





Artículo de Investigación

## Evaluación de la huella de carbono de vehículos con motor eléctrico y de combustión interna según la matriz energética de Ecuador: Caso de estudio KIA Soul vs KIA Soul EV

*Carbon footprint evaluation of vehicles with electric motor and internal combustion engine according to Ecuador energetic matrix: Study case KIA Soul vs KIA Soul EV*

Jorge Hernández-Ambato<sup>1,2,\*</sup>, Ricardo Fernández<sup>2</sup>, Alex Mora<sup>2</sup>, José Alvarado<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 060150; rfernandez\_551@hotmail.com; amora@institutos.gob.ec

<sup>2</sup> Universidad Técnica de Ambato, Ambato, Ecuador, 180103; jalvarado33@hotmail.es

\*Correspondencia: jhernandez@esPOCH.edu.ec

**Citación:** Hernández-Ambato, J., Fernández, R., Mora, A., & Alvarado, J., (2022). Evaluación de la huella de carbono de vehículos con motor eléctrico y de combustión interna según la matriz energética de Ecuador Caso de estudio: KIA Soul vs KIA Soul EV. *Novasinerгия*, 5(2), 58-75. <https://doi.org/10.37135/ns.01.10.04>

Recibido: 07 noviembre 2021

Aceptado: 07 junio 2022

Publicación: 05 julio 2022

Novasinerгия  
ISSN: 2631-2654

**Resumen:** En este trabajo se presentan los resultados de la evaluación de la huella de carbono entre un vehículo con motor de combustión interna (VMCI) y uno con motor eléctrico a baterías (VEB), considerando el panorama energético de Ecuador. Para esto, se utilizó el análisis del Pozo-a-la-Rueda, determinando primeramente la matriz de generación de energía eléctrica en el país. Como caso de estudio se consideró un vehículo KIA Soul y KIA Soul EV (versión eléctrica). De esta manera, se usaron las características técnicas de ambos vehículos provistas por el fabricante, y consideraciones sobre la distancia de conducción, ruta del combustible, vida útil y reemplazo de baterías, así como emisiones debidas al chasis y la carrocería de los vehículos. Los resultados obtenidos indican que las emisiones de gases de efecto invernadero de un VMCI en Ecuador es 236.16 gCO<sub>2</sub>/km, mientras que el VEB emite 63.14 gCO<sub>2</sub>/km, lo que significa apenas un 27% de las emisiones producidas por el VMCI. Estos resultados representan un impacto positivo para reducir los índices de contaminación ambiental, indicando además la necesidad de sostener y acelerar el cambio de la matriz energética del país hacia una generación de energía limpia y sostenible.

**Palabras clave:** Ciclo de vida, huella de carbono, matriz energética, pozo a la rueda, vehículo eléctrico.

**Abstract:** In this work, the results of carbon footprint evaluation of both an internal combustion engine vehicle (ICEV) and battery electric vehicle (BEV), considering the Ecuador energy scene, is presented. For this purpose, Well-to-Wheel analysis was used, firstly determining the electric energy generation matrix of the country. First, the KIA Soul vehicle and KIA Soul EV (electric version) were considered study cases. Then, manufacturers' technical characteristics were used to determine each vehicular technology's carbon footprint and considerations such as util life-route driving, fuel path, util life-time and replacement of batteries, and emissions due to chassis and body vehicle. Obtained results allowed for determining that greenhouse gas emissions in Ecuador due to the ICEV is 236.16 gCO<sub>2</sub>/km. On the other hand, the BEV emitted 63.14 gCO<sub>2</sub>/km, significantly barely 27% of emissions. These results represent a positive impact on reducing ambient contamination indices and reinforce the necessity for accelerating the change in the country's energy matrix toward a cleaner and more sustainable energy generation.

**Keywords:** Carbon footprint, electric vehicle, energy matrix, life cycle, well to wheel.



**Copyright:** 2022 derechos otorgados por los autores a Novasinerгия.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC). (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Lista de símbolos/siglas, Unidad		MCI	Motor de combustión interna		
$AC_{VMCI}$	Autonomía de conducción de un VMCI	km	N	Número de pasajeros	-
$AC_{VEB}$	Autonomía de conducción de un VEB	km	n	Número de baterías durante vida útil	-
$C_{bat}$	Capacidad de la batería	kWh	NEDC	New European Driving Cycle	-
$CG_{HE}$	Coefficiente de aporte de generación hidroeléctrica	-	$P_{bat}$	Potencia de la batería	kW
$CG_{FV}$	Coefficiente de aporte de generación fotovoltaica	-	$PC_{comb}$	Poder calórico del combustible	MJ/kg
$CG_{EE}$	Coefficiente de aporte de generación energía eólica	-	$R_{comb}$	Rendimiento de combustible	km/l
$CG_{TE}$	Coefficiente de aporte de generación termoeléctricas	-	$R_{bat}$	Rendimiento de consumo de la batería	km/kWh
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono	-	SPE	Sistema de propulsión eléctrica	-
$EB_{chasis}$	Emisiones de CO <sub>2</sub> relativo a la carrocería	gCO <sub>2</sub> /km.p	$Total\_Vol_{comb}$	Volumen total de combustible gasolina	l
EC <sub>NEDC</sub>	Emisiones de CO <sub>2</sub> durante un NEDC	gCO <sub>2</sub> /km	$Total\_C_{bat}$	Capacidad total de energía en batería	kWh
$EP_{comb}$	Emisiones de CO <sub>2</sub> por unidad poder calórico	gCO <sub>2</sub> /MJ	TTW	Tank-to-Wheel (en español, Tanque-a-la-Rueda)	-
$EP_{HE}$	Emisiones de CO <sub>2</sub> por producción hidroeléctrica	gCO <sub>2</sub> /kWh	VE	Vehículo eléctrico	-
$EP_{FV}$	Emisiones de CO <sub>2</sub> por producción fotovoltaica	gCO <sub>2</sub> /kWh	VEB	Vehículo eléctrico a batería	-
$EP_{EE}$	Emisiones de CO <sub>2</sub> por producción energía eólica	gCO <sub>2</sub> /kWh	VMCI	Vehículo con motor de combustión interna	-
$EP_{TE}$	Emisiones de CO <sub>2</sub> por producción termoeléctrica	gCO <sub>2</sub> /kWh	$Vol_{tank}$	Volumen del tanque de combustible	l
FC	Factor de corrección de emisiones por tráfico real (0.35)	-	WTW	Well-to-Wheel (en español, Pozo-a-la-Rueda)	-
GEI	Gases de efecto invernadero	-	WTT	Well-to-Tank (en español, Pozo-al-Tanque)	-
$M_{comb}$	Masa del combustible	kg	$\rho_{comb}$	Densidad de la gasolina (750)	kg/m <sup>3</sup>

## 1. Introducción

A nivel mundial, las emisiones de dióxido de carbono CO<sub>2</sub> son una de las principales causas del aumento de los GEI, calentamiento global y baja calidad de aire (Pérez-Martínez, Miranda, Andrade, & Kumar, 2020). Este problema se agrava debido al elevado número de VMCI que funcionan a base de combustibles fósiles emitiendo GEI (Leach, Kalghatgi, Stone, & Miles, 2020). Debido a esto, es necesario la introducción de nuevas medidas, tecnologías emergentes y sostenibles, para minimizar el impacto de la transportación humana en el medio ambiente.

En este sentido, los VE surgen como una alternativa para contrarrestar los problemas medio ambientales asociados a la transportación humana. La introducción en el mercado de los vehículos impulsados por SPE ha sido acelerada en los últimos años debido a la alerta sobre el eminente agotamiento de los recursos hidrocarbúricos después del 2040 y el imparable calentamiento global, según lo reportan (Kuo, 2019; Leach *et al.*, 2020). Un VEB principalmente se conceptualiza como un vehículo impulsado por la energía eléctrica almacenada en un banco de baterías. Debido a esto, durante su desplazamiento, e incluso durante las paradas obligatorias (semáforos, intersecciones, etc.) no emite CO<sub>2</sub> ni otros gases responsables de contaminación ambiental. Además, debido a los sistemas de conversión de energía que lo conforman, un VEB puede alcanzar niveles de eficiencia mayores al 85% en cuanto al aprovechamiento de energía, versus máximo el 35% que logran los VMCI, como lo indican (Chau, 2014; Kumar & Jain, 2014; Leach *et al.*, 2020).

Respecto a la cuantificación de las emisiones de GEI ligadas al consumo de combustible o energía, el análisis llamado WTW permite evaluar las emisiones de carbono de una tecnología vehicular en dos partes: WTT y TTW. La primera considera las emisiones de CO<sub>2</sub> que involucran las actividades de extracción, transformación y distribución de la energía, mientras que la segunda considera las emisiones producidas por el consumo de dicha energía (Ozdemir, Koc, & Sumer, 2020). En este sentido, al resultado de cuantificar las emisiones de CO<sub>2</sub> por parte de una tecnología se define como "Huella de Carbono". Esta permite realizar una comparación acerca de cuan contaminante es un producto tecnológico o industrial respecto de otro. En literatura existen varios estudios enfocados en determinar la huella de carbono que tienen tanto VMCI como VEBs.

Por un lado, en Moro & Helmers (2017) se presenta una metodología híbrida para evaluar la huella de carbono entre un VEB e VMCI, puntualizando principalmente las emisiones producidas durante la fabricación del pack de baterías del VEB y considerando una realidad europea. Los resultados encontrados con la metodología propuesta por los autores indican que el VEB reduce sus emisiones de CO<sub>2</sub> entre 31 - 46% respecto al VMCI. En Hall & Lutsey (2018) se reporta otro estudio comparativo de la huella de carbono de un VMCI y VEB en Europa, y se hace una especial mención sobre las emisiones debidas a la fabricación de las baterías de Litio. Se hace énfasis en la mitigación de índices de contaminación ante futuros escenarios energéticos, con una mayor introducción de energías renovables y mejoramiento en las tecnologías de almacenamiento de energía. Una parte importante de este estudio se muestra en la Figura 1, donde se comparan las emisiones de CO<sub>2</sub> por kilómetro de recorrido. Como se puede apreciar, la media de emisiones de un VEB en la Unión Europea es menor que las emisiones del VMCI más eficiente, sin embargo, si se compara por países, las emisiones de un VEB en Francia y Noruega son las más bajas de los escenarios analizados debido a las altas cuotas de generación de energía eléctrica nuclear y renovable que estos países tienen como se indica en Messagie (2015).

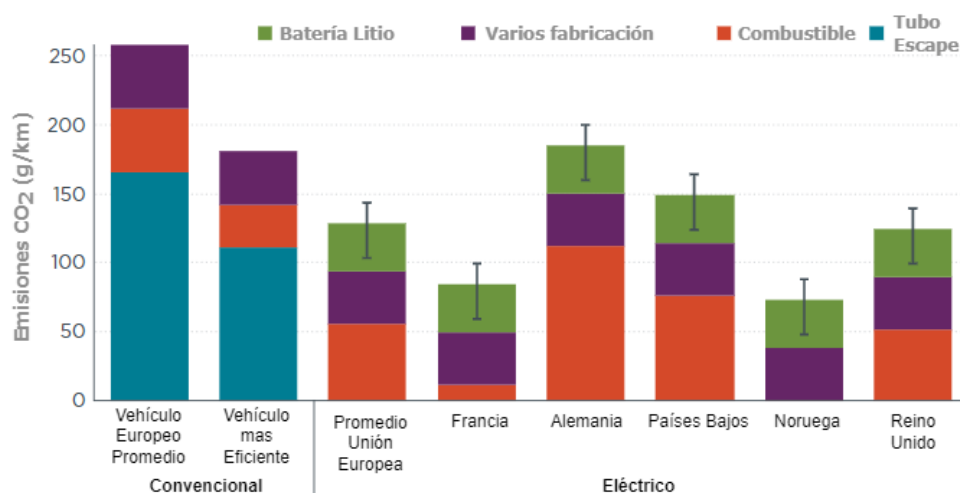


Figura 1: Emisiones de gCO<sub>2</sub>/km de vehículos eléctricos y convencionales en Europa para 150000 km de recorrido según Hall & Lutsey (2018).

Además, en Shen, Han, & Wallington (2014) se analiza el impacto que tiene el uso de VEs en las emisiones de GEI en China y su prospectiva futura en referencia a mejorar los índices de contaminación del aire y calentamiento global. En este estudio se reveló que, debido a la alta participación de generación renovable y nuclear en la red eléctrica de la región central y sur de China, los VEBs logran una eficiencia de 16 kWh/100km con emisiones cercanas a 140 gCO<sub>2</sub>/km. Sin embargo, para las redes eléctricas de cobertura norte y este de China los VEBs tienen emisiones GEI mayores a aquellas de vehículos híbridos en un 34 y 28% debido a las altas cuotas de generación eléctrica a partir de la quema de carbón. Estos resultados indican que las emisiones GEI, y por lo tanto la huella de carbono, de un VEB está fuertemente influenciado por los tipos de generación eléctrica de cada país, incluso dentro de sus mismas regiones como en el caso de China. Complementario a esto, en los trabajos de Jang & Song (2015) y Cai *et al.* (2015) se presentan evaluaciones de la huella de carbono que tiene el uso de combustibles fósiles en la transportación para realidades energéticas de

Corea y Estados Unidos, respectivamente. Estos trabajos evidencian la necesidad de diversificar las matrices energéticas de estos países hacia energías renovables para apreciar de mejor manera el beneficio del uso de los VEBs respecto de las emisiones GEI.

Por otro lado, y de manera particular, son pocos los trabajos realizados sobre la evaluación de la huella de carbono de tecnologías de transporte en Ecuador, por lo que se muestra la necesidad de profundizar en este tema considerando la matriz energética ecuatoriana. Por ejemplo, uno de los trabajos reportados es el de Vera, Clairand, & Bel (2017), donde se presenta un análisis del beneficio que representaría la introducción masiva de VEs en Ecuador, basado principalmente en factores económicos, impuestos y costos de energía, además de las políticas de incentivo que existen para la adquisición de VEs, pero no se considera una evaluación cuantitativa de las emisiones de CO<sub>2</sub>. En los trabajos de Córdova-Suaréz, Carrasco, Padilla, & Garcés-Sánchez (2018) y Córdova, Carrasco, Alvarez, Chaglla, Pico, & Pérez (2018) se presentan los análisis de la huella de carbono de vehículos de transporte urbano público propulsados por combustibles fósiles en la ciudad de Riobamba y Ambato, Ecuador, respectivamente. Los autores concluyeron que la problemática de emisiones de GEI en países en vías de desarrollo es mucho peor que en países desarrollados, no tanto por la totalidad de emisiones, sino más bien debido a la falta de regulaciones y control por parte del estado, baja calidad de combustibles fósiles y falta de penetración de tecnologías vehiculares emergentes, así como estudios relacionados a evaluar sus huellas de carbono según la realidad energética del país. Otro trabajo que debe ser mencionado es el reportado por Román-Collado, Sanz-Díaz, & Loja-Pacheco (2021), donde se establece la necesidad de medir las huellas de carbono de la producción y consumo energético en el Ecuador, de acuerdo a varios sectores industriales y de transporte, además de elaborar políticas gubernamentales acordes para fortalecer el proceso de descarbonización del país.

Una constante común en todos los trabajos revisados es que las emisiones de CO<sub>2</sub> de VEs alimentados por energías alternativas y sostenibles son menores a las generadas por combustibles fósiles. Además, en la mayoría de trabajos consultados se aplicó el análisis WTW para la evaluación de las huellas de carbono, las mismas que son diferentes en cada país debido a los variados escenarios energéticos que los caracterizan. Por lo tanto, es importante evaluar de forma específica las huellas de carbono en tecnologías vehiculares tomando en cuenta la realidad energética de cada país, lo que permitiría realizar una toma de decisiones e implementación de políticas de estado que den soporte a una mayor inserción de tecnologías de emisiones bajas de carbono y cambios en sus matrices energéticas.

A la luz de los trabajos consultados, y por lo antes mencionado, es importante resaltar que es necesario realizar una evaluación de la huella de carbono de vehículos eléctricos en el Ecuador, considerando la diversidad y participación de diferentes fuentes de generación en su matriz energética. A priori, se podría indicar que los resultados que se obtendrán de dicha evaluación ratificarán a los VEBs como la mejor alternativa para un transporte limpio y sostenible. Sin embargo, no es posible generalizar dichas conclusiones cuando es requerido contar con información específica que permita ubicar mejor una tecnología respecto de otra, considerando además que los resultados pueden ser mejores o peores en base a las cuotas de producción de energía renovable y no renovable de cada país, entre

otros factores. En este sentido, el objetivo de este trabajo es evaluar las emisiones de CO<sub>2</sub> de un VMCI y un VEB, contextualizadas en la realidad energética ecuatoriana, mediante la aplicación del análisis WTW. Los datos técnicos y de fabricante utilizados en este estudio pertenecen a un vehículo KIA Soul y un KIA Soul EV, ambos modelos comercializados en el mercado ecuatoriano. De esta manera, se pretende establecer la huella de carbono que deja el uso de este tipo de vehículos en el Ecuador, considerando el total de emisiones que se generan desde la producción de combustibles o energía eléctrica hasta su consumo en las tecnologías vehiculares antes mencionadas.

## 2. Metodología

El presente estudio se lleva a cabo siguiendo de manera secuencial una serie de actividades que permiten establecer de manera cuantitativa, desde el punto de vista teórico y documental, los niveles de emisiones de CO<sub>2</sub> por parte de un VMCI y un VEB según la realidad energética del Ecuador. En la Figura 2 se presenta la metodología aplicada en el estudio, la misma que inicia recolectando datos de las tecnologías vehiculares consideradas y de la matriz energética del Ecuador. Posteriormente, se detallan los escenarios de estudio considerados para la aplicación del análisis WTW, concluyendo con la interpretación de los resultados. Es importante indicar que, se ha escogido el análisis WTW debido a que es el más documentado en literatura, como se puede consultar en los trabajos elaborados por Cai *et al.*, (2015), Choi & Song (2014), Jang & Song (2015) y Moro & Helmers (2017).

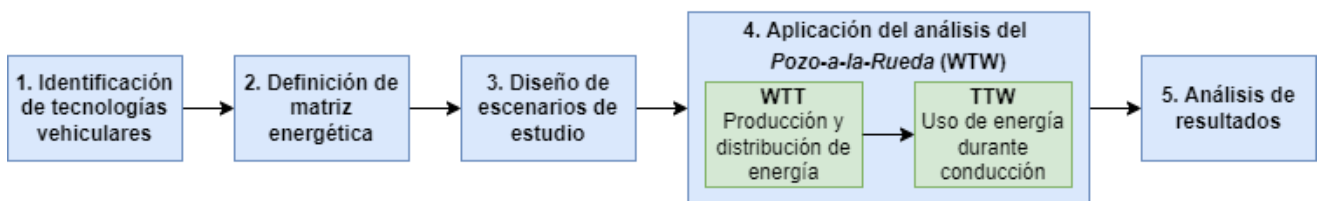


Figura 2: Metodología secuencial para el estudio de la huella de carbono propuesta para el presente trabajo.

### 2.1. Identificación de tecnologías vehiculares VMCI y VEB

En la Figura 3 se puede apreciar las arquitecturas básicas de un VMCI y un VEB, mientras que en la tabla 1 se comparan las características, ventajas y desventajas de ambos tipos de vehículos.

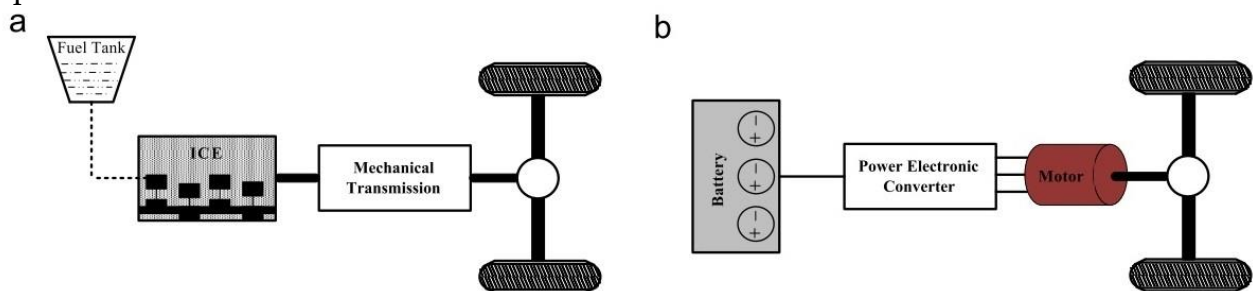


Figura 3: Arquitectura de vehículos propulsados por la energía proveniente de a) motor de combustión interna y b) baterías, parcialmente extraída de Kumar & Jain (2014).

Tabla 1: Comparación de características entre un VMCI y un VEB, extraída parcialmente de Kumar &amp; Jain (2014).

Tipo de Vehículo	Sistema de Propulsión	Almacenamiento de Energía	Infraestructura de la Fuente de Energía	Ventajas	Desventajas	Problemáticas Importantes
VMCI	Basada en MCI	Tanque de combustible	Derivados de petróleo con estaciones de servicio	Tecnología madura Altamente comercial Buen rendimiento Operación simple Fiable Durable	Menos eficiente Baja economía de combustible Emisiones nocivas Comparativamente voluminoso	Economía de combustible Emisiones nocivas Altamente dependiente de derivados de petróleo
VEB	Basada en SPE	Batería Supercondensadores Inercia Mecánica	Energía eléctrica con infraestructura para carga	Eficiencia energética Emisiones cero Independencia de derivados de petróleo Silencioso Funcionamiento suave Comercial	Rango de conducción limitado Tiempos de recarga largos Mala respuesta dinámica	Tamaño y peso del paquete de baterías Rendimiento del vehículo Infraestructura para estaciones de carga

Por una parte, los VMCI utilizan la energía térmica proveniente de combustibles fósiles liberada a través de explosiones contenidas en las cámaras de combustión de los cilindros del motor y la transforman en energía cinética que es dirigida hacia las ruedas para la tracción mediante un sistema de transmisión mecánica. Debido al proceso de transformación de energía que utiliza, se producen muchas pérdidas en forma de calor lo que reduce la eficiencia del sistema de transformación hasta un 30%, generando además emisiones de CO<sub>2</sub> durante la conducción debido al proceso de combustión, tal y como lo indican Iannelli, Gil, & Prieto (2018).

Por otra parte, los VEB son propulsados por la energía electroquímica almacenada en una batería en forma de carga eléctrica, la misma que es dirigida hacia las ruedas para la tracción mediante un sistema de conversión de potencia eléctrica y motor/generador acoplado de manera simple o directa (Chau, 2014). Las baterías que se emplean en este tipo de vehículos, son construidas a base de varios materiales como: iones de litio (Li-Ion), polímero de litio (Li-Po), níquel-hierro (Ni-Fe), níquel-hidruro metálico (Ni-MH), entre otras (Kumar & Jain, 2014). Por tener una fuente de propulsión basada en electricidad, las emisiones de CO<sub>2</sub> durante la conducción son nulas, incluso durante las paradas forzadas del vehículo como en semáforos e intersecciones. Sin embargo, las baterías deben recargarse a partir de la infraestructura eléctrica de cada país mediante puntos de conexión diseñados con este fin. Debido a esto, las emisiones de CO<sub>2</sub> producidas al generar y distribuir la energía eléctrica para la recarga de las baterías deben ser consideradas para determinar la huella de carbono de los VEB.

Para este estudio, se escogieron modelos de vehículos VMCI y VEB comercialmente disponibles en Ecuador. En este sentido, para el análisis del VMCI se escogió el modelo KIA Soul, mientras que para el VEB se seleccionó el modelo KIA Soul EV. Ambos vehículos son manufacturados por el mismo fabricante y comparten características relativas a carrocería, volumen, número de pasajeros, entre otros. En la tabla 2 se muestra una lista de las características técnicas de ambos vehículos. Dicha lista ha sido compilada con la

información obtenida de las fichas técnicas de ambos vehículos y los datos obtenidos de sitios web expertos del sector automovilístico, mismas que pueden ser consultadas en KIA Motors, n.d.-a; KIA Motors, ( n.d.-b); KIA MOtors, (n.d.-c); Km77, (n.d.-a); Km77, (n.d.-b).

Tabla 2: Lista de características técnicas de un KIA Soul vs KIA Soul EV.

Parámetro	Símbolo	Unidad SI	KIA Soul	KIA Soul EV
Tipo de carrocería	-	-	Monovolumen	Monovolumen
Número de puertas	-	-	5	5
Número de pasajeros	$N$	-	5	5
Sistema de propulsión	-	-	Basada en MCI	Basada en SPE
Dimensiones (L x An x Al)	-	$m$	4.14 x 1.8 x 1.62	4.14 x 1.8 x 1.6
Batalla	-	$m$	2.57	2.57
Peso	$M_{car}$	$kg$	1290	1505
Coeficiente de arrastre	$C_x$	-	0.34	0.33
Tipo de motor	-	-	MCI	Eléctrico
Fuente de energía	-	-	Gasolina	Batería Li-ion
Cilindrada	-	$cc$	1.591	-
Rendimiento de combustible*	$R_{comb}$	$km/l$	9.8	-
Emisiones de CO <sub>2</sub> NEDC	$EC_{NEDC}$	$gCO_2/km$	140	-
Potencia del motor	$P_{ICE}   P_{EM}$	$kW$	121 @ 6300 rpm	108 @ 2730 rpm
Torque del motor	$\tau_{ICE}   \tau_{EM}$	$Nm$	151 @ 4850 rpm	285
Potencia de batería	$P_{bat}$	$kW$	-	90
Capacidad de batería	$C_{bat}$	$kWh$	-	27
Volumen de tanque	$Vol_{tank}$	$l$	54	-
Transmisión	-	-	Mecánica/Automática x 6	Automática x 1
Aceleración de 0 a 100 km/h	$t_a$	$s$	11.0	11.2
Velocidad máxima	$Vel_{max}$	$km/h$	185	145
Pendiente máxima	$m$	$\%$	-	33
Aire acondicionado	-	-	Si	Si
Autonomía de conducción	$AC_{VMCI}   AC_{VEB}$	$km$	-	200
Precio en USD	-	-	\$ 23000	\$ 31000

\* Valor referido en conducción urbana y bajo datos del fabricante.

## 2.2. Matriz energética del Ecuador

De acuerdo al último reporte disponible de estadísticas de la Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales No Renovables (ARCERNNR) del Ecuador (ARCERNNR, 2021), en el año 2020 había una producción de energía eléctrica renovable del 64.91% y no renovable del 35.09%. En la Figura 4 se puede apreciar la distribución de la producción de energía eléctrica efectiva en el Ecuador, según el tipo de fuente.

Sin embargo, y para fines de este estudio, es importante diferenciar que, en el Ecuador, la producción de energía eléctrica con bajas emisiones de CO<sub>2</sub> está conformada principalmente por: generación hidroeléctrica, fotovoltaica y eólica. En cambio, las centrales térmicas basadas en MCIs, turbovapor, turbogas, biomasa y biogás pueden ser agrupadas como producción de energía eléctrica con altas emisiones de CO<sub>2</sub>. En este estudio, a este grupo de estaciones de generación basadas en un proceso de combustión se las denominará como *generación termoeléctrica*. En este sentido, las cuotas de participación en el mercado de generación de energía eléctrica en el Ecuador para estos tipos de producción durante el 2020 y hasta la actualidad se resumen en la Tabla 3. Como se puede observar, en el Ecuador la producción de energía eléctrica es mayoritariamente hidroeléctrica (62.58%) y termoeléctrica (36.83%).

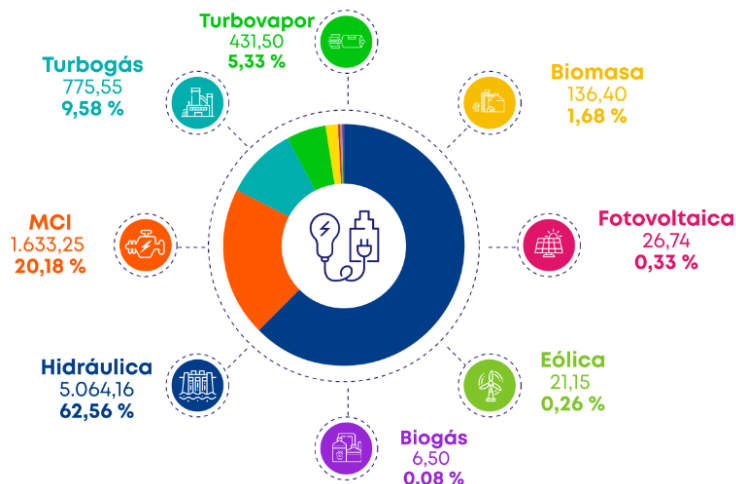


Figura 4: Producción de energía eléctrica efectiva en el Ecuador en el año 2020, según el tipo de fuente, según ARCERNNR (2021).

Tabla 3: Cuotas de participación en la producción de energía eléctrica en el Ecuador durante el 2020 hasta la actualidad, según datos recabados de ARCERNNR (2021).

Tipo de Producción	Potencia Efectiva, MW	Aporte de Generación, %	Coefficiente de Generación, CG
Hidráulica	5036.43	62.58	0.6258
Fotovoltaica	26.74	0.33	0.0033
Eólica	21.15	0.26	0.0026
Térmica	2963.79	36.83	0.3683
Total	8048.11	100.00	1.0000

### 2.3. Escenario de estudio

En esta fase se lleva a consideración los aspectos clave requeridos para la aplicación del análisis WTW, así como la definición de otros que no ingresan dentro del mencionado análisis, pero que son igual de importantes. La base de estudio lo conforman los vehículos KIA Soul y KIA Soul EV como modelos correspondientes al VMCI y VEB, respectivamente, ambos disponibles comercialmente en Ecuador. El estudio se centra en determinar la huella de carbono que registran los mencionados vehículos durante una vida útil de 200000 km de recorrido, la misma que es realizada en no menos de 10 años.

En ambos casos se considera la autonomía de conducción dada por el fabricante u obtenida mediante los datos técnicos de la Tabla 2. Por tanto, la autonomía del VMCI se obtiene mediante ecuación (1).

$$AC_{VMCI} = R_{comb} * Vol_{tank} \tag{1}$$

donde,  $R_{comb} = 9.8 \text{ km/l}$  es el rendimiento del combustible, mismo que representa la cantidad de kilómetros que el automóvil puede recorrer con un volumen específico de combustible, y  $Vol_{tank} = 54 \text{ l}$  es el volumen del tanque de combustible, resultando en 529 km.

De forma análoga, se puede establecer de acuerdo a la Tabla 2 que, según el fabricante, la autonomía del VEB es  $AC_{VEB} = 200 \text{ km}$  con una sola carga de la batería. Por tanto, el rendimiento del consumo de energía por cada kilómetro recorrido del VEB se calcula con l ayuda de la ecuación (2).



$$R_{bat} = \frac{AC_{VEB}}{C_{bat}} \quad (2)$$

donde,  $C_{bat} = 27 \text{ kWh}$  y es la capacidad de almacenamiento de energía en las baterías, resultando en  $7.4 \text{ km/kWh}$ . En base a lo mencionado, se determinan las cantidades totales mínimas de combustible y energía requerida por el VMCI y VEB mediante las ecuaciones (3) y (4), respectivamente, para lograr el recorrido de vida útil establecido para este estudio.

$$Total\_Vol_{comb} = \frac{200000 \text{ km}}{R_{comb}} = \frac{200000 \text{ km}}{9.8 \text{ km/l}} = 20408 \text{ l} \quad (3)$$

$$Total\_C_{bat} = \frac{200000 \text{ km}}{R_{bat}} = \frac{200000 \text{ km}}{7.4 \text{ km/kWh}} = 27027 \text{ kWh} \quad (4)$$

Un aspecto que debe ser considerado es las emisiones generadas por la fabricación y uso de la carrocería durante el recorrido de vida útil. Para esto, la unidad estándar  $gCO_2/km.p$  es utilizada, la misma que indica los gramos de  $CO_2$  por kilómetro recorrido y por número pasajeros. En el caso de ambos vehículos, el máximo número de pasajeros es 5 (Tabla 2), pero se considerará un valor intermedio de  $N = 2$  debido a que es impráctico que el total de pasajeros viajen juntos durante todo el recorrido de vida útil. En este sentido, en base a lo publicado por HINICIO (2020), las emisiones de carbono en kilogramos debidas a la carrocería se calculan mediante la ecuación (5).

$$Emisiones\_Chasis = \frac{EB_{chasis} * 200000 \text{ km} * N}{1000} \quad (5)$$

donde,  $EB_{chasis}$  es la tasa de emisiones de  $CO_2$  relacionada al uso de la carrocería, mismo que para un VMCI se estima en  $5.0 \text{ gCO}_2/km.p$ , mientras que para un VEB se ubica en  $3.5 \text{ gCO}_2/km.p$ . La diferencia entre estos valores está influenciada por el sistema de transmisión más simplificado, menores requerimientos de mantenimiento y mayor eficiencia en la conversión y transferencia de energía que tienen los VEB, respecto de los VMCI.

#### 2.4. Análisis del Pozo-a-la-Rueda (WTW)

Como se mencionó anteriormente, para realizar una comparación sobre las emisiones de GEI por parte de las tecnologías vehiculares involucradas en este estudio: VMCI y VEB, se realiza un análisis WTW. Según Ozdemir *et al.* (2020), este análisis considera todas las emisiones de  $CO_2$  que se generan desde el origen de una fuente de energía hasta su consumo en el vehículo. El análisis se subdivide en dos fases: 1) *WTT (pozo al tanque)* - donde se analizan y cuantifican todas aquellas emisiones de carbono que se efectúan durante el proceso de extracción o generación, transformación, transporte y distribución de combustibles o energía, dependiendo del tipo de vehículo que esté bajo análisis; y 2) *TTW (tanque a la rueda)* - donde se cuantifica aquella energía consumida y las emisiones GEI producidas por el vehículo de tecnología determinada durante su vida útil en términos de distancia de conducción.

##### *Emisiones del Pozo al Tanque (WTT) para el VMCI*

En el caso del KIA Soul, las emisiones de  $CO_2$  durante el WTT están asociadas a la producción y distribución de gasolina requerida para su funcionamiento. En este sentido, el

peso asociado a la cantidad de combustible necesario para su vida útil de recorrido, mismo que fue establecido mediante la ecuación (3) en 20408 l, es determinado mediante la ecuación (6):

$$M_{comb} = \rho_{comb} * \frac{Total\_Vol_{comb}}{1000} \quad (6)$$

donde,  $\rho_{comb}$  es la densidad de la gasolina, misma que según (Martinez, n.d.) es valorada en  $750 \text{ kg/m}^3$ .

Finalmente, según Isla-Martínez (2017), el total de emisiones de  $\text{CO}_2$  en kilogramos, generados desde la extracción y refinamiento de la gasolina, hasta su distribución en las estaciones de servicio donde el VMCI recarga el combustible requerido para su funcionamiento durante el recorrido de vida útil (Ecuación (7)).

$$Emisiones\_WTT_{VMCI} = \frac{M_{comb} * PC_{comb} * EP_{comb}}{1000} \quad (7)$$

donde,  $PC_{comb}$  es el poder calórico por cada kilogramo equivalente de gasolina, mientras que  $EP_{comb}$  representa las emisiones de  $\text{CO}_2$  generadas para producir cada unidad de poder calórico del combustible. De acuerdo a Isla-Martínez (2017) y Martinez (n.d.), el valor para  $PC_{comb}$  se promedia como  $44.3 \text{ MJ/kg}$ , mientras que  $EP_{comb}$  se estima en  $10.961 \text{ gCO}_2/\text{MJ}$ .

#### *Emisiones del Pozo al Tanque (WTT) para el VEB*

En el caso del KIA Soul EV, las emisiones de  $\text{CO}_2$  durante el WTT están asociadas a la producción de la energía eléctrica requerida para recargar las baterías durante la vida útil de recorrido, y las emisiones debidas a la fabricación y reemplazo del pack de baterías del vehículo. Por un lado, se debe considerar que, en el caso de Ecuador, el total de la energía requerida por el VEB ( $Total\_C_{bat} = 27027 \text{ kWh}$ ) es entregada por diferentes fuentes de generación eléctrica, como se mencionó en la Tabla 3, las mismas que emiten diferentes niveles de  $\text{CO}_2$ .

En este sentido, los totales de emisiones de  $\text{CO}_2$  en kilogramos emitidas proporcionalmente por cada fuente de generación eléctrica de la Tabla 3 se calculan con la ayuda de la ecuación (8), (9), (10) y (11).

$$Total\_EP_{HE} = \frac{Total\_C_{bat} * CG_{HE} * EP_{HE}}{1000} \quad (8)$$

$$Total\_EP_{FV} = \frac{Total\_C_{bat} * CG_{FV} * EP_{FV}}{1000} \quad (9)$$

$$Total\_EP_{EE} = \frac{Total\_C_{bat} * CG_{EE} * EP_{EE}}{1000} \quad (10)$$

$$Total\_EP_{TE} = \frac{Total\_C_{bat} * CG_{TE} * EP_{TE}}{1000} \quad (11)$$

donde,  $CG_{HE}$ ,  $CG_{FV}$ ,  $CG_{EE}$  y  $CG_{TE}$  son los coeficientes del aporte de generación de las fuentes hidroeléctricas, fotovoltaicas, eólicas y termoeléctricas, respectivamente, de acuerdo a la información de la Tabla 3. Mientras que, los términos  $EP_{XX}$  representan las emisiones de

CO<sub>2</sub> producidas por cada fuente de generación consideradas. Por ejemplo, las hidroeléctricas en Ecuador generan emisiones promedio equivalentes a  $EP_{HE} = 24 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$ , según lo reportado por Briones-Hidrovo, Uche, & Martínez-Gracia (2017). La generación de energía fotovoltaica emite cerca de  $EP_{FV} = 40 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$  según lo recabado de NREL-U.S. (2012), Reich, Alsema, Van Sark, & Nieuwlaar (2007). La generación eléctrica a partir de la energía eólica emite en promedio cerca de  $EP_{EE} = 12 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$  según lo reportado por Bhandari, Kumar, & Mayer (2020). La generación en centrales termoeléctricas produce emisiones promedio equivalentes a  $EP_{TE} = 490 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$  (Parra-Narváez, 2015; Prado-Carpio & Castro-Armijos, 2017).

Por lo tanto, el total de emisiones de CO<sub>2</sub> en kilogramos, emitidos por la generación y producción de energía eléctrica requerida para la recarga de las baterías del VEB durante el recorrido de vida útil, se calcula como muestra la ecuación (12).

$$Emisiones\_WTT_{BEV\_Carga} = Total\_EP_{HE} + Total\_EP_{FV} + Total\_EP_{EE} + Total\_EP_{TE} \quad (12)$$

Por otro lado, la estimación de emisiones debidas a la fabricación de baterías y su respectivo reemplazo en el KIA Soul EV, se calculan mediante la ecuación (13).

$$Emisiones\_WTT_{BEV\_bat} = EF_{bat} * C_{bat} * n \quad (13)$$

donde,  $C_{bat}$  es la capacidad del banco de baterías establecida en 27 kWh (Tabla 2),  $EF_{bat}$  es la estimación de emisiones realizadas durante la fabricación de baterías de iones de litio por cada kilo-watio-hora de capacidad, cuyo valor es 110 KgCO<sub>2</sub>/kWh (Hall & Lutsey, 2018). Además, en cada batería se estima una vida útil mínima de 8 años, por lo cual se requerirá de al menos un reemplazo del banco de baterías durante la vida útil del vehículo ( $n = 2$ ). Es importante indicar que se desprecian las emisiones producidas por el transporte e importación de las baterías a Ecuador.

#### *Emisiones del Tanque a la Rueda (TTW)*

En el caso del KIA Soul EV, no se consideran algún valor para las emisiones TTW debido a que el VEB no emite ningún tipo de GEI durante los ciclos de conducción, lo cual representa una de sus principales ventajas.

Contrario a esto, según los datos de la Tabla 2, el KIA Soul a gasolina emite  $EC_{NEDC} = 140 \text{ gCO}_2/\text{km}$  durante ciclos de conducción NEDC (*New European Driving Cycle*) el mismo es una prueba de homologación europea para vehículos. Por lo tanto, el total de emisiones de carbono durante la fase TTW generadas por parte del VMCI durante el recorrido de vida útil considerado, se calculan usando la relación en ecuación (14).

$$Emisiones\_TTW_{ICEV} = EC_{NEDC} * 200000 \text{ km} * FC \quad (14)$$

donde,  $FC$  es un factor de corrección equivalente al 35% más de emisiones debido a las condiciones reales de tráfico y conducción, como lo recomienda Fontaras, Zacharof, & Ciuffo (2017). Es importante indicar que durante la fase TTW solo se considera las emisiones debidas el consumo de gasolina, y este dato ha sido provisto por el fabricante.

### 3. Resultados

En base a datos expuestos en la Tabla 2 y Tabla 3, y aplicando las ecuaciones (8)-(11), se evaluó las emisiones de CO<sub>2</sub> por parte de cada tipo de generación energética considerada en este estudio para producir la energía eléctrica que demanda el KIA Soul EV durante su vida útil de recorrido. Los resultados de esta estimación constituyen los índices de emisiones de CO<sub>2</sub> para el VEB durante la fase WTT y se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Emisiones de CO<sub>2</sub> generados por la producción energética en Ecuador requerida por el VEB para 200000 km de recorrido.

Tipo de Generación Eléctrica		Energía Requerida, <i>kWh</i>	Emisiones Equivalentes, <i>gCO<sub>2</sub>/kWh</i>	Subtotal Emisiones, <i>kgCO<sub>2</sub></i>
Bajas emisiones CO <sub>2</sub>	Hidroeléctrica (62.58%)	16913.50	24	405.92
	Fotovoltaica (0.33%)	89.20	40	3.57
	Eólica (0.26%)	70.30	12	0.84
Altas emisiones CO <sub>2</sub>	Centrales Térmicas (36.83%)	9954.10	490	4877.49
	Totales	27027.00	566	5287.82

En la Tabla 5 se presenta el resumen de los resultados de las emisiones calculadas en el análisis WTW para determinar la huella de carbono de los vehículos KIA Soul y KIA Soul EV. Por un lado, para el WTT se consideraron las emisiones de CO<sub>2</sub> debidas al camino del combustible para el VMCI (Ecuación (7)), mientras que para el VEB se tomó en cuenta las emisiones producidas durante la recarga de las baterías (Ecuación (12)), así como las emisiones debidas a la fabricación y reemplazo de baterías (Ecuación (13)). Por otro lado, para el TTW se consideró únicamente las emisiones de CO<sub>2</sub> durante el recorrido y conducción del VMCI (Ecuación (14)) debido a que el VEB no emite carbono durante la conducción. Complementario al análisis, un parámetro común a ambos vehículos son las emisiones de CO<sub>2</sub> provocadas por la fabricación, uso y mantenimiento del chasis o carrocería en general (Ecuación (5)). Como se puede observar, el total de emisiones de carbono del VMCI es 47232.17 kgCO<sub>2</sub>, frente a los 12627.82 kgCO<sub>2</sub> que emite el VEB durante un mismo recorrido de vida útil de 200000 km.

Tabla 5: Emisiones de CO<sub>2</sub> calculadas para la huella de carbono de un KIA Soul y KIA Soul EV para un recorrido 200000 km, según la matriz energética de Ecuador.

Emisiones	Parámetros	VMCI (KIA Soul), kgCO <sub>2</sub>	VEB (KIA Soul EV), kgCO <sub>2</sub>
Chasis	Fabricación, uso y mantenimiento	2000.00	1400.00
TTW	Durante recorrido	37800.00	0
	Recarga de batería	0	5287.82
WTT	Camino de combustible	7432.17	0
	Reemplazo de batería	0	5940.00
	Totales	47232.17	12627.82

En la Figura 5 se muestra la diferencia que existe entre la huella de carbono que describe un VMCI (KIA Soul) versus un VEB (KIA Soul EV), según la realidad energética del Ecuador. Complementario a los datos de la Tabla 5, utilizar un VEB en Ecuador representa generar relativamente un 27% de emisiones de CO<sub>2</sub> de lo que se genera al utilizar un VMCI.

#### 4. Discusión

En primer lugar, si bien es cierto, se conoce que VMCI es más contaminante respecto a VEB, es importante evaluar cuantitativamente sus emisiones de GEI debido a que estos valores están muy relacionados con la realidad energética de cada país, y particularmente en la literatura no se encuentran reportados estos indicadores para el escenario energético del Ecuador.

Por tanto, en base a los resultados presentados en la Tabla 5 y Figura 5, si se considera el kilometraje de vida útil para el recorrido, entonces la huella de carbono del VEB es 63.14  $gCO_2/km$ , mientras que la del VMCI es 236.16  $gCO_2/km$ . Analizando aún más en detalle, por un lado, el VEB genera un 89% de sus emisiones de  $CO_2$  durante la fase WTT frente al 16% del VMCI, debido principalmente al reemplazo de baterías y la generación de energía eléctrica para la recarga de las mismas. Sin embargo, también es importante mencionar que, en Ecuador, dichas emisiones se generan en zonas rurales y alejadas de los centros urbanos. Por otro lado, el VEB no emite  $CO_2$  durante la fase TTW mientras que el VMCI concentra el 80% de sus emisiones de  $CO_2$  en esta fase. Considerando estos resultados, se puede afirmar que las emisiones del VMCI son más perjudiciales, no solo porque son mayores que las del VEB, sino que las mismas se generan principalmente durante la conducción en centro urbanos y extraurbanos. Respecto a las emisiones generadas por la fabricación, uso y mantenimiento del chasis o carrocería relativas a cada vehículo, el VMCI tiene un menor porcentaje que el VEB, pero esto es debido a que el VEB emite menos  $CO_2$  que el VMCI en términos generales.

Con el fin de comparar los resultados obtenidos en el presente estudio con aquellos reportados en literatura, se presenta la Tabla 6, donde se puede evidenciar que las huellas de carbono de un VMCI es Ecuador con similares a las generadas en varios países de Europa y Corea (Hall & Lutsey, 2018; Jang & Song, 2015; Messagie, 2015). Sin embargo, también es notable que la huella de carbono de los VEB en Ecuador es menor que todos los trabajos consultados, y comparable con los valores registrados en Noruega y Turquía (Hall & Lutsey, 2018; Ozdemir *et al.*, 2020). Esta baja huella de carbono registrada se debe principalmente a que Ecuador tiene una mayor participación de generación eléctrica renovable o de bajas emisiones de GEI en la red eléctrica nacional.

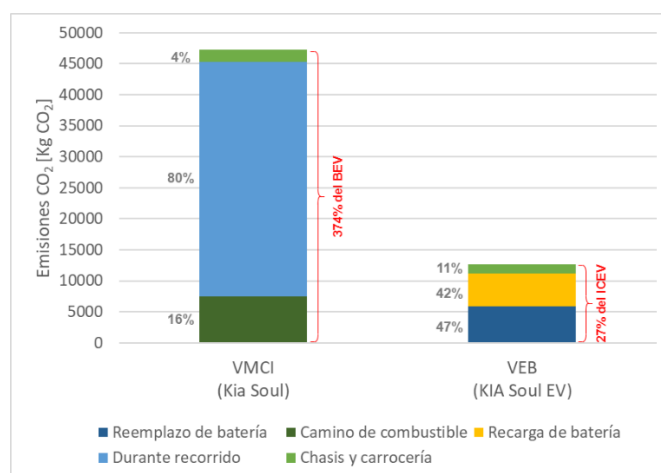


Figura 5: Comparativa de la huella de carbono entre un VMCI (KIA Soul) y un VEB (KIA Soul EV), considerando la realidad energética de Ecuador y un recorrido de vida útil de 200000  $km$ .

Tabla 6: Comparación de resultados de huella de carbono obtenidos versus los reportados en bibliografía.

Trabajo referencial	Emisiones VMCI, $gCO_2/km$	Emisiones VEB, $gCO_2/km$	País o Región
Messagie (2015)	215	95	Europa
		140	Centro y Sur de China
		170	Este China
Shen <i>et al.</i> (2014)	150	210	Norte de China
		190	Noreste de China
		160	Noroeste de China
		135	Promedio de Europea
		85	Francia
Hall & Lutsey (2018)	260	180	Alemania
		150	Países Bajos
		70	Noruega
		125	Reino Unido
Ozdemir <i>et al.</i> (2020)	183.4	73.9	Turquía (Estambul)
Moro & Helmers (2017)	178	96.6	Europa
Jang & Song (2015)	240	-	Corea
Presente estudio	236.16	63.14	Ecuador

Finalmente, es importante identificar ciertas acciones que podrían impactar sobre las huellas de carbono de los VEB en Ecuador. Por un lado, se debe consolidar y llevar a la práctica estrategias de reciclaje baterías de litio como el denominado "*second live*", hasta la recuperación de materiales, e inclusive diversificar la matriz productiva y tecnológica del Ecuador mediante la fabricación local de repuestos para vehículos eléctricos. Así mismo, las emisiones de  $CO_2$  de un VEB están relacionadas de manera inversamente proporcional con las cuotas de generación eléctrica renovable o de bajas emisiones (hidroeléctrica, eólica y fotovoltaica). Por lo tanto, ante una mayor presencia de vehículos eléctricos en el Ecuador, el estado deberá realizar una mayor inversión en infraestructura para la producción energética renovable con el objetivo de impulsar de mejor manera el proceso de descarbonización del país, como lo señalan Garcia-Pinargote, Benítez-Sornoza, Vásquez-Pérez, & Rodríguez-Gámez (2021) y Tuza Chamorro (2021).

## 5. Conclusiones

Un VEB genera emisiones por  $63.14 gCO_2/km$ , mientras que un VMCI genera emisiones por  $236.16 gCO_2/km$ , según los datos recabados de la matriz de generación energética en Ecuador. Al respecto de todo esto, el uso de VEBs en Ecuador representaría únicamente un 27% de emisiones de  $CO_2$  de lo que genera un VMCI durante una vida útil de  $200000 km$  de recorrido. Por lo tanto, una mayor introducción de VEBs en el parque automotor resultaría sumamente beneficioso para el medioambiente en Ecuador, contribuyendo al cambio de la matriz energética y descarbonización del país, y su apreciación en el panorama internacional.

## Contribución de los autores

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://casrai.org/credit/>). Los autores declaran sus contribuciones en la siguiente matriz:

	Hernández-Ambato, J.	Fernández, R.	Mora, A.	Alvarado, J.
Conceptualización				
Análisis formal				
Investigación				
Metodología				
Recursos				
Validación				
Redacción - revisión y edición				

### Conflicto de Interés

Los autores declaran no tener conflicto de interés alguno en lo referente al presente trabajo.

### Agradecimiento

Los autores agradecen al Prof. Marcelo García por sus conocimientos impartidos durante el desarrollo del programa de Maestría en Sistemas de Propulsión Eléctrica de la Universidad Técnica de Ambato. Además, se agradece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por la asignación de recursos en el proyecto de investigación denominado “Convertidores DC/DC de Alta Eficiencia basado en dispositivos WBG para aplicaciones en Tecnología Vehicular Eléctrica (ConAE-TVE)”, al cual se anexa el presente trabajo.

### Referencias

ARCERNNR. (2021). Estadística Anual y Multianual del Sector Eléctrico Ecuatoriano 2020. Quito - Ecuador. Recuperado de <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=1855&force=1>

Bhandari, R., Kumar, B., & Mayer, F. (2020). Life cycle greenhouse gas emission from wind farms in reference to turbine sizes and capacity factors. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123385>

Briones-Hidrovo, A., Uche, J., & Martínez-Gracia, A. (2017). Accounting for GEI net reservoir emissions of hydropower in Ecuador. *Renewable Energy*, 112, 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.047>

Cai, H., Brandt, A. R., Yeh, S., Englander, J. G., Han, J., Elgowainy, A., & Wang, M. Q. (2015). Well-to-Wheels Greenhouse Gas Emissions of Canadian Oil Sands Products:

- Implications for U.S. Petroleum Fuels. *Environmental Science and Technology*, 49(13), 8219–8227. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01255>
- Chau, K. T. (2014). 21 - Pure electric vehicles. *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance: Towards Zero Carbon Transportation*, 655–684. <https://doi.org/10.1533/9780857097422.3.655>
- Choi, W., & Song, H. H. (2014). Well-to-wheel analysis on greenhouse gas emission and energy use with natural gas in Korea. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(4), 850–860. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0704-7>
- Córdova-Suárez, M., Carrasco, M., Padilla, P., & Garcés-Sánchez, E. (2018). Estudio de la Huella de Carbono en Unidades Desconcentradas de Terminales Terrestres. *Revista Politécnica*, 41(1), 39–44. Recuperado de <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/rpolit/v41n1/2477-8990-rpolit-41-01-00039.pdf>
- Córdova, M., Cordova, D., Alvarez, F. C., Chaglla, M. T., Pico, P. E., & Pérez, L. V. (2018). Carbon Footprints in Ecuador: Case of Riobamba city's Bus Stations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 151, 012001. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/151/1/012001/pdf>
- Fontaras, G., Zacharof, N.-G., & Ciuffo, B. (2017). Fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions from passenger cars in Europe – Laboratory versus real-world emissions. *Progress in Energy and Combustion Science*, 60, 97–131. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2016.12.004>
- García-Pinargote, D. F., Benítez-Sornoza, G. J., Vásquez-Pérez, A., & Rodríguez-Gámez, M. (2021). La generación distribuida y su regulación en el Ecuador. *Brazilian Journal of Business*, 3(3), 2018–2031. <https://doi.org/10.34140/bjbv3n3-001>
- Hall, D., & Lutsey, N. (2018). Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions. ICCT Briefing. International Council on Clean Transportation. Recuperado de: [https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/EV-life-cycle-GHG\\_ICCT-Briefing\\_09022018\\_vF.pdf](https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf)
- HINICIO. (2020). Informe de evaluación de ciclo de vida de los vehículos hidrógeno eléctricos (hidrógeno y a batería). Recuperado de: <https://h2lac.org/portfolio-items/creacion-de-condiciones-del-ecosistema-del-hidrogeno-en-aplicaciones-de-movilidad-electrica-en-costa-rica/>
- Iannelli, L., Gil, S., & Prieto, R. (2018). Vehículos Híbridos a Gas (GNC). *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 41, 27–37. Recuperado de: <http://portalderevistas.unsa.edu.ar/ojs/index.php/erma/article/viewFile/1013/975>
- Isla-Martínez, P. (2017). Estudio comparativo de la huella de carbono de motores de encendido provocado alimentados con gasolina y bioetanol (Trabajo final de grado). Madrid: España. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: [https://oa.upm.es/45573/1/TFG\\_PATRICIA\\_ISLA\\_MARTINEZ.pdf](https://oa.upm.es/45573/1/TFG_PATRICIA_ISLA_MARTINEZ.pdf)
- Jang, J. J., & Song, H. H. (2015). Well-to-wheel analysis on greenhouse gas emission and energy use with petroleum-based fuels in Korea: gasoline and diesel. *International*



- Journal of Life Cycle Assessment, 20. 1102-1116. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0911-x>
- KIA Motors. (n.d.-a). Ficha Técnica - KIA Soul EV. Recuperado de: KIA Motors: <https://www.marcali.com/kia-producto/images/carros/218/Kia-KIA-SOUL-EV.pdf>
- KIA Motors. (n.d.-b). Webpage: KIA Soul. Recuperado de: <https://www.kia.com/ec/showroom/nuevo-soul/features.html>
- KIA Motors. (n.d.-c). Webpage: KIA Soul EV. Recuperado de: <https://www.kia.com/ec/showroom/soul-ev.html>
- Km77. (n.d.-a). Webpage: KIA Soul Concept 1.6 GDi 132 CV Eco-Dynamics (2014-2016) | Precio y ficha técnica. Recuperado de: <https://www.km77.com/coches/kia/soul/2014/estandar/concept/soul-2014/datos>
- Km77. (n.d.-b). Webpage: KIA Soul Eléctrico (2014-2017) | Precio y ficha técnica. Recuperado de: <https://www.km77.com/coches/kia/soul/2014/estandar/electrico/soul-ev/datos>
- Kumar, L., & Jain, S. (2014). Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 924–940. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.014>
- Kuo, G. (2019). When Fossil Fuels Run Out, What Then? - MAHB. Recuperado de: <https://mahb.stanford.edu/library-item/fossil-fuels-run/>
- Leach, F., Kalghatgi, G., Stone, R., & Miles, P. (2020). The scope for improving the efficiency and environmental impact of internal combustion engines. *Transportation Engineering*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2020.100005>
- Martinez, I. (n.d.). Fuel Properties. Retrieved from Madrid, España: [http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c15/Fuel\\_properties.pdf](http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c15/Fuel_properties.pdf)
- Messagie, M. (2015). Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles. Recuperado de: <https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/TE%20-%20draft%20report%20v04.pdf>
- Moro, A., & Helmers, E. (2017). A new hybrid method for reducing the gap between WTW and LCA in the carbon footprint assessment of electric vehicles. *International Journal of Life Cycle Assessment*. 22. 4-14. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0954-z>
- NREL-U.S. (2012). Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Recuperado de: <https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56487.pdf>
- Ozdemir, A., Koc, I. M., & Sumer, B. (2020). Comparative study on Well-to-Wheels emissions between fully electric and conventional automobiles in Istanbul. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 87, 102508. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102508>
- Parra-Narváez, R. (2015). Factor de emisión de CO2 debido a la generación de electricidad en el Ecuador durante el periodo 2001-2014. *ACI Avances en Ciencias e Ingenierías*, 7(2), 2–5. <https://doi.org/10.18272/aci.v7i2.269>

- Pérez-Martínez, P. J., Miranda, R. M., Andrade, M. F., & Kumar, P. (2020). Air quality and fossil fuel driven transportation in the Metropolitan Area of Sao Paulo. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 5. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100137>
- Prado-Carpio, E., & Castro-Armijos, C. J. (2017). Energy Intensity of Ecuador and Estimate of Carbon Footprint. *Revista Universidad Y Sociedad*, 9(2), 232–236. Recuperado de: <http://scielo.sld.cu/pdf/rus/v9n2/rus31217.pdf>
- Reich, N. H., Alsema, E. A., van Sark, W. G. J. H. M., & Nieuwlaar, E. (2007). CO2 Emissions of PV in the perspective of a Renewable Energy Economy. 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, (September), 3538–542. Recuperado de: <https://dspace.library.uu.nl/bitstream/handle/1874/27301/NWS-E-2007-150.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Román-Collado, R., Sanz-Díaz, M. T., & Loja-Pacheco, C. (2021). Towards the decarbonisation of Ecuador: a multisectoral and multiregional analysis of its carbon footprint. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(38), 53412–53431. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14521-1>
- Shen, W., Han, W., & Wallington, T. J. (2014). Current and future greenhouse gas emissions associated with electricity generation in China: Implications for electric vehicles. *Environmental Science and Technology*, 48(12), 7069–7075. <https://doi.org/10.1021/es500524e>
- Tuza-Chamorro, D. D. (2021). Análisis del sector eléctrico ecuatoriano: Estado actual y perspectivas (Trabajo de grado previo a la obtención del título de Ingeniero en Mantenimiento Eléctrico). Ibarra:Ecuador. Universidad Técnica del Norte. Recuperado de: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11566>
- Vera, J. F., Clairand, J. M., & Bel, C. Á. (2017). Public policies proposals for the deployment of electric vehicles in Ecuador. In 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America, ISGT Latin America 2017 (Vol. 2017-Janua, pp. 1–6). <https://doi.org/10.1109/ISGT-LA.2017.8126718>