

Artículo Científico

Análisis de escenarios potenciales de desarrollo para el parque automotor de Bolivia y sus emisiones de gases efecto invernadero en el software LEAP para el periodo 2020-2030

Analysis of Potential Development Scenarios for Bolivia's Vehicle Fleet and its Greenhouse Gas Emissions using the LEAP Software for the 2020–2030 Period

 Sergio Adrián Maraño Rodríguez¹.  Carlos Ariel Alejandro Fernández²

¹ Tesista investigador. Universidad Católica Boliviana. Cochabamba, Bolivia. sermaro9906@gmail.com

² MSc. Ing. Ambiental - Consultor asociado, Energética, Cochabamba, Bolivia. caa.fernandez@uliege.be

RESUMEN

El presente estudio analiza el aporte del parque automotor boliviano a las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para el periodo 2020-2030, a través de la modelación de escenarios en la plataforma LEAP. Se caracterizó el parque automotor utilizando una metodología bottom-up, procesando la información en matrices de consumo, rendimiento y kilometraje. Se estableció un escenario base (Business As Usual, BAU), así como tres escenarios alternativos: eficiencia vehicular, teletrabajo y electromovilidad. Los resultados muestran que la electromovilidad permitiría una reducción del 9% en emisiones al 2030, la eficiencia un 4% y el teletrabajo un 2%. Se evidenció que los vehículos privados, especialmente los pesados, son los mayores emisores. Este trabajo busca servir como insumo técnico para el diseño de políticas públicas orientadas a la reducción de emisiones del sector transporte.

Palabras clave: LEAP, emisiones, CO₂eq, parque automotor, Bolivia, escenarios.

ABSTRACT

This study analyzes the contribution of the Bolivian vehicle fleet to greenhouse gas (GHG) emissions for the period 2020-2030, through scenario modeling in the LEAP platform. The vehicle fleet was characterized using a bottom-up methodology, processing the information in consumption, performance and mileage matrices. A base scenario (Business As Usual, BAU) and three alternative scenarios were established: vehicle efficiency, telework and electromobility. The results show that electromobility would allow a 9% reduction in emissions by 2030, efficiency by 4% and telework by 2%. It was found that private vehicles, especially heavy vehicles, are the biggest emitters. This work seeks to serve as technical input for the design of public policies to reduce emissions in the transportation sector.

Keywords: LEAP, emissions, CO₂eq, vehicle fleet, Bolivia, scenarios.

Citar como: Maraño Rodríguez, S.A., Fernández, C.A. Análisis de escenarios potenciales de desarrollo para el parque automotor de Bolivia y sus emisiones de gases efecto invernadero en el software LEAP para el periodo 2020-2030. *Journal Boliviano De Ciencias*, 21(57) 6-28. <https://doi.org/10.52428/20758944.v21i57.1334>

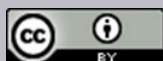
Recepción: 16/05/2025

Aprobación: 12/06/2025

Publicado: 30/06/2025

Declaración: Derechos de autor 2025 Maraño Rodríguez, S.A., Fernández, C.A. Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución 4.0. Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento. [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



1. INTRODUCCIÓN

El transporte ha sido un motor del desarrollo humano, pero su evolución hacia sistemas motorizados ha generado importantes impactos ambientales, especialmente por el uso de combustibles fósiles. Actualmente, el sector transporte es uno de los mayores emisores globales de gases de efecto invernadero (GEI), contribuyendo al cambio climático y sus efectos negativos sobre la salud, el ambiente y la economía.

En la actualidad, el 79% de las unidades del PA se concentran en el eje central del país.

(INE, 2020). La mayoría de los vehículos se encuentran registrados como privados con un 92,8%, seguidamente, los automóviles registrados como públicos y oficiales ocupan 5,5% y 1,7% respectivamente (INE, 2020). En cuanto al consumo energético del PA, el Balance Energético Nacional (BEN) muestra un consumo prácticamente duplicado de 2006 a 2018 (Figura 1). Existen únicamente registros de combustibles fósiles utilizados en el sector, dejando de lado combustibles alternativos.

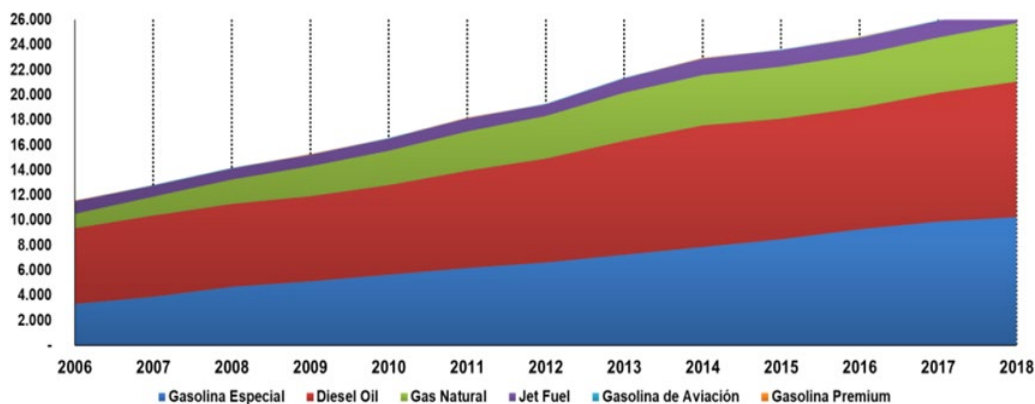


Figura 1. Evolución del consumo y tipo energético del sector transporte 2006-2018 expresado en Kbp. Fuente: Ministerio de Hidrocarburos, 2019.

Los combustibles fósiles más dominantes son la gasolina especial con un 37,82% y el diésel con 39,88%, que totalizan el 77,7% del consumo total (Figura 2). Bajo esta perspectiva, la matriz energética del transporte está basada íntegramente en combustibles fósiles. Es importante señalar que los datos relacionados al transporte del BEN engloban al sector transporte en su totalidad. En otras palabras, se incluyen automóviles, aviones y trenes (Ministerio de Hidrocarburos, 2019).

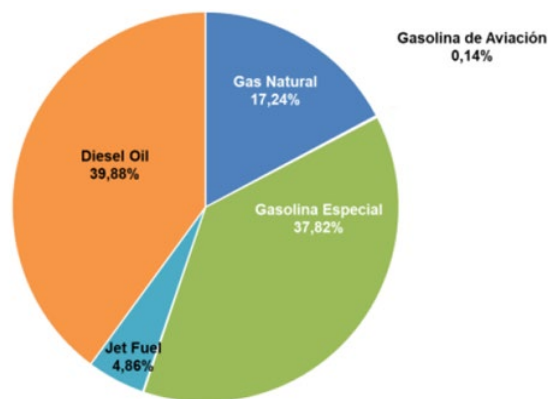


Figura 2. Detalle de la matriz energética en el sector transporte expresado en porcentaje para el año 2018. Fuente: Ministerio de Hidrocarburos, 2019.

Según el IPCC, el transporte representó en 2014 el 14% de las emisiones globales de GEI. Aunque Bolivia no destaca por su volumen de emisiones, es uno de los países más vulnerables al cambio climático en Sudamérica, debido a factores como pobreza, deforestación y la presencia de ecosistemas frágiles como glaciares tropicales.

Sin embargo, el país carece de inventarios actualizados de emisiones del transporte. Los últimos registros oficiales datan de 2006 y 2008, con escasos estudios recientes y poca modelación prospectiva a nivel nacional.

Ante esta situación, el presente estudio se propuso estimar el aporte actual y futuro del parque automotor boliviano a las emisiones de GEI entre 2020 y 2030, utilizando el software LEAP (Low Emissions Analysis Platform). Se definieron cuatro escenarios: uno de línea base (Business As Usual) y tres alternativos basados en eficiencia vehicular, reducción del uso mediante teletrabajo, y adopción de electromovilidad.

Los objetivos específicos fueron: (1) caracterizar el PA y su consumo energético, (2) estimar emisiones en un escenario tendencial, y (3) modelar y comparar los escenarios de mitigación. Esta investigación busca aportar una base técnica y replicable para la toma de decisiones públicas, contribuyendo a la planificación energética y climática del país.

2. METODOLOGÍA

La investigación adoptó un enfoque cuantitativo-descriptivo y de tipo proyectivo, utilizando la plataforma LEAP (Low Emissions Analysis Platform) como herramienta para modelar el comportamiento energético y las emisiones del parque automotor boliviano entre 2020 y 2030. El estudio se estructuró en cinco etapas fundamentales: (1) caracterización del parque automotor, (2) construcción y validación de la base de datos, (3) Desarrollo y análisis del escenario Business as Usual (BAU), (4) modelación de escenarios alternativos en LEAP, y (5) análisis comparativo de resultados.

2.1 Caracterización del parque automotor

Esta etapa consistió en la recopilación y organización de datos provenientes de diversas instituciones públicas bolivianas, como el Instituto Nacional de Estadística (INE), el Ministerio de Hidrocarburos y el Ministerio de Energías. Se utilizaron principalmente boletines estadísticos, rendiciones de cuentas, balances energéticos y bases de datos disponibles públicamente. Con base en estos insumos, se definieron niveles de desagregación del parque automotor utilizando como referencia los lineamientos del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Esta segmentación fue adaptada a la disponibilidad local de datos y diseñada para ser compatible con los requerimientos del software LEAP. Así, se logró una estructuración eficiente de la información, facilitando su posterior procesamiento y modelación.

2.2 Construcción de la base de datos

Una vez recopilados los datos, se construyó una base de datos estructurada en Microsoft Excel, empleando una metodología bottom-up que permitió una desagregación detallada. Esta etapa se desarrolló a través de la construcción de cuatro matrices clave:

- **Matriz A:** Contiene el inventario de vehículos clasificados por tipo de combustible y año, abarcando el periodo 2003–2016. Los datos fueron tomados del documento del INE “Estadísticas del parque automotor 2003-2016”. Esta matriz permitió identificar tendencias históricas y participaciones por tipo de vehículo y combustible.
- **Matriz B:** Recoge los rendimientos vehiculares ($\text{km}\cdot\text{L}^{-1}$), transformados a $\text{L}\cdot\text{km}^{-1}$, obtenidos de fuentes como la Environmental Protection Agency (EPA) y el Ministerio de Energía de Chile. En casos donde la información fue limitada, como con vehículos a GNV, se recurrió a estudios especializados.
- **Matriz C:** Calcula el kilometraje diario promedio por vehículo (KVR) mediante un promedio ponderado. Este fue construido a partir de estudios locales en las ciudades de Cochabamba y La Paz, representativas del 41% del PA nacional en 2008.
- **Matriz D:** Integra las matrices anteriores para estimar el consumo diario y anual de combustible, mediante la fórmula , donde C representa el consumo en litros (L), Q la cantidad de vehículos (adimensional), D el rendimiento ($\text{L}/\text{Km}/\text{Vehículo}$) y R el kilometraje diario (Km). Esta fórmula fue adaptada específicamente para el estudio a partir de lo proporcionado en la página de la EPA (2021b). Esta información se validó contra el Balance Energético Nacional (BEN), manteniendo una diferencia dentro del $\pm 3\%$.

En el caso de vehículos a GNV, se realizaron ajustes adicionales para reflejar con mayor precisión su cantidad real (considerando datos de la Entidad Ejecutora de Conversión a GNV), y se aplicó la ley de Boyle para corregir las condiciones de presión del gas, garantizando coherencia entre las distintas fuentes de datos.

2.3 Análisis de los datos procesados

La tercera etapa comprendió un análisis estadístico para validar y proyectar los datos de consumo energético. Inicialmente, se verificó la consistencia entre las estimaciones del modelo y los datos reportados por el BEN. Se eliminaron años atípicos que generaban desviaciones anómalas y se aplicó una regresión lineal para proyectar los datos correspondientes a 2017 y 2018 (Triola, 2018, p. 472). Esta proyección se formuló mediante una ecuación de regresión simple, asegurando que las predicciones se mantuvieran dentro de un margen de error aceptable de $\pm 3\%$. Los resultados proyectados fueron comparados con los datos reales para validar la fiabilidad del modelo. Una vez verificada su consistencia, se extendieron las proyecciones hasta el año 2030, utilizando la misma metodología.

2.4. Desarrollo y análisis del escenario Business as Usual (BAU)

Durante esta etapa se construyó el escenario de referencia denominado Business as Usual (BAU), que representa la evolución natural del parque automotor sin políticas adicionales de intervención. Este escenario estableció una línea base para comparar los impactos de los escenarios alternativos. Se definió como año base el 2016, por ser el año más reciente con datos desagregados disponibles. El periodo de análisis fue de 10 años, y las proporciones de vehículos se mantuvieron según la clasificación establecida en la matriz A. Se aplicaron factores de emisión por defecto del IPCC para los gases CO₂, CO, NO_x y CO₂eq, utilizando un horizonte de potencial de calentamiento global de 100 años.

Además, se modeló un perfil de sobrevivencia del parque vehicular mediante una función exponencial con constante de -0,004, y se estableció un perfil de edad del parque automotor basado en datos del INE. Este modelo fue introducido en LEAP y validado buscando un coeficiente de correlación mayor a 0,85 respecto al modelo previamente elaborado en Excel. El escenario BAU se convirtió en la base comparativa para evaluar el impacto de políticas alternativas de mitigación.

2.5. Modelación de escenarios alternativos en LEAP

La etapa final involucró la formulación y simulación de tres escenarios alternativos de política pública orientados a la reducción de emisiones del PA. Estos escenarios fueron modelados en LEAP para el periodo 2017–2030.

El **Escenario A**, denominado “Plan de revisión técnica vehicular”, propuso mejoras progresivas en el rendimiento energético de los vehículos mediante la implementación de controles técnicos obligatorios. Se simuló un incremento del rendimiento del 5% entre 2017 y 2025, y del 10% hasta 2030, utilizando la función *Step* en LEAP.

El **Escenario B**, titulado “Políticas de movilidad urbana e incentivos de reducción de circulación privada”, planteó medidas como el fomento del teletrabajo y restricciones a la circulación de vehículos privados. El efecto de estas políticas se simuló mediante la función *Interp*, que permitió representar la reducción en el kilometraje y ventas de vehículos.

El **Escenario C**, “Introducción de electromovilidad”, modeló la incorporación progresiva de vehículos eléctricos al parque automotor nacional. La simulación se basó en proyecciones de crecimiento utilizando la función *Growth*, considerando tendencias internacionales y condiciones nacionales favorables, como la aparición de la empresa Quantum.

Los tres escenarios fueron evaluados en función de tres variables principales: demanda energética final, stock vehicular y emisiones de CO₂, CO, NO_x y CO_{2eq}. Esta evaluación permitió cuantificar el impacto de cada estrategia y establecer bases sólidas para la formulación de políticas públicas de mitigación ambiental en el sector transporte.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Caracterización del Parque Automotor

La caracterización del parque automotor (PA) boliviano se estructuró bajo una jerarquía de desagregación de cuatro niveles que permiten captar con mayor precisión la diversidad del parque vehicular y sus implicancias energéticas y ambientales (Figura 6). El primer nivel distingue los vehículos por el tipo de servicio que prestan: público, privado y oficial. Esta clasificación, adoptada del Instituto Nacional de Estadística (INE), aunque no completamente coherente con la Ley N°165 —que solo reconoce los tipos público y privado—, fue utilizada para garantizar la compatibilidad con las fuentes estadísticas nacionales.

El segundo nivel clasifica los vehículos según su masa y capacidad de carga: ligeros y pesados. Esta distinción es crucial, ya que influye directamente sobre el rendimiento energético, el kilometraje y las emisiones. El tercer nivel agrupa los vehículos por modelo y función —como motocicletas, camionetas, buses o camiones— y considera aspectos como la cilindrada y el uso operativo. Finalmente, el cuarto nivel considera el tipo de combustible utilizado, centrado en los tres más representativos: gasolina, diésel y gas natural vehicular (GNV).

Este esquema fue construido a partir de metodologías reconocidas internacionalmente. Por ejemplo, el IPCC propone hasta seis niveles de desagregación, pero diversos autores han optado por simplificaciones similares a las utilizadas en este estudio. Rivera-González *et al.* (2020), Maduekwe *et al.* (2020) y Shabbir & Ahmad (2010) argumentan que estas simplificaciones son necesarias en contextos con limitaciones en disponibilidad y calidad de datos. En el caso boliviano, se optó por una estructura suficiente para garantizar una modelación funcional en LEAP, sin comprometer la capacidad explicativa del modelo.

3.2. Evolución del Consumo de Combustibles (2003–2016)

El análisis de la matriz A reveló un dominio sostenido de la gasolina como principal combustible del PA boliviano durante el periodo 2003–2016, con una participación superior al 50% en todos los años y llegando a representar hasta el 70% en algunos segmentos, particularmente en vehículos ligeros privados. El diésel mostró una tendencia decreciente, cayendo del 25% en 2004 al 13% en 2016, mientras que el GNV tuvo una participación modesta, aunque creciente, sin superar el 4% del

parque total durante el periodo (vale la pena aclarar que el INE toma en cuenta solo a los vehículos que funcionan a GNV de fábrica y no así los convertidos). Los vehículos eléctricos y sin especificar (S.E.) ocuparon porcentajes prácticamente inexistentes (0,001) y fueron descartados para los cálculos futuros. (Figura 3).

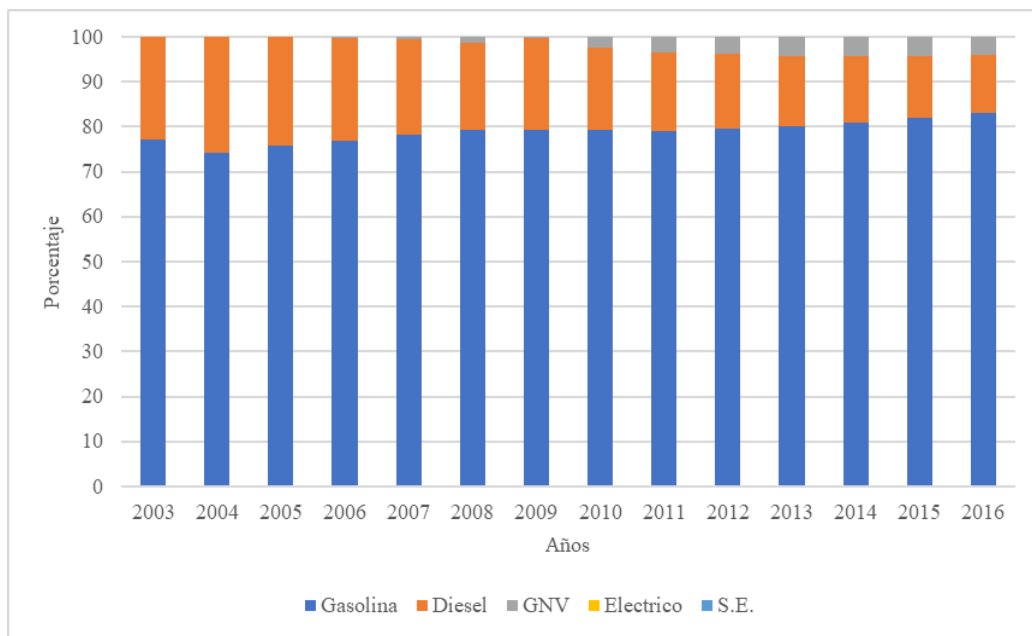


Figura 3. Distribución histórica del parque automotor de Bolivia en función al porcentaje de combustibles y correspondiente al periodo 2003-2016.

Fuente: Elaboración propia con base en el INE.

Estos hallazgos son consistentes con estudios como los de Rochabrun (2019), Martínez-Jaramillo *et al.* (2017) y Rivera-González *et al.* (2020), quienes también destacan la prevalencia de la gasolina en América Latina. En Bolivia, esta predominancia puede explicarse por la política de subsidios, el menor precio relativo de la gasolina (alrededor de 0,54 USD/L en 2020 según OLADE), y la escasa infraestructura de carga eléctrica o abastecimiento masivo de GNV.

El impacto ambiental de esta tendencia es significativo. La combustión de gasolina genera grandes volúmenes de CO₂, CO y NO_x, además de hidrocarburos no quemados y material particulado fino (PM2.5), todos ellos asociados a enfermedades respiratorias y cardiovasculares (EIA, 2020; Canada Government, 2017). En el caso del diésel, las emisiones incluyen también SO_x y compuestos orgánicos volátiles como benceno y formaldehído, cuya toxicidad es ampliamente reconocida (US EPA, 2015).

3.3. Rendimiento y Kilometraje de los Vehículos

La matriz B permitió estimar los rendimientos energéticos de 35 configuraciones vehiculares, agrupados por tipo de combustible y por periodo (1985–2022). Los

vehículos más eficientes fueron las motocicletas y automóviles, con consumos promedio de $0,045 \text{ L}\cdot\text{km}^{-1}$, mientras que los camiones y buses alcanzaron hasta $0,690 \text{ L}\cdot\text{km}^{-1}$, confirmando una correlación negativa entre peso vehicular y eficiencia (Tabla 1).

Tabla 1. Rendimientos seleccionados para el estudio.

Modelo/Gasolina	Rendimiento ($\text{L}\cdot\text{Km}^{-1}$)
Automóvil	0,045
Jeep/Vagoneta	0,074
Furgón	0,230
Camioneta	0,099
Moto/Quadra Track	0,045
Ómnibus/Microbús/Minibús	0,125
Camión/Torpedo/Tracto-Camión	0,242
Trimóvil de carga	0,045
Modelo/Diésel	Rendimiento ($\text{L}\cdot\text{Km}^{-1}$)
Automóvil	0,092
Jeep/Vagoneta	0,238
Furgón	0,303
Camioneta	0,260
Moto/Quadra Track	0,069
Ómnibus/Microbús/Minibús	0,353
Camión/Torpedo/Tracto-Camión	0,690
Trimóvil de carga	0,348
Modelo/GNV	Rendimiento ($\text{L}\cdot\text{Km}^{-1}$)
Automóvil	0,132
Jeep/Vagoneta	0,207
Furgón	0,600
Camioneta	0,500
Moto/Quadra Track	0,035
Ómnibus/Microbús/Minibús	0,890
Camión/Torpedo/Tracto-Camión	0,890

Fuente: Elaboración propia.

Estos valores están en línea con lo reportado por Sandhu *et al.* (2021), Thiruvengadam *et al.* (2018) y Jiang *et al.* (2018), quienes demuestran que los vehículos pesados, especialmente los que transportan carga, tienen rendimientos significativamente menores debido a su masa, arrastre aerodinámico y frecuencias de aceleración. Aunque las fuentes utilizadas —como la EPA y el Ministerio de Energía de Chile— son de alta calidad, su validez local es limitada. Como indica

Maduekwe *et al.* (2020), el uso de datos calibrados para el país en estudio mejora la robustez del modelo.

En cuanto al kilometraje diario, la matriz C reveló que los ómnibus, microbuses y minibuses son los que más circulan diariamente (hasta 174 km-día⁻¹), seguidos de los automóviles con 129 km-día⁻¹ (Tabla 2). Estos datos ponderados por ciudad se obtuvieron de estudios en La Paz y Cochabamba, y reflejan adecuadamente la realidad operativa del transporte público y privado urbano. La antigüedad de estos vehículos —muchos con más de 30 años— agrava su impacto ambiental, como se reporta en Koch (2013) y Rocabado (2017).

Tabla 2. Kilómetros diarios recorridos por categoría de vehículos.

Modelo	Km-día ⁻¹				
	Datos considerados por categoría	La Paz	Datos considerados por categoría	Cochabamba	Promedio ponderado
Automóvil	Particular	125,33	Particular publico	131,76	128,94
	Radiotaxi				
	Taxi				
Jeep Vagoneta	Vagoneta	20	Jeep Vagoneta	17,33	18,50
Furgón	Camiones	34	Camiones	8,15	19,50
Camioneta	Particular	20	Camioneta	13,08	16,12
Moto Quadra Track	Particular	20	Motocicletas	18,40	19,10
Ómnibus	Trufi	200,67	Publico	153,38	174,14
Microbús	Minibús		Micro		
Minibús	Micro		Minibús		
Camión Torpedo Tracto-Camión	Camiones	34	Camiones	8,15	19,50
Trimóvil de carga		-	Motocicletas	18,40	10,32

Fuente: Elaboración propia con base en Pareja *et al.* (2012) y Spiess Herbts (2008).

3.4. Validación del Modelo frente al BEN (2006–2016)

La validación del modelo se llevó a cabo mediante la comparación de los resultados simulados con los datos del BEN para el periodo 2006–2016. Se excluyeron los años 2003–2005 debido a la incompatibilidad entre los balances energéticos utilizados (BEN 2000–2014 vs. BEN 2006–2018), lo que introducía diferencias metodológicas significativas que afectaban la coherencia de los resultados.

Para el caso de la gasolina, la diferencia promedio entre el modelo y los datos del BEN fue de 3,82%, considerada aceptable, especialmente porque las líneas de tendencia eran paralelas. El incremento sostenido del consumo de gasolina de 0,6 a 1,65 mil millones de litros entre 2006 y 2016 también fue capturado por el modelo, reforzando su validez predictiva (Figura 4). En cuanto al diésel, el modelo reflejó correctamente los cambios debidos a factores como la importación y disponibilidad del combustible, con un coeficiente de correlación de 0,96 (Figura 5). El GNV mostró una variación positiva continua, atribuida a los programas de conversión vehicular, y fue el combustible con mayor crecimiento relativo en el periodo (Figura 6).

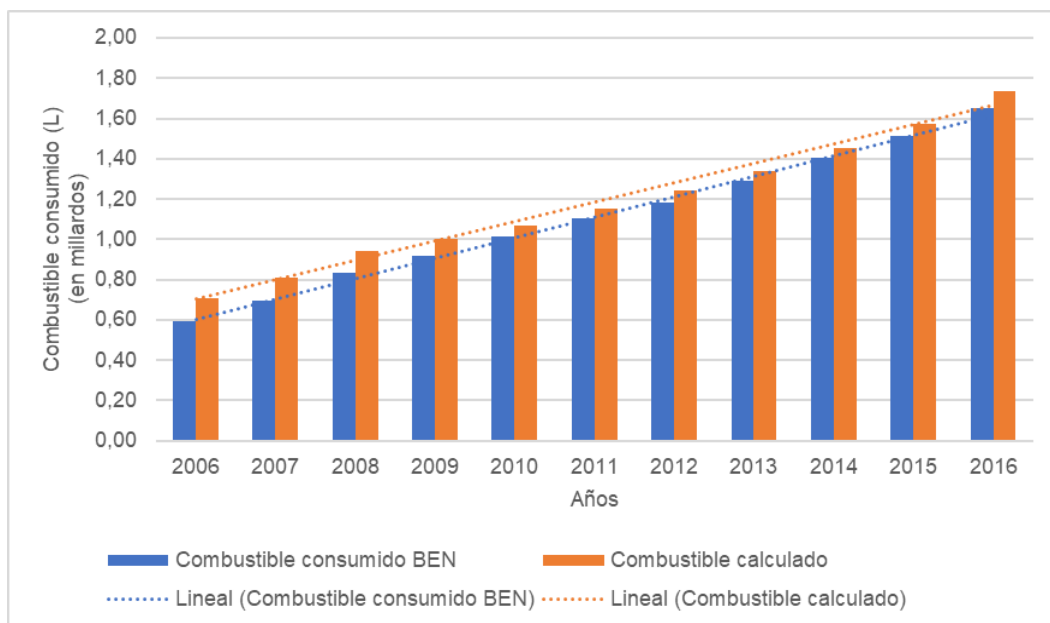


Figura 4. Consumo anual de gasolina (expresado en millones de litros) según el BEN y según el modelo generado. Fuente: Elaboración propia con base en el BEN 2006-2018.

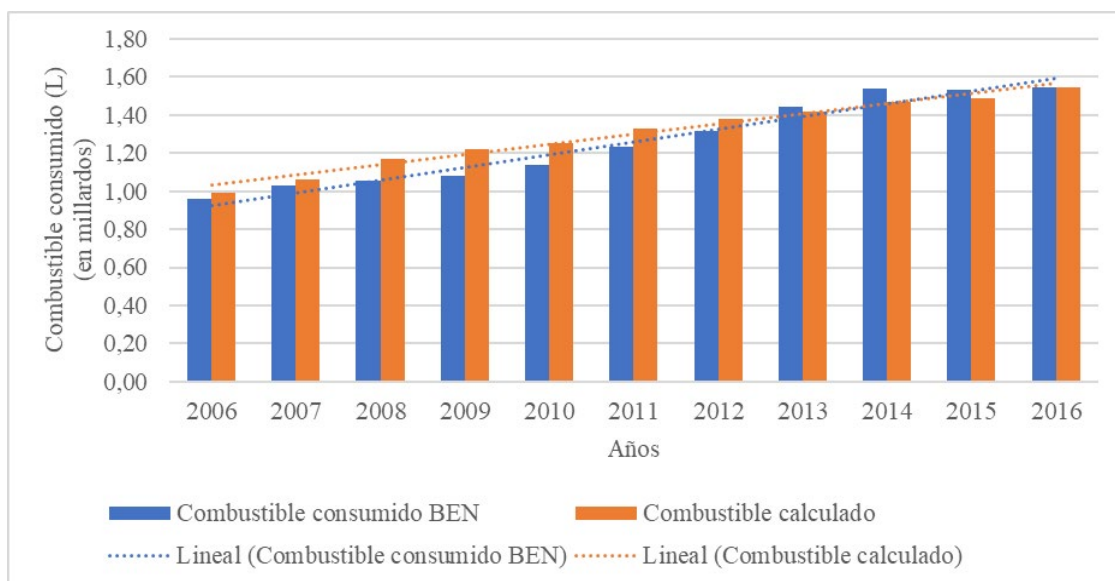


Figura 5. Diésel registrado (en millones de litros) vs diésel calculado (en millones de litros). Fuente: Elaboración propia con base en el BEN 2006-2018.

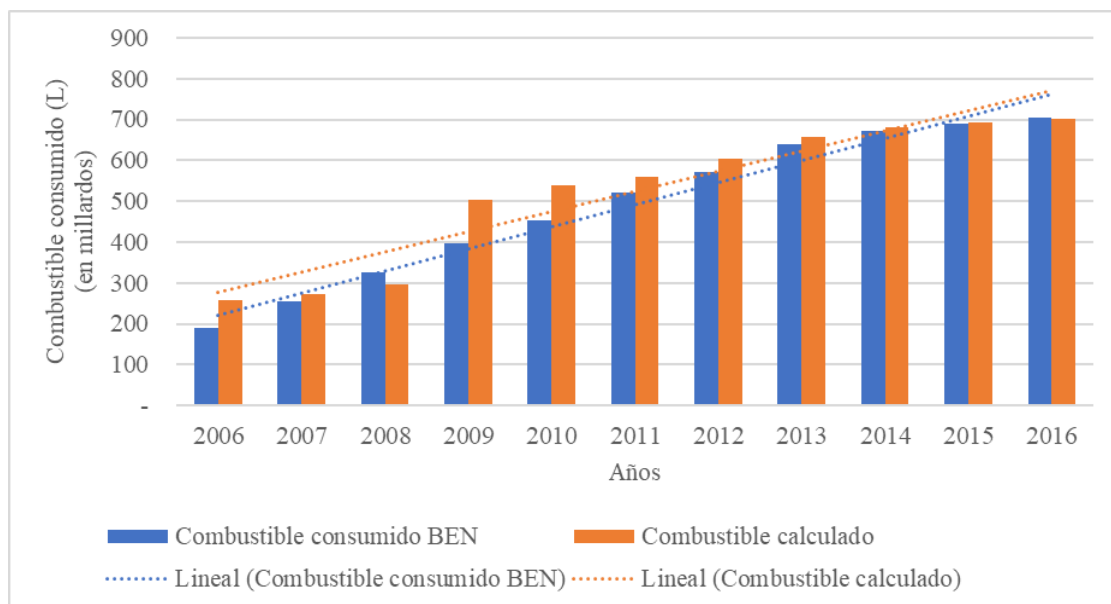


Figura 6. Gas natural vehicular registrado (en millones de litros) vs gas natural vehicular calculado (en millones de litros). Fuente: Elaboración propia con base en el BEN 2006-2018.

Se calcularon coeficientes de correlación para cada combustible: 0,99 para gasolina, 0,96 para diésel y 0,97 para GNV, lo que indica un alto grado de ajuste del modelo frente a los datos reales.

3.5. Proyección de Consumo Energético (2020–2030)

Según las proyecciones energéticas (Tabla 3), para el año 2030 se prevé que la gasolina retome la posición dominante en el mix de consumo energético vehicular, superando al diésel que había liderado en 2020. El GNV mostrará una participación del 17%, manteniéndose como una opción en crecimiento gracias a su menor costo y políticas de incentivo. La evolución proyectada se alinea con lo planteado por Stratas Advisors (2015) y Van den Steen (2018) sobre la expansión del GNV en América Latina.

Tabla 3. Proyecciones del periodo 2020-2030.

Años	Gasolina (KBEP)	Diésel (KBEP)	GNV (KBEP)
2020	11.513,94	12.331,95	5.071,09
2021	12.053,84	12.690,67	5.254,71
2022	12.593,74	13.049,39	5.438,33
2023	13.133,64	13.408,11	5.621,95
2024	13.673,54	13.766,83	5.805,56
2025	14.213,44	14.125,55	5.989,18
2026	14.753,34	14.484,27	6.172,80
2027	15.293,24	14.842,99	6.356,41
2028	15.833,14	15.201,71	6.540,03
2029	16.373,04	15.560,44	6.723,65
2030	16.912,95	15.919,16	6.907,27

Fuente: Elaboración propia.

El crecimiento en el uso de gasolina y GNV está representado en los anexos 3 y 4, respectivamente. El anexo 5 resume la proyección de demanda energética total, que se espera se duplique de 20.000 a casi 40.000 KBEP entre 2016 y 2030, con los vehículos privados pesados liderando el consumo debido a su bajo rendimiento y alto kilometraje.

3.6. Escenario de Referencia (Business as Usual)

En el escenario Business as Usual (BAU), se proyecta que el parque automotor boliviano superará los tres millones de unidades hacia 2030 (Figura 7). Esta expansión estará dominada por los vehículos privados ligeros, seguidos por los privados pesados y públicos. El análisis de ciclo de vida del parque reveló una alta presencia de vehículos antiguos —más del 10% supera los 30 años— con escasa renovación debido a barreras económicas y administrativas.

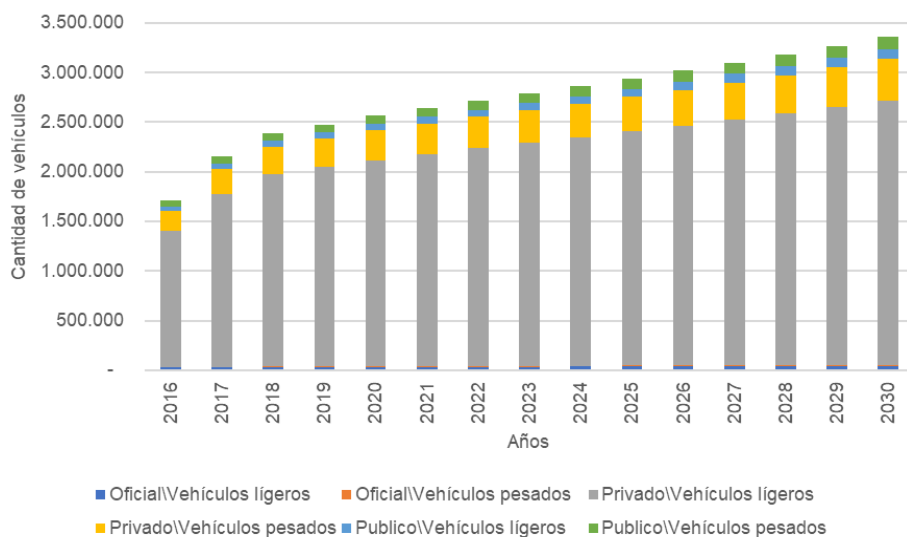


Figura 7. Existencias de vehículos para el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

El modelo incorporó perfiles de sobrevivencia de hasta 47 años, lo que resulta superior al estándar utilizado por Maduekwe et al. (2020) (45 años), pero reflejando de manera más realista la antigüedad del PA en Bolivia. Las Figuras 8 a 11 muestran la evolución de emisiones de CO₂, CO, NO_x y CO₂eq bajo este escenario, revelando un crecimiento sostenido en todos los gases contaminantes.

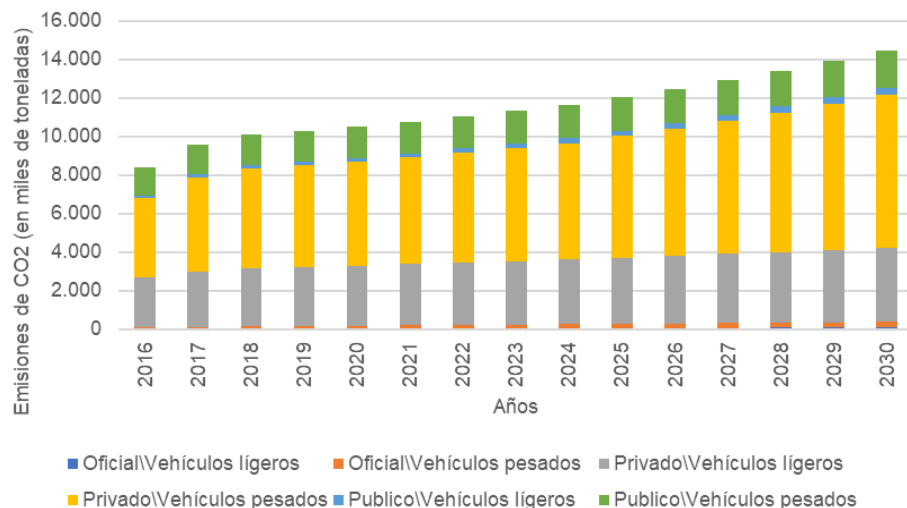


Figura 8. Cantidad de CO₂ calculado (expresado en miles de toneladas) para el periodo 2016-2030 subdividida en servicio y clase. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

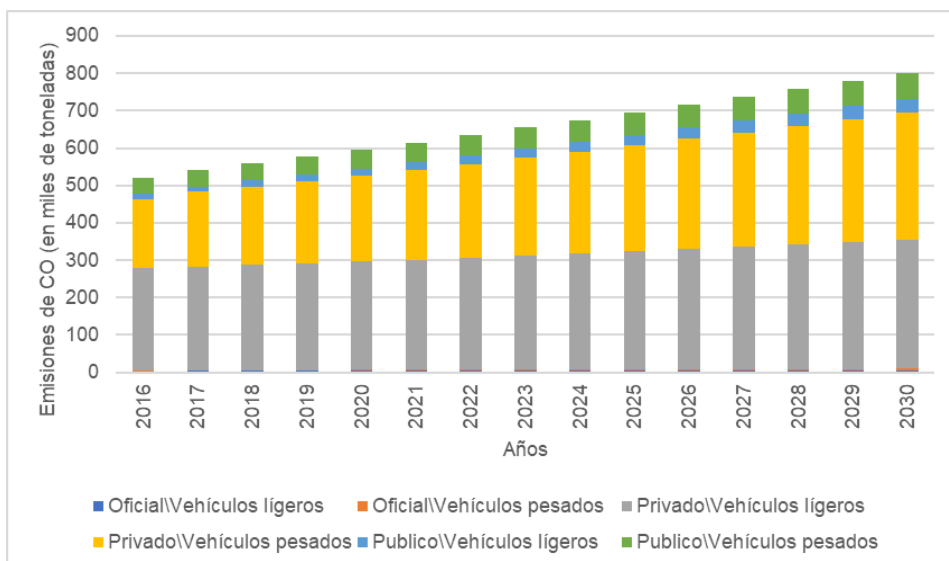


Figura 9. Cantidad de CO calculado (expresado en miles de toneladas) para el periodo 2016-2030 subdividida en servicio y clase. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

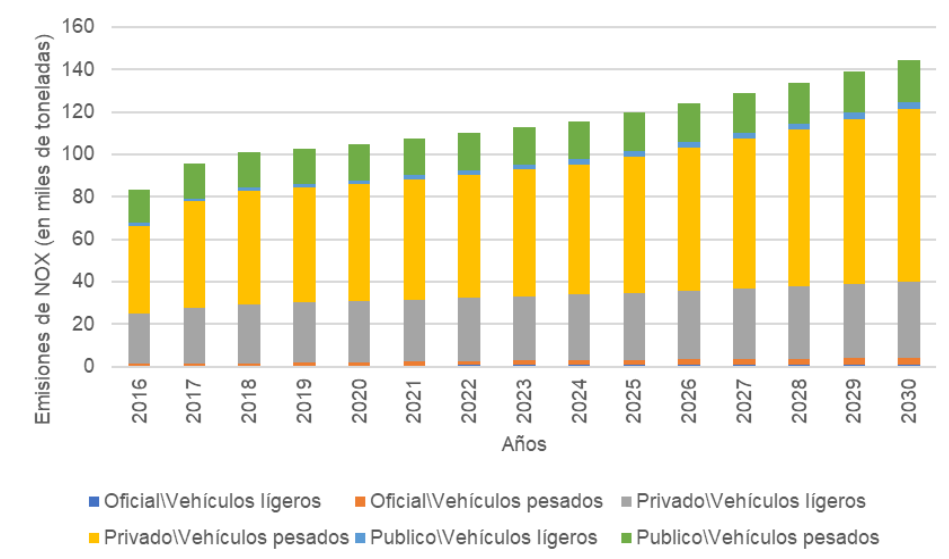


Figura 10. Cantidad de NO_x calculado (expresado en miles de toneladas) para el periodo 2016-2030 subdividida en servicio y clase. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

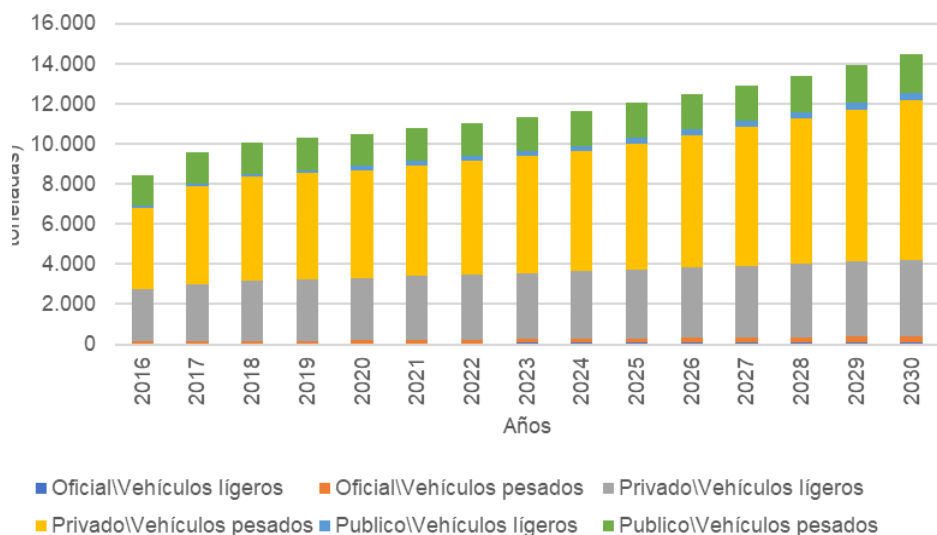


Figura 11. Cantidad de CO₂eq calculado (expresado en miles de toneladas) para el periodo 2016-2030 subdividida en servicio y clase.

Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

3.7. Emisiones de Gases de Efecto Invernadero

Las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) del PA en 2030 se estimaron en 14.471 mil toneladas, siendo responsables principales los vehículos privados pesados y ligeros, que en conjunto explican el 81% del total (Figura 8). Este patrón se mantiene durante todo el periodo, reforzando el papel clave del sector privado en las emisiones de GEI.

Las emisiones de monóxido de carbono (Figura 9) y óxidos de nitrógeno (Figura 10) también muestran incrementos, particularmente en el sector oficial, con aumentos del 214% y 198% respectivamente. Estas cifras reflejan tanto el crecimiento de existencias como la falta de políticas de control en este subsector.

3.8. Análisis de Escenarios

Se modelaron tres escenarios alternativos a partir del BAU:

Escenario A: Mejora del rendimiento.

Este escenario se basa en inspecciones técnicas y mantenimiento vehicular, con aumentos de eficiencia de 5% hasta 2025 y 10% hasta 2030, aplicado a vehículos privados ligeros. La demanda energética se redujo en un 4% (Figura 12) y las emisiones de CO₂ en la misma proporción (Figura 13). También se registró una disminución del 8,38% en CO (Figura 14) y del 3,5% en NO_x (Anexo 13). Estos resultados son comparables a los obtenidos por Trofimenko *et al.* (2019) en Rusia.

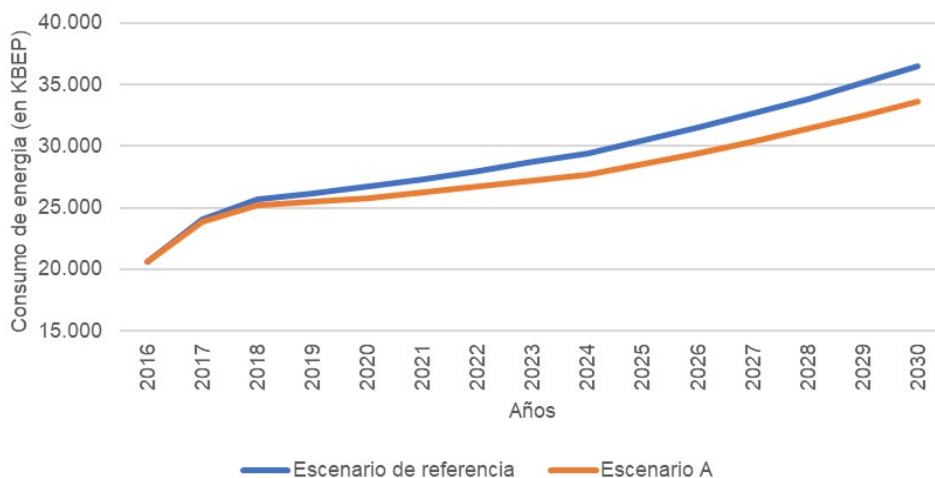


Figura 12. Demanda de unidades finales de energía (expresada en KBEP) del escenario A y el escenario de referencia para el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

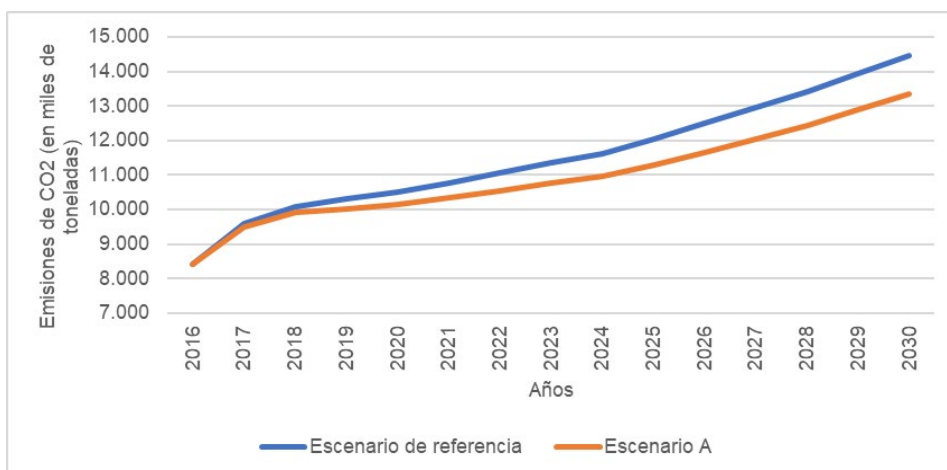


Figura 13. Cantidad de CO calculado (expresado en miles de toneladas) para el escenario A y el escenario de referencia en el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

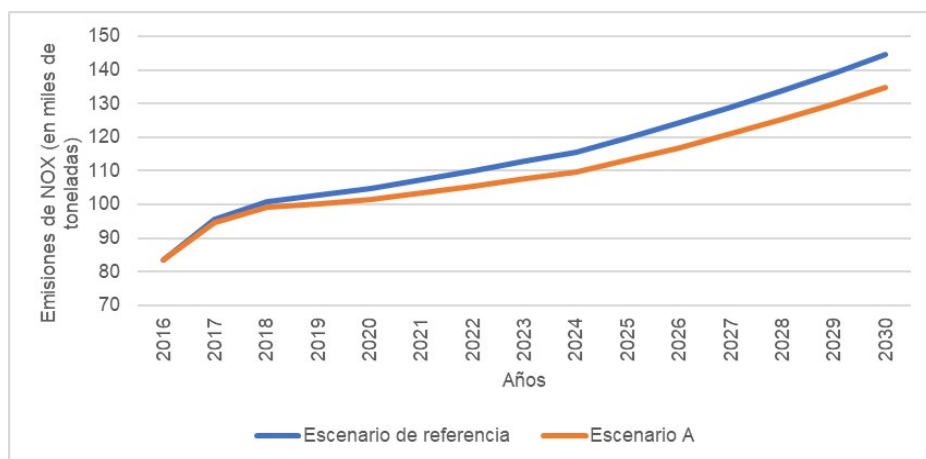


Figura 14. Cantidad de NOX calculado (expresado en miles de toneladas) para el escenario A y el escenario de referencia en el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

Escenario B: Teletrabajo.

Considera una reducción de kilómetros recorridos y ventas, especialmente tras la expansión del teletrabajo post-pandemia. Las emisiones de GEI se redujeron en un 2,19% (Figura 16), en línea con lo hallado por Lila & Anjaneyulu (2017) en India y Martínez-Jaramillo *et al.* (2017) en México.

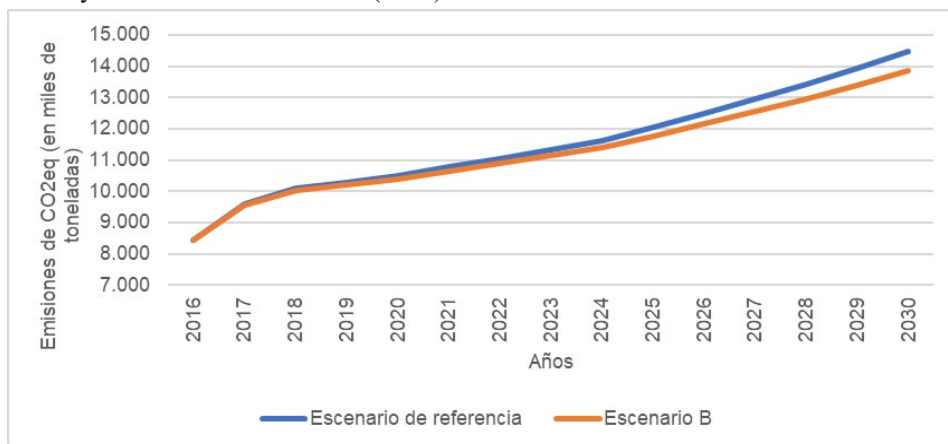


Figura 15. Cantidad de CO_{2eq} calculado (expresado en miles de toneladas) para el escenario B y el escenario de referencia en el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

Escenario C: Electromovilidad.

Plantea una transición progresiva a vehículos eléctricos, con un objetivo del 20% de ventas hacia 2030. Logró la mayor reducción de emisiones: 9,65% en CO_{2eq} (Anexo 15), 17,98% en CO (Anexo 16) y 8,81% en NO_x (Anexo 17). Sin embargo, este escenario depende de una infraestructura energética sólida y renovable, lo cual actualmente no está garantizado en Bolivia.

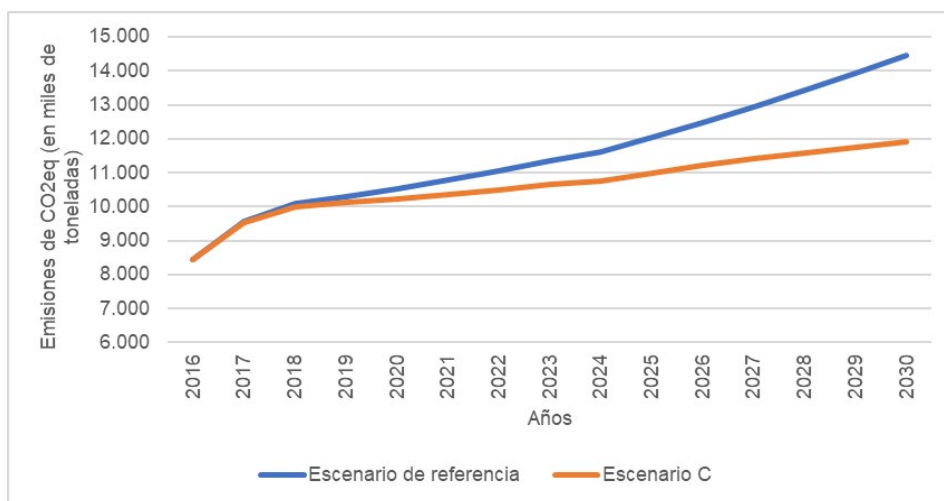


Figura 16. Cantidad de CO_{2eq} calculado (expresado en miles de toneladas) para el escenario C y el escenario de referencia en el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

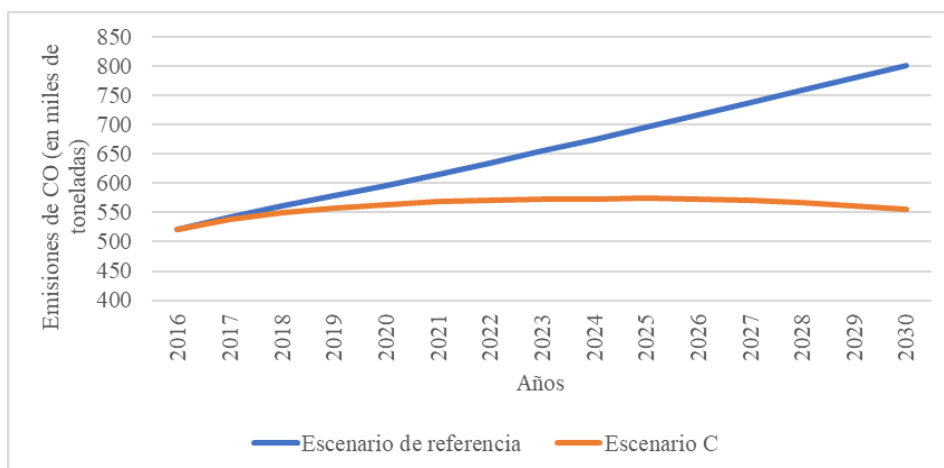


Figura 17. Cantidad de CO calculado (expresado en miles de toneladas) para el escenario C y el escenario de referencia en el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

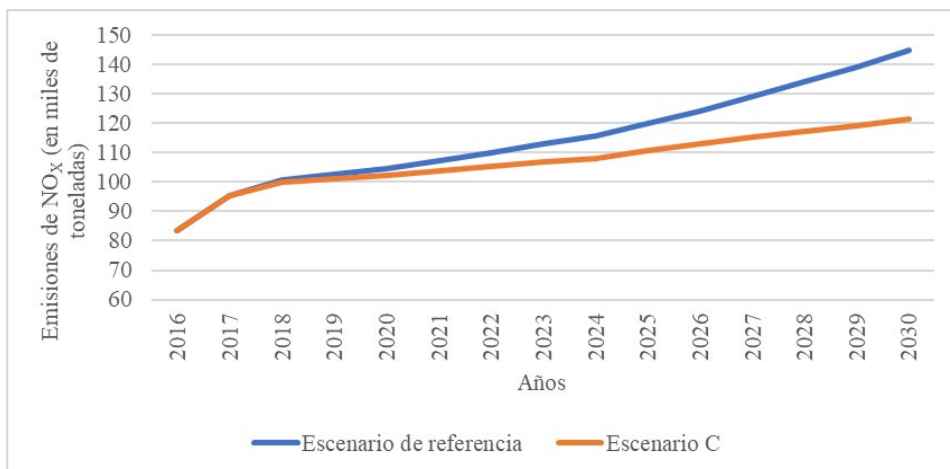


Figura 18. Cantidad de NO_x calculado (expresado en miles de toneladas) para el escenario C y el escenario de referencia en el periodo 2016-2030. Fuente: Elaboración propia con base en LEAP.

La Tabla 4 resume las reducciones logradas por cada escenario, comparadas con el escenario de referencia. El escenario C fue el más efectivo en términos de reducción de energía y emisiones, seguido por el escenario A. El escenario B, aunque con menor impacto, se distingue por su factibilidad sociopolítica y bajo costo de implementación.

Tabla 4. Comparación porcentual de reducción frente al escenario BAU al 2030

Escenario	Demanda energética	CO ₂	CO	NO _x	CO _{2eq}
A	-4,00%	-4,00%	-8,38%	-3,53%	-4,00%
B	-2,24%	-2,19%	-2,00%	-2,19%	-2,19%
C	-7,46%	-6,96%	-5,94%	-6,76%	-6,95%

Fuente: elaboración propia.

La comparación de los tres escenarios sugiere que ninguna medida por sí sola es suficiente para reducir significativamente las emisiones del PA. Por lo tanto, se propone una política integrada que combine inspecciones técnicas, adopción progresiva de electromovilidad y fortalecimiento del teletrabajo. Esta estrategia mixta permitiría abordar las emisiones desde múltiples frentes, al tiempo que mejora la eficiencia energética, reduce la demanda de combustibles fósiles y promueve una matriz energética más limpia.

4. CONCLUSIONES

La caracterización del parque automotor (PA) boliviano mostró una estructura dominada por vehículos livianos privados, los cuales representan más del 90% del total de unidades en circulación. Se identificó una marcada dependencia de

combustibles fósiles —gasolina (37,8%) y diésel (39,9%)—, lo que implica un consumo energético creciente en el sector transporte. Esta tendencia se traduce en una matriz de movilidad altamente contaminante y poco eficiente. Las matrices A (existencias), B (rendimientos) y C (kilometraje), construidas con base en datos del INE y otras fuentes técnicas, permitieron estimar con precisión la evolución de la demanda energética desde una perspectiva bottom-up, consolidando así una [base de datos](#) sólida para la modelación de emisiones.

A través de la modelación en LEAP, se proyectó que las emisiones de CO₂ equivalente del PA podrían alcanzar 14.470,76 kilotoneladas en 2030 si no se implementan medidas correctivas. Este crecimiento está correlacionado con el aumento del parque vehicular y la inercia tecnológica de vehículos de bajo rendimiento. Los mayores contribuyentes a las emisiones fueron los camiones, minibuses y automóviles particulares. Las estimaciones se validaron estadísticamente mediante comparación con el Balance Energético Nacional (BEN), logrando un alto nivel de correlación, lo cual respalda la robustez del escenario base planteado.

Los tres escenarios alternativos mostraron diferentes niveles de eficacia en la reducción de emisiones. El escenario de eficiencia vehicular logró una disminución del 4% en CO₂eq al 2030, gracias a mejoras en el rendimiento del parque. El escenario de teletrabajo, que simuló una reducción del 10% del kilometraje privado, logró una disminución más modesta (2%), pero factible y de bajo costo. Finalmente, el escenario de electromovilidad demostró el mayor potencial, con una reducción del 9% en emisiones para el mismo año, evidenciando la necesidad de políticas estructurales a largo plazo. La comparación entre escenarios subraya la importancia de combinar estrategias para lograr un impacto más significativo.

La investigación permitió estimar con alta fidelidad el impacto actual y futuro del parque automotor boliviano en las emisiones de gases de efecto invernadero, evidenciando una tendencia creciente bajo condiciones de continuidad. A través de la modelación en LEAP, se desarrollaron escenarios prospectivos que demostraron que es posible reducir significativamente las emisiones del sector transporte mediante políticas de eficiencia, cambios en los patrones de movilidad y, especialmente, una transición hacia la electromovilidad. El estudio constituye un insumo técnico útil para la planificación energética nacional, alineado con los compromisos climáticos internacionales, y subraya la urgencia de implementar medidas integrales de descarbonización del transporte.

5. REFERENCIAS

Bolivia en tus Manos. (2021, septiembre 3). *¿Se venden más autos usados que 0 Km en Bolivia?* | *boliviaentusmanos*. <https://www.boliviaentusmanos.com/noticias/economia/381715/se-venden-mas-autos-usados-que-0-km-en-bolivia.html>

Canada Government. (2017, mayo 4). *Fuels and Air Pollution* [Education and awareness]. <https://www.canada.ca/en/health-canada/services/environmental-workplace-health/fuels-air-pollution.html>

EPA. (2021a). *FuelEconomy.gov—The official U.S. government source for fuel economy information*. <http://www.fueleconomy.gov>

EPA. (2021b). *Many Factors Affect MPG*. <https://www.fueleconomy.gov/feg/factors.shtml>

INE. (2020). *Boletín estadístico: Parque automotor 2019*. INE.

IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (p. 157).

IPCC. (2018). *IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* (p. 630). IPCC. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/06/SR15_Full_Report_High_Res.pdf

IPCC. (2019). *IPCC Updates Methodology for Greenhouse Gas Inventories—IPCC*. <https://www.ipcc.ch/2019/05/13/ipcc-2019-refinement/>

IPCC WG I. (2014). *Glosario en: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* (p. 222). IPCC. https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf

IPCC WG III, Sokona, Y., Minx, J. C., Farahani, E., Kadner, S., Seyboth, K., Adler, A., Baum, I., Brunner, S., Eickemeier, P., Kriemann, B., Savolainen, J., Schlömer, S., Von Stechow, C., Zwickel, T., Edenhofer, O., & Pichs-Madruga, R. (2015). *Contribución del Grupo de trabajo III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático: Resumen para responsables de políticas*.

Jiang, Y., Yang, J., Cocker, D., Karavalakis, G., Johnson, K. C., & Durbin, T. D. (2018). Characterizing emission rates of regulated pollutants from model year 2012+ heavy-duty diesel vehicles equipped with DPF and SCR systems. *Science of The Total Environment*, 619–620, 765–771. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.120>

Jorquera González, H. (2018). *Introducción a la contaminación atmosférica* (Alfaomega grupo editor S.A. de C.V.). Ediciones UC.

Koch, F. (2013). *Historia y actualidad del transporte público en Bolivia en el contexto del cambio climático*. https://www.cambioclimatico-bolivia.org/index-cc.php?filtros=2&cod_aporte=210#210

Ley General de Transporte, Ley N°165 del 16 de agosto del 2011 (2011). <https://www.bivica.org/file/view/id/1594>

Lila, P. C., & Anjaneyulu, M. V. L. R. (2017). Networkwide Impact of Telework in Urban Areas: Case Study of Bangalore, India. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 143(8), 05017004. <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000061>

- Maduekwe, M., Akpan, U., & Isihak, S. (2020). Road transport energy consumption and vehicular emissions in Lagos, Nigeria: An application of the LEAP model. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 6, 100172. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100172>
- Ministerio de Hidrocarburos. (2019). Balance energético nacional (BEN) 2006-2018. Ministerio de Hidrocarburos.
- Ministerio de Energía de Chile. (2012). *Comparador: Consumo Vehicular*. <http://www.consumovehicular.cl/comparador#/>
- Morales, J., Rodríguez, G., Rivera, N., & Bermeo, K. (2020). Caracterización del parque automotor perteneciente a la categoría M1 del cantón cuenca en función a sus propiedades constructivas y niveles de emisión. *RISTI - Revista Iberica de Sistemas e Tecnologías de Informacao*, 2020(E30), 393–402.
- Pareja, A., Hinojosa, M., & Luján, M. (2012). Inventario de Emisiones Atmosféricas Contaminantes de la Ciudad de Cochabamba, Bolivia, año 2008. *Acta Nova*, 5(3), 344–373.
- Rivera-González, L., Bolonio, D., Mazadiego, L. F., Naranjo-Silva, S., & Escobar-Segovia, K. (2020). Long-Term Forecast of Energy and Fuels Demand Towards a Sustainable Road Transport Sector in Ecuador (2016–2035): A LEAP Model Application. *Sustainability*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/su12020472>
- Rochabrun, M. (2019, marzo 26). South America resists electric vehicles as local fuels remain in favor. *Reuters*. <https://www.reuters.com/article/us-brazil-cars-electric-idUSKCN1R72XQ>
- Royston, S., Selby, J., & Shove, E. (2018). Invisible energy policies: A new agenda for energy demand reduction. *Energy Policy*, 123, 127–135. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.052>
- Sandhu, G. S., Frey, H. C., Bartelt-Hunt, S., & Jones, E. (2021). Real-world activity, fuel use, and emissions of heavy-duty compressed natural gas refuse trucks. *Science of The Total Environment*, 761, 143323. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143323>
- Shabbir, R., & Ahmad, S. S. (2010). Monitoring urban transport air pollution and energy demand in Rawalpindi and Islamabad using leap model. *Energy*, 35(5), 2323–2332. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.025>
- Skrucany, T., Kendra, M., Stopka, O., Milojević, S., Figlus, T., & Csiszar, C. (2019). Impact of the Electric Mobility Implementation on the Greenhouse Gases Production in Central European Countries. *Sustainability*, 11, 4948. <https://doi.org/10.3390/su11184948>
- Spiess Herbts, N. (2008). *Inventario de Emisiones del Municipio de La Paz, Bolivia 2007*. Proyecto aire limpio.
- Stratas Advisors. (2015, julio 10). *Alternative Fuels for HDVs in Latin America*. <https://stratasadvisors.com/Insights/2015/Alternative-Fuels-HDV-Latin-America>

Thiruvengadam, A., Besch, M., Padmanaban, V., Pradhan, S., & Demirgok, B. (2018). Natural gas vehicles in heavy-duty transportation-A review. *Energy Policy*, 122, 253–259. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.07.052>

Triola, M. (2018). Estadística—12ED (12.a ed.). Pearson Educación de México, S.A. de C.V., 2018. https://www.academia.edu/39339522/Estad%C3%ADstica_Mario_F_Triola_12ED

Trofimenko, Y. V., Komkov, V. I., Donchenko, V. V., & Potapchenko, T. D. (2019). Model for the assessment greenhouse gas emissions from road transport. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences (PEN)*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.21533/pen.v7i1.390>

U.S. Energy Information Administration. (2016). *Annual Energy Outlook 2016 With Projections to 2040*. CreateSpace Independent Publishing Platform.

U.S. Energy Information Administration (EIA). (2020a). *Gasoline and the environment*. <https://www.eia.gov/energyexplained/gasoline/gasoline-and-the-environment.php>

U.S. Energy Information Administration (EIA). (2020b, diciembre 2). *Diesel fuel and the environment*. <https://www.eia.gov/energyexplained/diesel-fuel/diesel-and-the-environment.php>

Van Den Steen, F. (2018, junio 27). *Natural gas fuels the future in Latin America* [Text]. Global Fleet. <https://www.globalfleet.com/en/financial-models-technology-and-innovation/latin-america/features/natural-gas-fuels-future-latin>