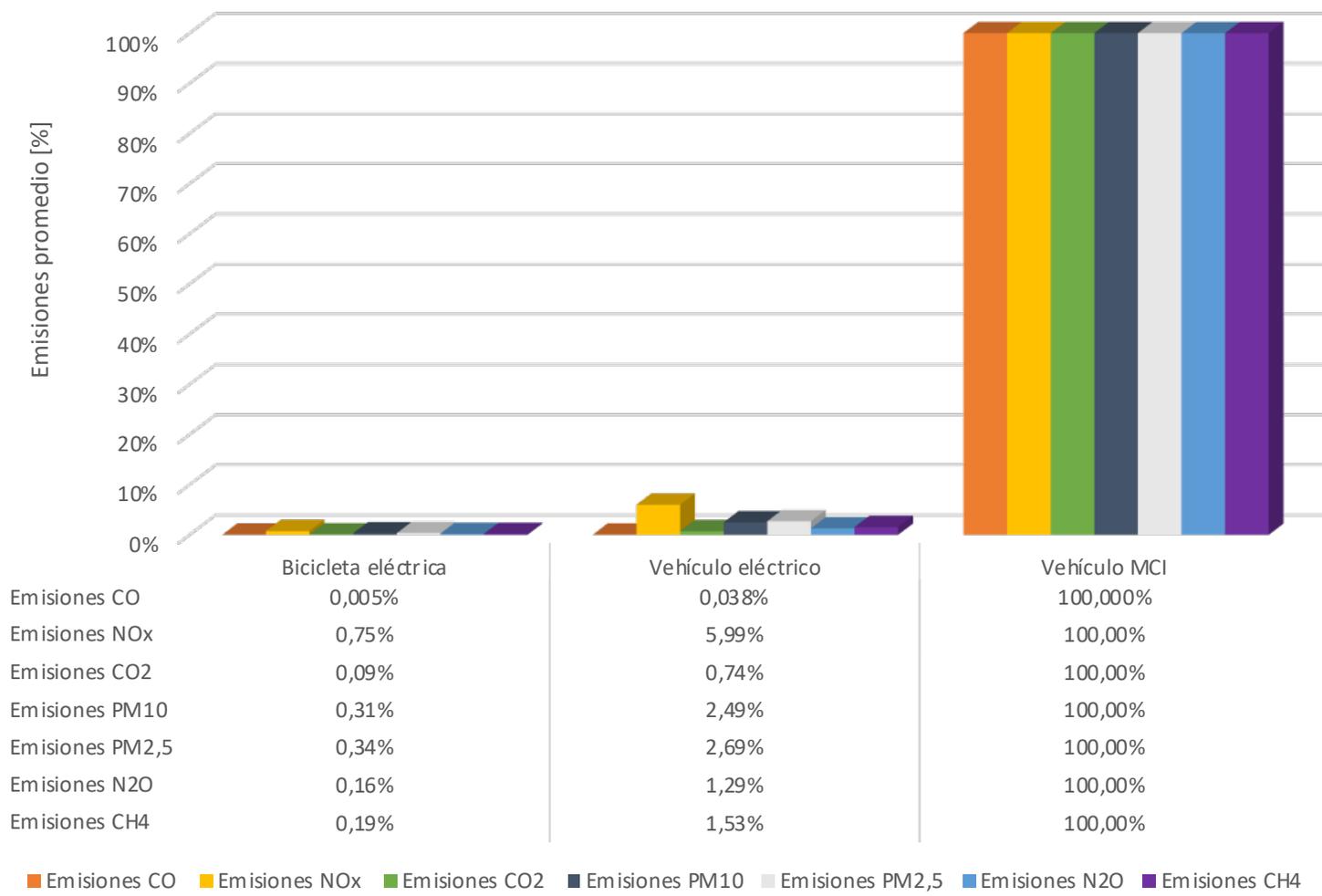


Figura 42. Promedio de emisiones contaminantes [%] producidas por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas (para modos de transporte eléctrico se considera el 12,35% de energía producida por termoeléctrica).

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

En general, se demuestra que los modos de transporte eléctricos generan menor cantidad de contaminantes con relación al vehículo de combustión interna, demostrando que los mismos brinda un menor impacto ambiental y a la salud de los habitantes.

Así mismo, el tiempo contabilizado en cada ruta pre establecida marca la misma tendencia tanto para el vehículo eléctrico como para el vehículo a combustión interna; sin embargo, la bicicleta eléctrica presenta una incremento en el tiempo de recorrido para cada ruta con excepción de la ruta 4, para este incremento de tiempo se debe considerar que la velocidad máxima alcanzada por la bicicleta eléctrica es de 25 km/h, el tiempo promedio de recorrido de la bicicleta eléctrica es de 38 minutos en las ruta pre establecidas. Dentro de una ciudad intermedia, el uso del vehículo eléctrico con un promedio de tiempo recorrido de 31 minutos y el vehículo a combustión interna recorre un promedio de 30 minutos, lo cual no afecta en los tiempos requeridos por los usuarios, por lo que se presenta como una alternativa positiva para la movilidad.

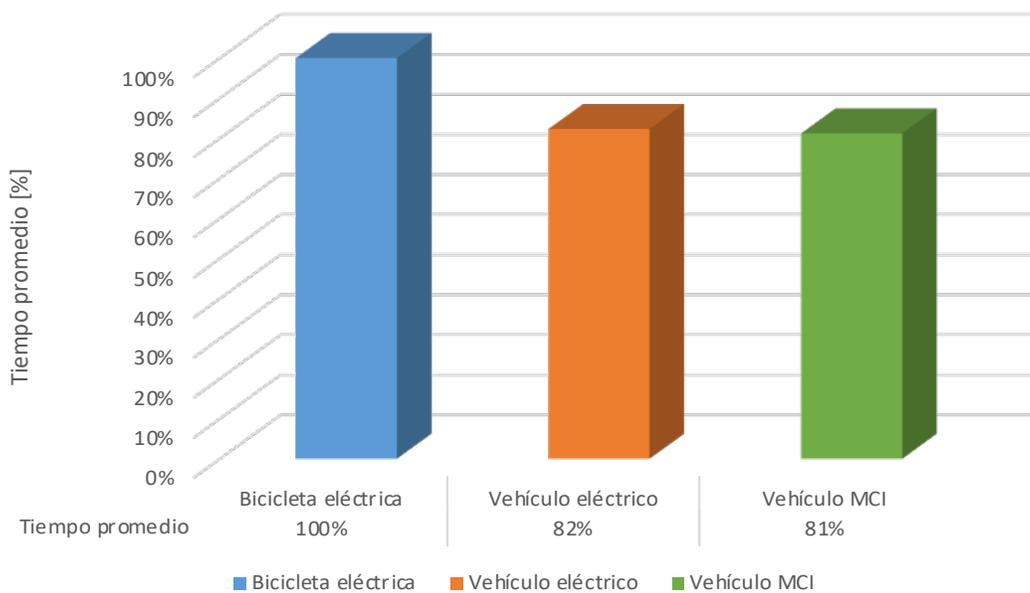


Figura 43. Promedio de tiempo [%] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

Los costos generados por cada medio de transporte en la rutas pre establecidas, varía según el tipo del vehículo, condiciones de ruta y las distancias recorridas. Dentro del análisis realizado, los costos generados para el desplazamiento de cada medio de transporte en las

rutas pre establecidas, se puede apreciar que tanto el vehículo eléctrico genera un promedio de 0,06 [USD], la bicicleta eléctrica genera un promedio de 0,008 [USD] y el vehículo a combustión interna genera un gasto promedio de 0,75 [USD], la bicicleta eléctrica requiere tan solo el 1,01% del costo y el vehículo eléctrico el 8,05% del costo con respecto al vehículo de combustión interna, siendo así los modos de transporte eléctricos los más eficientes en costos generados para los usuarios dentro de una ciudad intermedia.

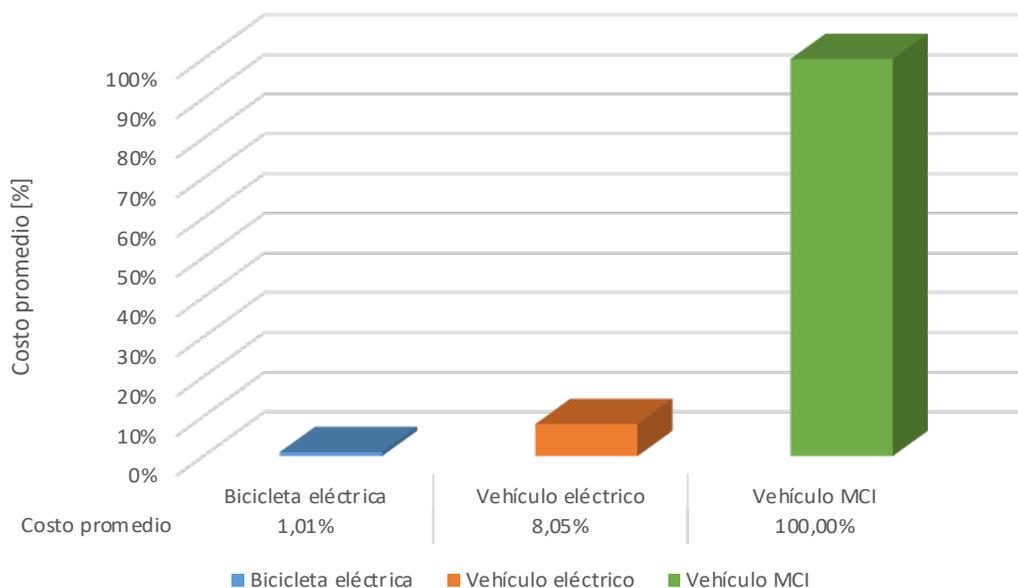


Figura 44. Promedio de costo [%] por cada medio de transporte en las rutas pre establecidas.

Fuente: (Elaboración de autor, 2023).

## Recomendaciones

En función al vehículo eléctrico, es importante considerar las características y limitaciones del mismo, ya que el vehículo eléctrico utilizado para el estudio llegaba hasta una velocidad máxima de 65 km/h.

Con respecto a la instrumentación utilizada para la obtención de datos (GPS), se recomienda utilizar un equipo que garantice la mayor precisión posible para que los datos obtenidos sean lo más cercano a la realidad posible, ya que el GPS que se usó para el estudio realizado no cumplía con esta condición.

Se recomienda continuar con el estudio con la finalidad de buscar alternativas para aportar con el cuidado del medio ambiente, por lo que sería importante realizar el estudio con el transporte público (buses urbanos) en las rutas ya pre establecidas, sabiendo así que

existiría una mayor cantidad de personas aprovechando un solo vehículo para trasladarse de un punto a otro.

Es necesario continuar con la investigación y desarrollo de movilidad eléctrica dentro de una ciudad intermedia, para así demostrar al público en general los beneficios económicos, ambientales y de salud que presentan estos medios de transporte y así hacerlos más atractivos para los consumidores.

Se recomienda realizar trabajos futuros sobre infraestructura de puntos de carga para vehículos eléctricos y bicicletas eléctricas, ya que esto es un factor importante para promover el uso de modos de transporte eléctricos, lo cual puede fomentar la inversión en el sector público y/o privado para la implementación de puntos de carga y adquisición de modos de transporte eléctricos.

Así mismo, es importante realizar un nuevo levantamiento de rutas debido a los cambios de infraestructura que se han presentado a la ciudad debido a la ejecución de proyectos como la construcción del proyecto tranvía 4 ríos y cambios en los sentidos de vías.

## **Bibliografía**

- Agencia Europea del Medio Ambiente. (2016). *Hacia una movilidad limpia e inteligente*. Luxemburgo: AEMA.
- Agudelo , J., Moreno , R., & Perez , J. F. (Febrero de 2010). Desempeño dinámico y energético de un autobús operando con gas natural vehicular. Medellín, Colombia: Universidad de Antioquia.
- Alcaldía de Cuenca. (2015a). *Plan de movilidad y espacios públicos*. Cuenca: Alcaldía de Cuenca.
- Alvarez, G., Coello, M., López , A., & Ordoñez, S. (26 de Julio de 2018). Evaluation of the electric bicycle as an alternative mobility in the city of Cuenca, Ecuador. 476-485. Paris, Francia: IEOM Society International.
- BBVA. (31 de Mayo de 2021). *BBVA*. Obtenido de <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/todo-lo-que-debes-saber-antes-de-comprar-una-bicicleta-electrica/>
- Carlier, M. (15 de Mayo de 2023). *Statista*. Obtenido de <https://www.statista.com/statistics/270603/worldwide-number-of-hybrid-and-electric-vehicles-since-2009/>
- CENACE. (2022). *Informe Anual 2022*. CENACE Operador Nacional de Electricidad.
- Colegio de Ingenieros de Caminos, C. y. (2010). *Libro Verde del Transporte y Cambio Climático* . Madrid: Cyan, Proyectos Editoriales, S.A.
- Comisión de Transporte . (s.f.). *Libro Verde del Transporte y Cambio Climático* .
- Diario Oficial de la Unión Europea. (2016). *REGLAMENTO (UE) 2016/646 DE LA COMISIÓN de 20 de abril de 2016*. L 109/1.
- Dirección de Regulación Económica y Tarifas del Sector Eléctrico. (2022). *Pliego Tarifario del Servicio Público de Energía Eléctrica Año 2022. Resolución Nro: ARCERNNR-009/2022*. Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables.
- Díaz , W. (11 de Mayo de 1998). Obtenido de <https://www.uv.es/diaz/mn/node40.html>
- ELECAUSTRO S.A. (2022). *ELECAUSTRO*. Obtenido de <https://www.elecaustro.gob.ec/generando-energia/>
- EMOV EP. (14 de Diciembre de 2021). *EMOV EP*. Obtenido de <https://www.emov.gob.ec/2021/12/14/mas-de-91-mil-vehiculos-matriculados-a-un-mes-de-finalizar-el-ano/#:~:text=En%20el%202020%20se%20registr%C3%B3,con%20la%20Revisi%C3%B3n%20T%C3%A9cnica%20Vehicular.>
- EMOV EP. (2020). *Informe calidad del aire*. Cuenca: Alcaldía de Cuenca.
- EMOV EP. (2014). *Inventario de Emisiones Atmosféricas del Cantón Cuenca*. Cuenca: Ilustre Municipalidad de Cuenca.

- Estevan, A., & Sanz, A. (1996). *Hacia la reconversión ecológica del transporte en España*. Bilbao: Bakaz.
- GPS Visualizer . (2019). *GPS Visualizer* . Obtenido de GPS Visualizer : [https://www.gpsvisualizer.com/convert\\_input](https://www.gpsvisualizer.com/convert_input)
- Galindo , J., & Meneses , D. (2017). *Servicio de Alquiler de Bicicletas Eléctricas*. Bogotá: Universidad Externado de Colombia.
- Global Petrol Prices. (07 de Agosto de 2023). *GlobalPetrolPrices.com*. Obtenido de [https://www.globalpetrolprices.com/gasoline\\_prices/](https://www.globalpetrolprices.com/gasoline_prices/)
- Guillamón, D., & Hoyos, D. (sf). *Movilidad Sostenible de la Teoría a la Práctica*. MANU ROBLES-ARANGIZ INSTITUTUA.
- IPCC. (2008). *Cambio climático 2007*. Ginebra, Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies.
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (03 de Octubre de 2023). *Instituto Nacional de Estadísticas y Censos*. Obtenido de [https://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/el-nuevo-rostro-de-azuay/#:~:text=Cuenca%2C%20Ecuador%20\(03%20de%20octubre,281.823%20\(47%2C3%25\)](https://www.ecuadorencifras.gob.ec/institucional/el-nuevo-rostro-de-azuay/#:~:text=Cuenca%2C%20Ecuador%20(03%20de%20octubre,281.823%20(47%2C3%25)).
- López , G., & Galarza, S. (2016). *Movilidad Eléctrica: Oportunidades para Latinoamérica*. ONU - EUROCLIMA.
- Mañez Gomis, G., Bermúdez From, E., & Araya Salas, M. (2018). *Movilidad Eléctrica: Avances en América Latina y El Caribe y Oportunidades para la Colaboración Regional*. Ciudad del Saber, Clayton, Panamá: Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (ONU Medio Ambiente).
- Ministerio de Energía y Minas. (10 de Mayo de 2022). *Gobierno del Ecuador*. Obtenido de <https://www.rekursyenergia.gob.ec/las-tarifas-de-energia-electrica-no-se-incrementaran-en-el-2022/>
- Ministerio de Energía y Minas. (s.f.). *Gobierno del Ecuador*. Obtenido de Ministerio de Energía y Minas: <https://www.rekursyenergia.gob.ec/ecuador-consolida-la-produccion-electrica-a-partir-de-fuentes-renovables/#:~:text=Bajo%20este%20precepto%2C%20es%20importante,%2C%20geotermia%2C%20entre%20otras>.
- Mohieldin, M., & Vandycke , N. (10 de Julio de 2017). *BANCO MUNDIAL*. Obtenido de <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2017/07/10/sustainable-mobility-for-the-21st-century#:~:text=A%20partir%20de%20ah%C3%AD%2C%20es,de%20respuesta%20a%20problemas%20clim%C3%A1ticos>.

- ONU-Habit. (2012). *Estado de las Ciudades de América Latina y El Caribe 2012*. Nairobi: Programa de las Naciones Unidas para los Asentamientos Humanos.
- Orús, A. (Febrero de 2022a). *Statista*. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/600663/fabricantes-de-automoviles-venta-de-vehiculos-a-nivel-mundial/>
- Orús, A. (Abril de 2022b). *Statista*. Obtenido de <https://es.statista.com/estadisticas/599000/turismos-ventas-en-paises-seleccionados-en-todo-el-mundo/>
- Statista Research Department. (08 de Marzo de 2023). *Statista*. Obtenido de <https://www.statista.com/statistics/276036/unit-sales-e-bikes-europe/>
- Toro, V., Ramírez, J., Quinceo, R., & Zuluaga, C. (2001). Cálculo de la emisión vehicular de contaminantes atmosféricos en la ciudad de Medellín mediante factores de emisión CORINAIR. *ACODAL*, 42-49.
- Twenergy. (31 de 07 de 2019). *Twenergy*. Obtenido de [https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/contaminacion/las-emisiones-contaminantes-de-los-coches-605/#%C2%BFQue\\_hacer\\_ante\\_las\\_emisiones\\_contaminantes\\_La\\_importancia\\_del\\_etiquetado\\_energetico](https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/contaminacion/las-emisiones-contaminantes-de-los-coches-605/#%C2%BFQue_hacer_ante_las_emisiones_contaminantes_La_importancia_del_etiquetado_energetico)
- US-EPA. (2008). *Average Annual Emissions and Fuel Consumption for Gasoline-Fueled Passenger Cars and Light Trucks*. Office of Transportation and Air Quality.
- US-EPA. (2020). *Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories*. Office of Transportation and Air Quality.
- Urzán, C., Moncada, C., & Escobar, D. (04 de Julio de 2017). Movilidad en bicicleta eléctrica vs convencional, análisis comparativo en tiempos de recorrido. Caso de estudio: Bogotá D.C. *Espacios*, 38(53), págs. 26-39.
- VBOX Automotive. (2022). *VBOX Sport*. Obtenido de VBOX AUTOMOTIVE: <https://www.vboxautomotive.co.uk/index.php/en/products/data-loggers/vbs#vbts>