

DOCUMENTO DE TRABAJO N° IDB-WP- 01797

Costos de la electromovilidad en América Latina y el Caribe

Santiago Sánchez González
Jessica Camacho
M. Eugenia Rivas
Agustina Calatayud

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Transporte

Febrero 2026



Costos de la electromovilidad en América Latina y el Caribe

Santiago Sánchez González
Jessica Camacho
M. Eugenia Rivas
Agustina Calatayud

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Transporte

Febrero 2026



<http://www.iadb.org>

Copyright © 2026 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Costos de la electromovilidad en América Latina y el Caribe

Resumen

Este estudio estima los costos de transición hacia la movilidad eléctrica en América Latina y el Caribe (ALC) hasta 2050, bajo tres escenarios de penetración de la flota eléctrica: *optimista, moderado y pesimista*¹. El análisis se enfoca exclusivamente en la electrificación de automóviles de pasajeros y buses, considerando crecimiento económico, proyecciones poblacionales, depreciación de la flota de buses e incrementos en la tasa de motorización derivados del desarrollo económico proyectado. Metodológicamente, el estudio se estructura en dos bloques: *i)* la estimación de la penetración de la movilidad eléctrica en el transporte privado (automóviles de pasajeros) y *ii)* la estimación de la penetración en el transporte público urbano.

En el transporte privado, se proyecta que la región podría alcanzar entre 68 y 127 millones de vehículos eléctricos e híbridos enchufables hacia 2050, lo que representaría entre el 27% y el 50% de la flota total. La infraestructura de carga pública necesaria para abastecer esta flota requeriría una inversión de USD 1.500 millones, equivalente al 0,018% del Producto Interno Bruto (PIB) regional anual.

En el caso del transporte público, se estima que los buses eléctricos podrían representar aproximadamente dos tercios de la flota total bajo el escenario moderado. Alcanzar este nivel de electrificación requeriría inversiones anuales del orden de USD 3.000 millones, incluyendo los costos de infraestructura de carga, lo que equivale aproximadamente al 0,036% del PIB regional. La transición hacia un sistema de transporte público 100% eléctrico para 2050 requeriría una inversión anual del 0,061% del PIB regional, considerando tanto la adquisición de los buses eléctricos como la infraestructura de carga asociada. Este monto representa un incremento del 33% respecto al costo de la renovación de la flota basada en buses de combustión interna.

En conjunto, este estudio proporciona una base cuantitativa para la planificación de políticas públicas en la región, con énfasis en los costos contables de la movilidad eléctrica. El análisis excluye los beneficios operativos, ambientales y de salud, los cuales podrían mejorar significativamente la relación costo-beneficio de la movilidad eléctrica en ALC.

Palabras clave: Electromovilidad; infraestructura, transporte público, transporte privado, buses eléctricos, automóviles eléctricos

¹ Ver subsección 2.1.1.3 y 3.1.1.2 para detalle de la especificación de los escenarios.

Índice

Resumen	1
1 Introducción	3
2 Transporte privado	5
2.1.1 Metodología	6
2.1.2 Estimación de la flota de automóviles.....	6
2.1.3 Incremento de la demanda eléctrica.....	14
2.1.4 Necesidades de infraestructura de carga pública.....	15
2.1.5 Costos de infraestructura de carga de uso público	16
2.2 Resultados	17
3 Transporte público	23
3.1 Metodología	24
3.1.1 Estimación de sustitución de la flota de buses eléctricos.....	26
3.1.2 Demanda eléctrica	33
3.1.3 Costo de cargadores	34
3.2 Resultados	37
4 Limitaciones	45
5 Conclusiones	46
6 Apéndice	48
6.1 Apéndice A	48
6.2 Apéndice B	48
6.3 Apéndice C	51
6.4 Apéndice D	52
7 Referencias	53

1 Introducción

El sector transporte representa una cuarta parte de las emisiones totales de CO_2 a nivel mundial, siendo la segunda mayor fuente después de electricidad y calefacción (Calatayud et al., 2023). En América Latina y el Caribe (ALC), el transporte representa aproximadamente el 40% de las emisiones relacionadas a energía (Calatayud et al., 2023). En ALC, donde el 80% de la población vive en zonas urbanas, la transición hacia una movilidad eléctrica cobra especial relevancia para reducir emisiones y mejorar la calidad del aire, aprovechando que la región cuenta con una de las redes energéticas más limpias del mundo, donde el 45% de la matriz energética es hidroeléctrica (Cavallo et al., 2020). En línea con los compromisos asumidos en las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDCs, por sus siglas en inglés) y los planes nacionales de descarbonización, los países de la región han establecido metas concretas para la penetración tecnológica de vehículos eléctricos al año 2030. El cumplimiento de estas metas implica la necesidad de realizar inversiones significativas, tanto por parte del sector público como de los usuarios finales, para adoptar tecnologías de cero y bajas emisiones.

Diversos estudios recientes respaldan la urgencia de avanzar en la transición hacia la electromovilidad en ALC, tanto desde una perspectiva ambiental como económica. Según la ICCT (Kohli et al., 2022), la región enfrenta importantes barreras como el alto costo inicial de los vehículos eléctricos y la falta de infraestructura, aunque algunos países ya han adoptado políticas avanzadas de apoyo. OLADE (2024) proporciona un monitoreo detallado del progreso en infraestructura y flotas, destacando la necesidad de una planificación coordinada a nivel regional. En el ámbito del transporte público, C40 Cities (2023) revela que, a pesar del crecimiento acelerado en la incorporación de buses eléctricos, estos aún representan menos del 5% de la flota total urbana. Por su parte, UNEP (2024) estima que una sustitución masiva de buses y taxis podría generar ahorros por US\$64 mil millones en combustible para 2030, además de reducir significativamente las emisiones y muertes prematuras. Finalmente, experiencias locales como la estrategia de movilidad eléctrica de Mexicali (Johnson et al., 2020) ilustran cómo los marcos estratégicos municipales pueden facilitar la implementación progresiva de soluciones sostenibles, alineadas con las necesidades urbanas y los compromisos climáticos nacionales.

Este estudio analiza las inversiones requeridas de infraestructura de carga pública y flota de transporte público—incluyendo la infraestructura de carga asociada al transporte público—para la transición hacia un sistema de transporte eléctrico en ALC, estructurándose en dos temáticas principales: el costo de transición en el transporte privado y en el transporte público.² De esta manera, el estudio no se limita a inversiones que se hacen con recursos públicos ni de operadores privados. Asimismo, si bien se reconoce que el origen de los recursos y diferencias de regulaciones son relevantes para las decisiones de inversiones en la transición hacia una movilidad eléctrica, estas no son del alcance del estudio. Por el contrario, el análisis se centra en determinar los costos asociados a infraestructura de carga

² Nótese que este estudio se limita a un análisis de automóvil y buses. En este documento, el término transporte privado se refiere a los automóviles, mientras que transporte público hace referencia a los buses.

pública y flota de transporte público—incluyendo la infraestructura de carga asociada al transporte público—que garanticen su buen funcionamiento.

Por su parte, si bien la metodología para cada temática es independiente, ambos análisis buscan estimar tres componentes fundamentales: el tamaño de la flota total³ existente y futura, el incremento en la demanda eléctrica producto de la electrificación de la flota y el costo de la infraestructura de carga pública. Adicionalmente, en el caso del transporte público se estima el costo de sustitución de la flota a partir del análisis de flota actual y futura, ya que este costo formará parte de las inversiones requeridas por parte del sector público. El análisis considera una transición gradual hacia 2050, evaluada bajo tres escenarios de penetración de vehículos y buses eléctricos: *optimista, moderado y pesimista*.

A pesar de que el alcance de las secciones de transporte privado y público son similares, tienen algunas diferencias en su aplicación relevantes de señalar. Una distinción metodológica importante radica en el alcance geográfico del análisis: mientras el modelo del transporte privado se ejecuta a nivel país, la evaluación del transporte público se enfoca en ciudades. Esta diferenciación responde a que el transporte público eléctrico resulta más eficiente y competitivo en áreas urbanas densamente pobladas, donde confluyen tres factores clave: las menores velocidades reducen el consumo energético, el frenado frecuente facilita la regeneración de energía, y los beneficios medioambientales son más significativos debido a la concentración de la contaminación (Avenali et al., 2023). Consecuentemente, el análisis del transporte público abarca las 149 ciudades de la región con más de 500,000 habitantes.

Es importante señalar que este estudio se centra en determinar el costo contable de la transición hacia la electromovilidad. Este enfoque no incorpora los potenciales ahorros operativos ni los beneficios ambientales que podrían mejorar significativamente la relación costo-beneficio de esta transición. Un análisis económico más amplio que incluya costos de mantenimiento, externalidades ambientales y la reducción en el consumo de petróleo queda fuera del alcance de esta investigación.

El resto del documento se estructura en dos secciones principales que analizan el transporte privado y el transporte público respectivamente. La sección de transporte privado presenta la metodología para estimar la flota futura de vehículos eléctricos y tasas de motorización dadas las elasticidades respecto del ingreso, el costo de cumplimiento de metas de penetración de vehículos eléctricos, y el incremento de demanda eléctrica y los costos de infraestructura de carga de uso público. La sección de transporte público describe el modelo para calcular los costos de sustitución de la flota de las áreas urbanas dado el crecimiento poblacional y depreciación de los buses, la demanda eléctrica adicional, y finaliza con la estimación de los costos de la infraestructura de carga requerida. Finalmente, el documento presenta las conclusiones generales del análisis.

³ En adelante, flota total se refiere a la totalidad de la flota. Es decir, tanto eléctrica como de combustión interna.

2 Transporte privado

El transporte privado contribuye significativamente con las emisiones del sector transporte en ALC. Estimaciones para ciudades seleccionadas de la región indican que el automóvil genera el 67% de las emisiones de CO₂ de la movilidad urbana, a pesar de representar tan solo el 26% de los viajes (Giraldez et al., 2022). Este desbalance pone de manifiesto la necesidad de abordar los impactos del transporte privado de pasajeros en la región.

Además de las políticas orientadas a fomentar el cambio modal y a reducir la cantidad y la longitud de los viajes motorizados, la incorporación de nuevas tecnologías vehiculares constituye una línea de acción clave para mitigar dichos impactos. Sin embargo, la adopción de tecnologías de bajas emisiones en la región está muy rezagada en comparación con países referentes (Calatayud et al., 2023). En 2022, en ALC se registraron menos de 40 mil vehículos livianos 100% eléctricos (BEV, por sus siglas en inglés) e híbridos enchufables (PHEV, por sus siglas en inglés), mientras que en China se registraron 5,9 millones y en Europa y Estados Unidos se registraron 3,5 millones (IEA, 2023).

Con el fin de modernizar el transporte privado de pasajeros y reducir sus impactos asociados, algunos países de la región han empezado a definir metas relacionadas con la penetración de vehículos de cero y bajas emisiones. Buscando contribuir en la cuantificación de las inversiones requeridas, esta primera parte del estudio se enfocará en la estimación de los costos anuales asociados a la infraestructura de carga de uso público en los que deberá incurrir el sector público hasta el 2050 para permitir la transición a la electromovilidad en el transporte privado.

Teniendo en cuenta que los costos asociados a la adquisición de vehículos privados y la compra e instalación de puntos de carga en residencias privadas corresponderán principalmente a los usuarios de vehículos particulares⁴, el análisis de costos aquí presentado estará enfocado en la estimación de costos de infraestructura de carga de uso público para vehículos particulares. Esto se debe a que una red de cargadores de uso público es fundamental para reducir la ansiedad de carga entre los potenciales nuevos usuarios y permitir mayores niveles de penetración de vehículos eléctricos. Adicionalmente, se presentarán estimaciones del incremento de demanda eléctrica asociado a las proyecciones futuras de vehículos eléctricos, las cuales constituyen un punto de partida para estudios futuros que busquen estimar el impacto de la electromovilidad sobre el sector energético, incluyendo el análisis del costo de generación de esta electricidad adicional.

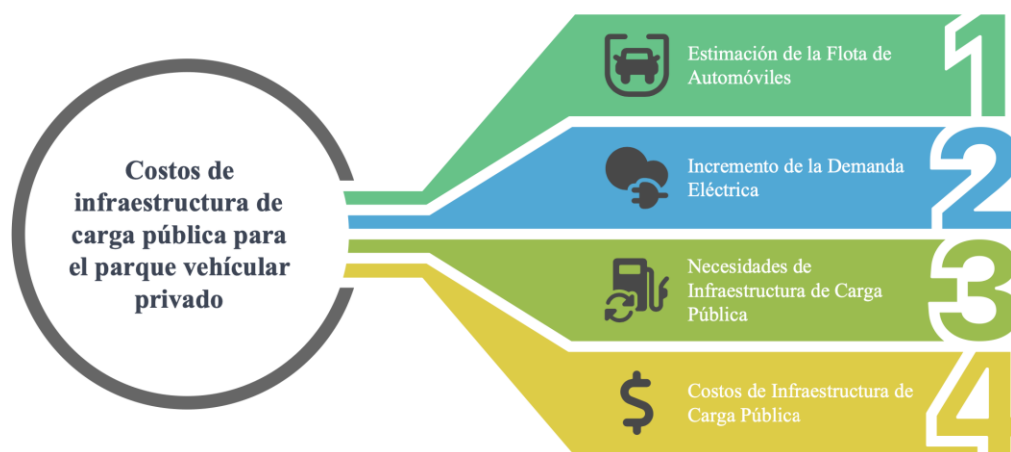
⁴ Aunque los costos de adquisición de los vehículos eléctricos privados corresponden principalmente a los usuarios, los gobiernos frecuentemente implementan incentivos monetarios y fiscales que permiten reducir los costos de adquisición de vehículos cero y bajas emisiones para los usuarios. No obstante, la estimación de los costos en los que incurren los gobiernos en la implementación de subsidios y reducciones de impuestos está fuera del alcance de este estudio.

2.1.1 Metodología

El cálculo de los costos asociados a la infraestructura de carga de uso público para vehículos particulares se divide en tres componentes principales: i) estimación de la flota actual y futura de vehículos livianos de cero y bajas emisiones, ii) estimación del incremento de demanda eléctrica asociado al crecimiento de la flota y iii) estimación del número de puntos de carga requeridos y su costo. El desarrollo de estos tres componentes fue guiado por la metodología desarrollada por el Consejo Internacional de Transporte Limpio (ICCT, por sus siglas en inglés) para cuantificar el déficit de infraestructura de carga en diversos países (Nicholas., 2019), (Nicholas y Lutsey., 2020), (Rajon Bernard y Lutsey., 2021). La metodología y su adaptación al caso de ALC se describe en mayor detalle en las siguientes secciones.

El Cuadro 1 representa los pilares en los que se ha construido la metodología. En primer lugar, se realiza la estimación de la flota vehicular actual y la proyección de acuerdo con el crecimiento económico y poblacional. En segundo lugar, se realiza una estimación del incremento de la demanda eléctrica teniendo en cuenta la proporción de la flota que se proyecta como eléctrica con base en las metas de los países y escenarios planteados en este trabajo. Seguido de esto, se aproximará la cantidad de cargadores requeridos de infraestructura pública con base en las estimaciones de flota eléctrica previamente establecidas. Finalmente, se determinará el costo de la infraestructura de carga pública.

Cuadro 1. Representación de la metodología del modelo de Transporte Privado



2.1.2 Estimación de la flota de automóviles

El número de vehículos eléctricos e híbridos enchufables en cada año de simulación es una de las principales variables de entrada para poder estimar las necesidades de infraestructura de carga. Para estimar la flota futura de vehículos eléctricos y enchufables, primero se

recopiló información sobre la flota actual total de vehículos livianos y los niveles de penetración actuales de vehículos eléctricos e híbridos enchufables en cada país de la región. Posteriormente, se implementó un modelo de motorización que permitió estimar el crecimiento de la flota total de vehículos livianos en cada país⁵ para cada año de simulación. A partir de las estimaciones sobre el crecimiento proyectado de la flota total, se estimó el porcentaje de vehículos nuevos que serían eléctricos e híbridos enchufables en cada año de simulación, permitiendo calcular la cantidad de vehículos eléctricos e híbridos enchufables que ingresarían a la flota cada año y el valor acumulado de estos vehículos. A continuación, se describe esta metodología con mayor nivel de detalle.

2.1.2.1 Estimación de la flota actual de vehículos livianos

Para cada país de la región, se recopilaron datos de la flota total de vehículos livianos, la flota de vehículos livianos eléctricos e híbridos enchufables, las ventas totales de vehículos livianos y las ventas de vehículos livianos eléctricos e híbridos enchufables.

Tabla 1. Datos de flota y penetración en ventas (2022)

País	Flota total	Flota BEV	Flota PHEV	Ventas Totales	Ventas BEV	Ventas PHEV
Brasil	44.334.092	13.294	12.489	1.957.690	8.458	10.348
México	36.496.879	8217	14.491	1.094.728	5.631	4.575
Argentina	14.566.354	4.401	57	380.874	260	57
Colombia	6.663.713	4.920	8.448	236.081	1.876	1.478
Chile	5.662.925	2.533	1.067	426.777	1.295	474
Perú	2.830.413	224	175	159.814	165	107
Ecuador	1.868.072	1.333	252	123.179	405	137
Panamá	896.282	289	321	38.976	160	50
Uruguay	976.540	1.689	624	52.063	1.016	282
Paraguay	996.742	357	372	32.602	210	150
Bolivia	1.277.045	100	-	41.058	100	-
El Salvador	934.705	176	-	54.071	85	-
Costa Rica	1.315.333	5.262	306	36.495	2.750	-
Guatemala	2.202.813	198	-	56.932	82	-
Honduras	1.156.990	-	-	78.993	-	-
Nicaragua	550.000	675	90	3.480	-	-
Belice	52.750	25	-	-	-	-
República Dominicana	1.706.966	2.331	281	92.450	760	51
Trinidad y Tobago	485.029	252	-	15.751	141	-
Jamaica	811.389	150	-	50.786	-	-
Bahamas	222.005	200	-	1.688	-	-
Barbados	120.000	690	-	3.200	257	-

⁵ Venezuela fue excluido del análisis debido a la falta de datos y proyecciones de PIB per cápita necesarios para implementar el modelo de motorización. Guyana también fue excluido por su reciente crecimiento acelerado en los valores de PIB per cápita, lo cual generaba proyecciones muy elevadas de motorización.

País	Flota total	Flota BEV	Flota PHEV	Ventas Totales	Ventas BEV	Ventas PHEV
Haití	95.843	-	-	3.690	-	-
Surinam	203.184	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia con datos oficiales de los países, asociaciones de empresas automotores, publicaciones sobre electromovilidad en la región y artículos de noticias.

2.1.2.2 Estimación de la flota futura de vehículos livianos

El crecimiento de la flota total de vehículos livianos se calculó a partir del modelo de motorización desarrollado por Dargay et al (2007), el cual fue estimado originalmente a partir de datos históricos (1960-2002) de más de 45 países que incluyen al 75% de la población mundial. El modelo permite calcular la elasticidad de la tasa de motorización (vehículos por cada 1,000 habitantes) para cada año en cada país en función de su ingreso per cápita.

Siguiendo el modelo, la elasticidad en el largo plazo de la tasa de motorización para un país determinado se puede calcular a partir de la Ecuación 1:

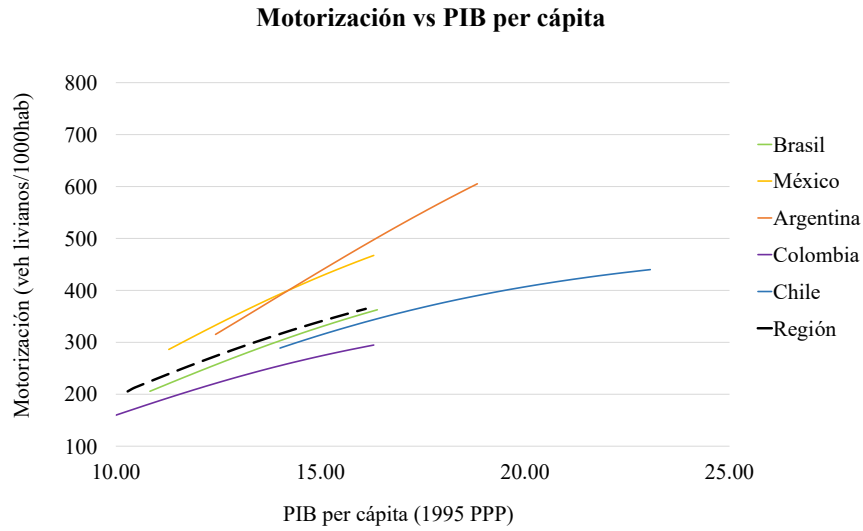
$$\eta_{c,t} = \alpha \beta_c \text{PIB}_{c,t} e^{\beta_c \text{PIB}_{c,t}} \quad (1)$$

Donde $\eta_{c,t}$ representa la elasticidad de la tasa de motorización para el país c en el año t , $\text{PIB}_{c,t}$ corresponde al valor de PIB per cápita del país c en el año t , α es un parámetro general del modelo relacionado con la tasa de motorización para los niveles más bajos de ingreso per cápita y β_c es un parámetro específico a cada país, que depende del nivel de ingreso per cápita al cual se alcanza la saturación en la tasa de motorización.

Para implementar el modelo de motorización, en este estudio se emplearon datos de PIB per cápita a 2022 del Banco Mundial. Adicionalmente, se tomaron proyecciones de crecimiento del PIB hasta el 2028 provenientes del Fondo Monetario Internacional y proyecciones entre 2029 y 2050 provenientes de la Organización para la Cooperación Internacional (OCDE) para países seleccionados. Para los países que no cuentan con proyecciones OCDE, se asumió que el crecimiento anual del PIB entre 2027 y 2028 permanecería constante hasta el 2050. El modelo permitió obtener valores de elasticidad de la motorización con respecto al ingreso per cápita para cada país, para cada año de simulación.

Partiendo de la tasa de motorización observada en el año 2022 en cada país (valores de flota total de la Tabla 1 divididos por la población en miles de habitantes), se aplicaron las elasticidades provenientes del modelo junto con las proyecciones de crecimiento de PIB 2022-2050, obteniendo las tasas anuales de motorización de cada país durante el periodo de simulación. Finalmente, para cada país y año de simulación, se multiplicaron las tasas de motorización por los valores de población en miles de habitantes, obteniendo el tamaño proyectado de la flota de vehículos livianos. Las proyecciones de población anual hasta el 2050 para cada país provienen del Banco Mundial.

Figura 1. Motorización proyectada para países seleccionados de la región



2.1.2.3 Clasificación de países y definición de escenarios

Para calcular la flota de vehículos eléctricos e híbridos enchufables a partir de las estimaciones de flota total de vehículos livianos, fue necesario asumir porcentajes de penetración de estas tecnologías en las ventas futuras de vehículos livianos. Los porcentajes de penetración asumidos provienen de un ejercicio de clasificación de los países de la región en tres categorías, teniendo en cuenta diferentes características de cada país, tales como sus niveles de penetración actuales, metas de penetración futuras, la disponibilidad de estrategias nacionales de movilidad eléctrica, la existencia de incentivos para la adopción de la electromovilidad y el ingreso promedio per cápita (ver Tabla 2).

Tabla 2. Metas de penetración establecidas por países de la región

País	Metas de penetración de vehículos cero y bajas emisiones		
	Como % de ventas de vehículos nuevos	Como % de flota	En cantidad de vehículos
Colombia	-	-	600 mil (2030)
Chile	100% (2035)	40% (2050)	-
Uruguay	100% (2035)	-	-
México	100% (2050)	-	-
Costa Rica	100% (2050)	30% (2035), 95% (2050)	-
Bahamas	35% (2030)	-	-
Panamá	25-40% (2030)	10-20% (2030)	-

País	Metas de penetración de vehículos cero y bajas emisiones		
	Como % de ventas de vehículos nuevos	Como % de flota	En cantidad de vehículos
Perú	20% (2030)	-	-
Nicaragua	20% (2030)		
Barbados	-	100% (2030)	-
Argentina	-	50% (2030)	-
República Dominicana	-	30% (2030)	-
Ecuador	-	20-25% (2040)	-
Honduras	-	15% (2050)	-
Jamaica	-	12% (2030)	-
Paraguay	-	10-20% en instituciones públicas (2030)	

Fuente: Elaboración propia a partir de información de Estrategias Nacionales de Movilidad Eléctrica, otros instrumentos de política pública y artículos de noticias.

Para cada categoría, se definieron tres escenarios de simulación, pesimista, moderado y optimista, con el fin de tener en cuenta la incertidumbre asociada a los valores de penetración. Las categorías, escenarios y porcentajes de penetración asumidos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Categorías y escenarios de penetración de vehículos eléctricos BEV y PHEV

Categoría	Criterio	% población de la región	Penetración BEV y PHEV en ventas a 2050		
			Pesimista	Moderado	Optimista
A	Estrategia, Incentivos, Metas, Flota vehículos eléctricos 2022 >= 2000	35%	60%	80%	100%
B	Ingreso medio-alto & Flota vehículos eléctricos 2022 >= 2000	43%	40%	60%	80%
C	Demás países	22%	20%	40%	60%

Fuente: Elaboración propia

En la Categoría A se encuentran aquellos países que cuentan con una estrategia nacional de movilidad eléctrica, han implementado incentivos para la adquisición de vehículos eléctricos, han establecido metas futuras de penetración de vehículos cero y bajas emisiones (Tabla 2)

y actualmente cuentan con una flota de vehículos eléctricos e híbridos enchufables dentro de las más altas de la región. Todas estas características son indicativas de un clima más propicio para la adopción de la electromovilidad, haciendo que estos países tengan una mayor probabilidad de alcanzar mayores niveles de penetración de eléctricos e híbridos enchufables en ventas a 2050. Los países en esta categoría son México, Colombia, Chile, República Dominicana y Costa Rica.

En la Categoría B se encuentran aquellos países que, a pesar de no contar con la totalidad de criterios necesarios para entrar en la Categoría A, se encuentran clasificados como países de ingreso alto o medio-alto según el Banco Mundial y actualmente cuentan con una flota de eléctricos e híbridos enchufables dentro de las más altas de la región. El primer criterio fue elegido asumiendo que la población de los países con mayor poder adquisitivo tendrá la oportunidad de adoptar de forma más rápida las tecnologías de cero y bajas emisiones, que actualmente requieren una mayor inversión inicial en comparación con los vehículos a combustión interna. Adicionalmente, el criterio relacionado con el tamaño de la flota actual de eléctricos e híbridos enchufables se estableció en términos absolutos y no porcentuales, ya que no solo se busca capturar a aquellos países que han logrado los mayores avances de penetración, sino también aquellos que representan un potencial mercado más grande y por lo tanto tienen mayor probabilidad de atraer mayor oferta de vehículos eléctricos e híbridos enchufables al mercado. Los países en la Categoría B son Brasil, Argentina y Uruguay. Finalmente, los países que no cumplen con las características requeridas para las Categorías A o B, fueron clasificados en la Categoría C.

Las categorías previamente señaladas en la Tabla 3 se definieron considerando criterios que permiten alcanzar las metas de penetración de la Tabla 2 en un escenario *optimista*. Estas metas fueron establecidas con base en estimaciones previas (Michelena et al., 2023), las cuales analizan los efectos de políticas públicas e incentivos en la adopción de la electromovilidad en ALC. Asimismo, la clasificación de la Tabla 3 responde a una metodología que considera referencias clave en la literatura, asegurando coherencia con estudios como el de Frost y Sullivan (2024) y Michelena et al. (2023), que examinan la evolución del mercado de vehículos eléctricos y su impacto en la región. Adicionalmente, se asumió la distribución de ventas en ALC de vehículos eléctricos BEV y PHEV presentada en la Tabla 4.

Tabla 4. Distribución de ventas de vehículos eléctricos BEV y PHEV.

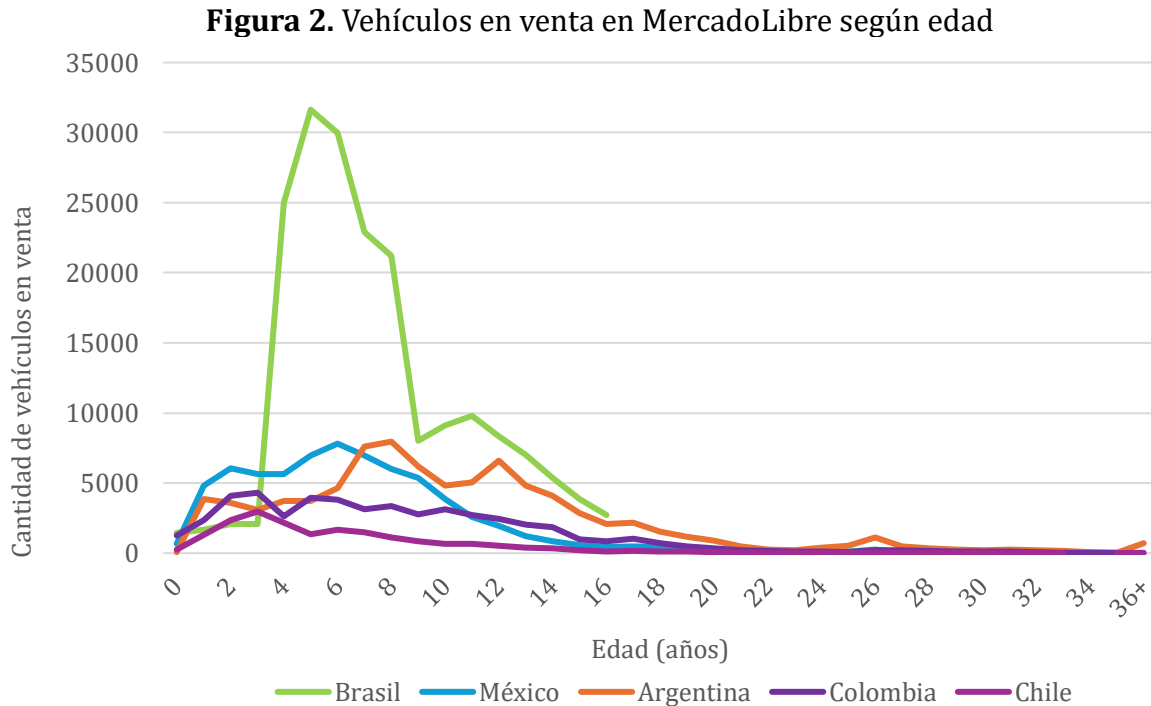
Tipo de vehículo	2022	2035 -2050
BEV	53,4%	100%
PHEV	46,6%	0%

Fuente: Elaboración propia a partir de Frost y Sullivan (2023) y LATAM Automotive Growth Outlook 2023

2.1.2.4 Cálculo del número de vehículos eléctricos e híbridos enchufables futuros

Partiendo de los porcentajes de penetración de vehículos eléctricos e híbridos enchufables en ventas 2022 de la Tabla 1 y los porcentajes de penetración futuros de la Tabla 2, se realizó una interpolación lineal que permitió estimar los porcentajes de penetración en ventas para cada escenario, país y año de simulación. Para calcular el número total de ventas de vehículos livianos en cada país y año sobre el cual se aplicarían estos porcentajes de penetración, no solo se tuvo en cuenta el crecimiento neto anual del parque automotor obtenido mediante el modelo de motorización, sino también el número de vehículos del parque automotor que posiblemente serían retirados de circulación en cada año y reemplazados por nuevos vehículos.

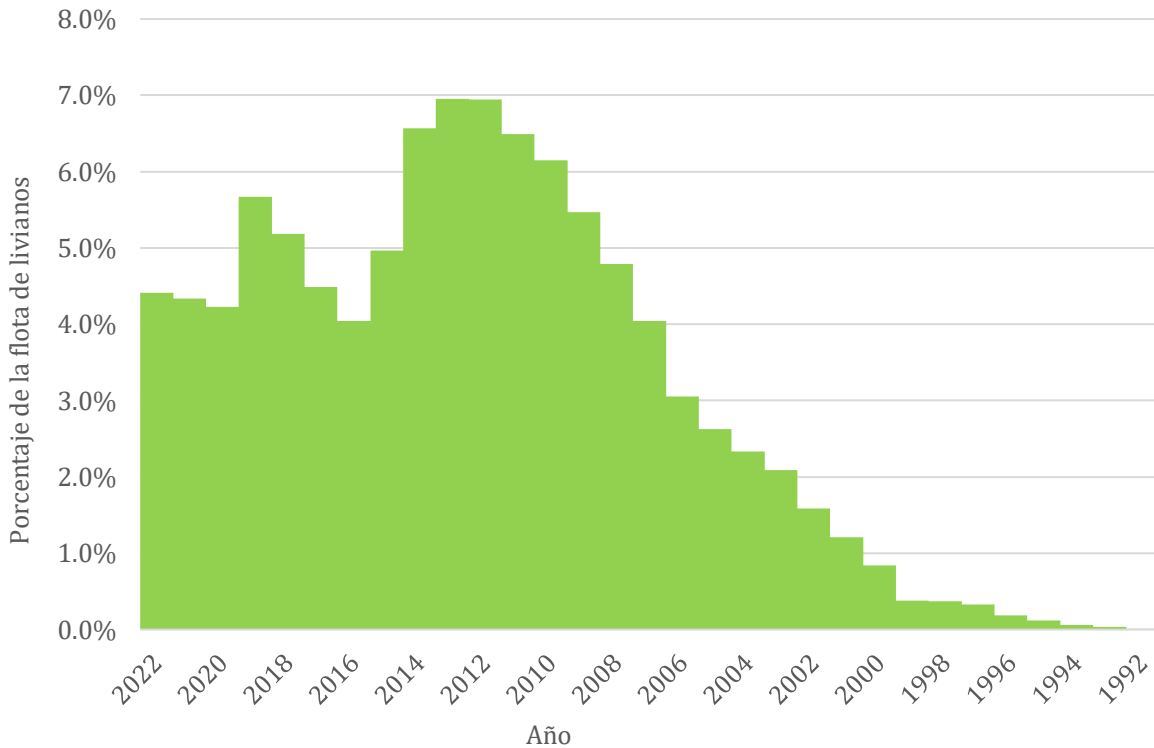
La estimación del número de vehículos retirados de circulación en cada año de simulación se realizó asumiendo que los vehículos se retiran de circulación al cumplir 25 años y que para el año base la flota de la región tiene una distribución de edades correspondiente a aquella observada en el caso de Brasil. La edad de retiro se asumió a partir de un análisis del número de vehículos de diferentes edades que se encuentran a la venta en MercadoLibre para países seleccionados de la región (Figura 2), en el cual se observó que los vehículos de 25 años o más representan menos del 2% de la oferta total de vehículos en este portal al analizar los datos de Brasil, México, Argentina, Colombia y Chile.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de MercadoLibre publicados al día 28 de noviembre de 2024

Se ha adoptado la distribución de edades de los vehículos para el 2022 a partir de datos disponibles para Brasil. Esta elección responde a la disponibilidad de información detallada y consistente a nivel nacional. Brasil concentra aproximadamente el 33,4% del parque vehicular de ALC, por lo que su estructura de flota constituye una aproximación razonable para capturar el orden de magnitud y los patrones generales de envejecimiento del parque regional. La distribución utilizada se presenta en la Figura 3.

Figura 3. Distribución 2022 de la flota de vehículos livianos según edad (Brasil)



Fuente: Elaboración propia a partir de Sindipeças (2023)

Siguiendo los supuestos descritos anteriormente, se fue retirando y renovando progresivamente los vehículos livianos del año base, asumiendo que en 2022 saldrían de circulación los vehículos modelo 1997 y anteriores, en 2023 saldrían de circulación los vehículos modelo 1998, en 2024 los modelo 1999 y así sucesivamente. De igual forma, los vehículos nuevos que entran al modelo año a año como resultado del crecimiento proyectado por el modelo de motorización son renovados al cumplir los 25 años de edad. Para una caracterización de este supuesto, se ha realizado un análisis de sensibilidad de este parámetro (ver Apéndice A).

Considerando tanto el crecimiento del parque automotor, como la renovación de vehículos, el número total de ventas para cada país (c) y año (t) de simulación fue calculado mediante la Ecuación 2. A partir de las ventas anuales, se calculó el número de vehículos eléctricos que entrarían año a año al parque vehicular en cada escenario (j), aplicando los porcentajes de penetración para cada escenario y país (Ecuación 3). Finalmente, la flota de vehículos

livianos eléctricos y enchufables a 2050 se calculó acumulando las ventas anuales (Ecuación 4).

$$Ventas\ livianos_{c,t} = Crecimiento\ parque\ automotor_{c,t} + Vehículos\ renovados_{c,t} \quad (2)$$

$$Ventas\ eléctricos_{c,j,t} = Ventas\ livianos_{c,t} \times Penetración\ en\ ventas_{c,j,t} \quad (3)$$

$$Flota\ electrificados_{c,j} = Flota\ electrificados_{c,2022} + \sum_{t=2023}^{2050} Ventas\ electrificados_{c,j,t} \quad (4)$$

2.1.3 Incremento de la demanda eléctrica

Una vez estimada la flota de vehículos eléctricos e híbridos enchufables para cada país y año de simulación, se calcularon los kilómetros diarios recorridos por la flota BEV y PHEV con energía eléctrica, empleando los supuestos sobre comportamiento de los usuarios presentados en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de los usuarios de vehículos eléctricos y enchufables

Variable	2022	2050
Usuarios que realizan viajes por trabajo	65%	53%
km/día para vehículos que viajan por trabajo	40	
km/día para vehículos que no viajan por trabajo	22	
% km recorridos con energía eléctrica para PHEV	70%	

Fuente: Elaboración propia a partir de Nicholas y Lutsey (2020). El valor del porcentaje de usuarios que realizan viajes por trabajo en el año base fue interpolado linealmente a 2022 usando el valor provisto para 2019. Para los años posteriores al 2030, se asumió que el porcentaje reportado para dicho año—que refleja la estabilización con el porcentaje de usuarios de vehículos de combustión interna que realizan viajes por trabajo— permanece constante hasta el 2050.

Las estimaciones del incremento de demanda eléctrica fueron obtenidas a partir de los kilómetros diarios recorridos y los valores de eficiencia energética de la Tabla 6, siguiendo la Ecuación 5.

Tabla 6. Eficiencia energética de vehículos eléctricos y enchufables

Tipo de vehículo	Eficiencia energética (km por kWh)
BEV	5,5
PHEV	5,2

Fuente: Elaboración propia a partir de Nicholas y Lutsey (2020). La eficiencia energética se asume constante en el tiempo, asumiendo que las mejoras tecnológicas serán compensadas con el cambio hacia vehículos eléctricos de mayor tamaño en el futuro.

$$\text{Incremento de demanda energética diaria (kWh)} = \frac{\text{distancia recorrida (km)}}{\text{eficiencia energética (km/kWh)}} \quad (5)$$

2.1.4 Necesidades de infraestructura de carga pública

Para calcular el número de puntos de carga requeridos, se realizaron diversos supuestos sobre los patrones de carga de los usuarios de vehículos eléctricos y enchufables, los cuales se presentan en la Tabla 7. Adicionalmente, se asumió que para el año base el 84% de los usuarios cuentan con infraestructura de carga en el hogar, mientras que para 2050 este valor desciende a 71%.⁶ Los supuestos sobre patrones de carga y disponibilidad de cargadores en el hogar fueron empleados para clasificar los valores de kilómetros recorridos por BEV y PHEV y la demanda eléctrica adicional según el tipo de cargador empleado.

Tabla 7. Patrones de carga asumidos para usuarios de vehículos eléctricos y enchufables

Características del usuario			Distribución de sitios de carga			
Vehículo	Viaja al trabajo	Disponibilidad de cargador en el hogar	Hogar	Trabajo	Público normal	Público rápido urbano
BEV	Si	Si	70%	20%	5%	5%
		No	0%	45%	30%	25%
	No	Si	85%	0%	5%	10%
		No	0%	0%	40%	60%
PHEV	Si	Si	65%	30%	5%	0%
		No	0%	65%	35%	0%
	No	Si	90%	0%	10%	0%
		No	0%	0%	100%	0%

Fuente: Elaboración propia tomando como base Nicholas y Lutsey (2020).

Posteriormente, se emplearon los valores de potencia suministrada por tipo de cargador y utilización diaria por tipo de cargador de las Tablas 8 y ecuaciones (6) y (7)⁷ para convertir los datos de demanda eléctrica por tipo de cargador en el número de cargadores requeridos de cada tipo, siguiendo las ecuaciones 6 y 7.

⁶ A nivel internacional, se observa que los usuarios iniciales de vehículos eléctricos tienden a ser personas que realizan viajes por trabajo y cuentan con disponibilidad de garajes con punto de carga. Sin embargo, se espera que, para lograr mayores niveles de penetración en el mercado, se requiera mayor disponibilidad de infraestructura de carga de uso público para atraer usuarios potenciales con diferentes características (Nicholas y Lutsey, 2019a, Slowik y Lutsey, 2018). Nicholas y Lutsey (2020) asumen 85% de disponibilidad de cargador en el hogar para 2019 y 80% para 2030, de donde se derivaron los valores asumidos para 2022 y 2050 en este estudio.

⁷ Estas ecuaciones provienen del estudio de Nicholas y Lutsey (2020).

Tabla 8. Potencia suministrada según tipo de cargador y vehículo

Tipo de cargador	Tipo de vehículo	Potencia suministrada por cargador (kW)	
		2022	2035 - 2050
Público normal	BEV	8	9,5
	PHEV	3,4	5,4
Público rápido	BEV	35	90
Público rápido autopista	BEV	60	150

Fuente: Elaboración propia. Los valores 2022 provienen de Nicholas y Lutsey (2020), mientras que los valores futuros provienen de Rajon Bernard et al (2021).

$$\text{Promedio de horas diarias de uso (normal)} = 0.832 * \text{Log}(\text{EVs x millon de hab}) - 4.902(6)$$

$$\text{Promedio de horas diarias de uso (rápido)} = 0.6497 * \text{Log}(\text{BEVS x millon de hab}) - 4.099(7)$$

$$\text{T tiempo requerido de carga (h)} = \frac{\text{Demanda energética (kWh)}}{\text{Potencia suministrada por cargador (kW)}} \quad (8)$$

$$\text{Puntos de carga} = \frac{\text{T tiempo requerido de carga (h)}}{\text{Utilización promedio por cargador (h)}} \quad (9)$$

El número de cargadores en el hogar y el número de cargadores públicos rápidos para autopistas fueron determinados de formas distintas a la metodología descrita anteriormente para cargadores de trabajo, públicos normales y públicos rápidos. Los cargadores en el hogar fueron calculados multiplicando el porcentaje asumido de usuarios con disponibilidad de cargador en el hogar por el número de vehículos BEV y PHEV. Para los cargadores públicos rápidos en autopistas, se asumió una tasa de un punto de carga rápido de 150kW por cada 1.500 vehículos eléctricos, adicional a los cargadores públicos rápidos calculados mediante las Ecuaciones 7 y 8 (ver Apéndice B).

2.1.5 Costos de infraestructura de carga de uso público

El cálculo de costos de infraestructura de carga se basó en la información de la Estrategia Nacional para la Infraestructura de Carga para Vehículos Eléctricos de Colombia presentada en la Tabla 9, la cual también se encuentra en línea con la información de costos de infraestructura de carga recopilada por la Agencia de Sostenibilidad Energética de Chile (Dorner Gallardo y Rivas Zeballos., 2022).⁸

⁸ Nótese que los costos de la infraestructura de carga incluyen tanto el costo del cargador como costo de obra civil y eléctrica.

Tabla 9. Costos por punto de carga incluyendo obra eléctrica

Potencia	Tipo de carga	Costo total infraestructura de carga (USD)	Costo cargador	Costo obra civil y eléctrica
7-11 kW	Lenta	11.000	36%	64%
22-44 kW	Semi-rápida	15.000	40%	60%
40-60 kW	Rápida	77.000	31%	69%
80-149 kW	Ultra-rápida	102.000	54%	46%
150-180 kW		257.000	32%	68%
>180 kW		449.000	31%	69%

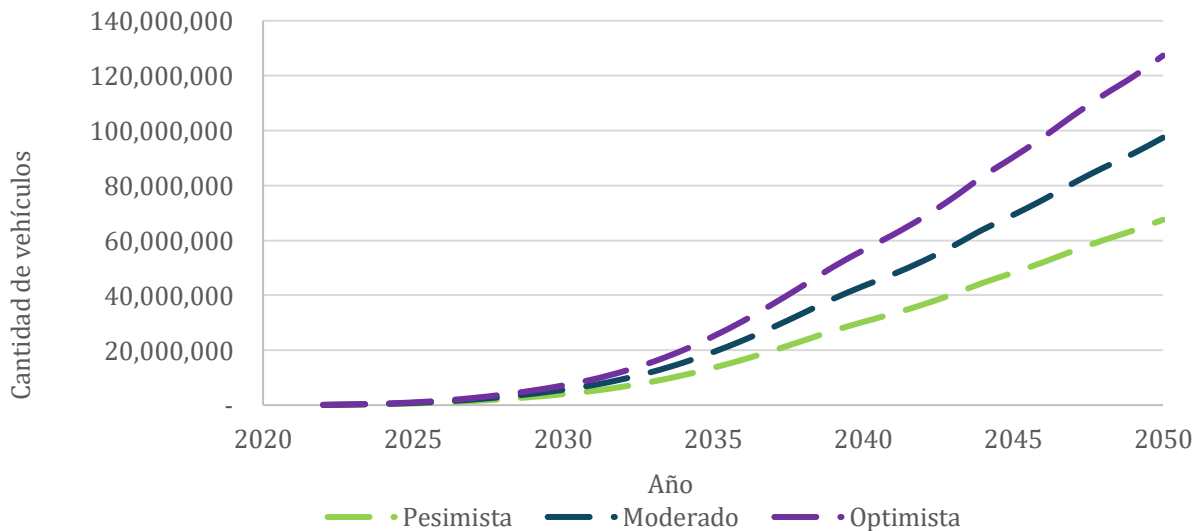
Fuente: Elaboración propia a partir de información de la Estrategia Nacional para la Infraestructura de Carga para Vehículos Eléctricos de Colombia (Banco Mundial y Deloitte, 2024).

El costo total de inversión en infraestructura de carga fue calculado multiplicando las cantidades de puntos de carga en el trabajo, lentos y rápidos por los costos correspondientes de la Tabla 9. Se asumió una reducción anual de 3% en los costos del cargador, siguiendo a Nicholas y Hall (2019a). Los puntos de carga en el hogar no fueron sumados dentro de los costos, ya que es un costo asumido por los propietarios de los vehículos privados y no por el sector público.

2.2 Resultados

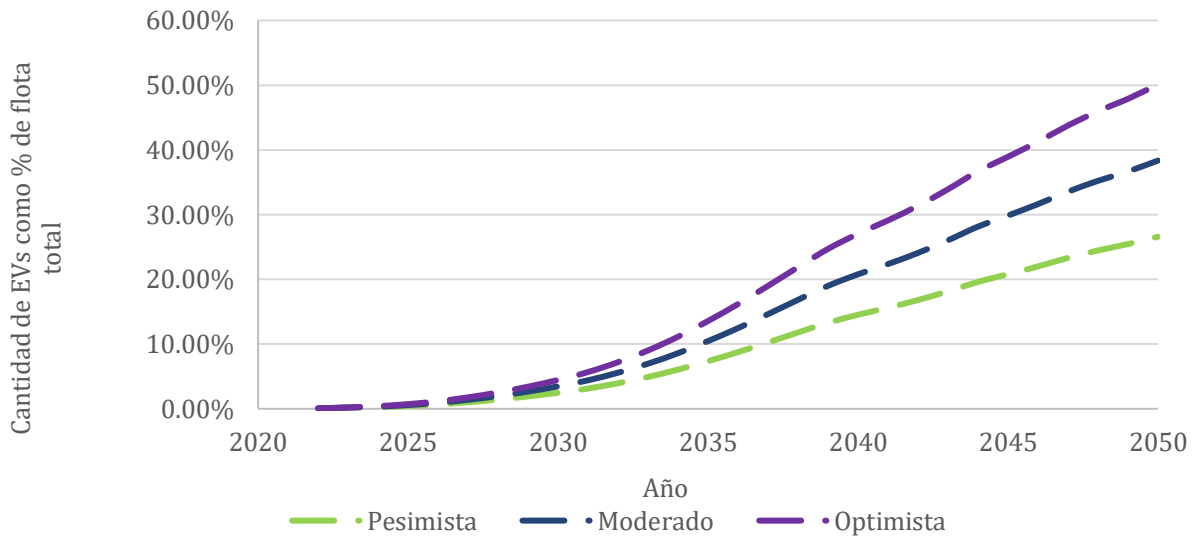
El análisis indica que hacia 2050 la región contaría con entre 68 y 120 millones de vehículos livianos eléctricos e híbridos enchufables bajo los escenarios pesimista y optimista, respectivamente (Figura 4). Estos vehículos representarían entre el 27% y el 50% de la flota de vehículos livianos de la región (Figura 5).

Figura 4. Flota proyectada de BEV + PHEV para ALC



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Participación de BEV + PHEV en flota de livianos de ALC

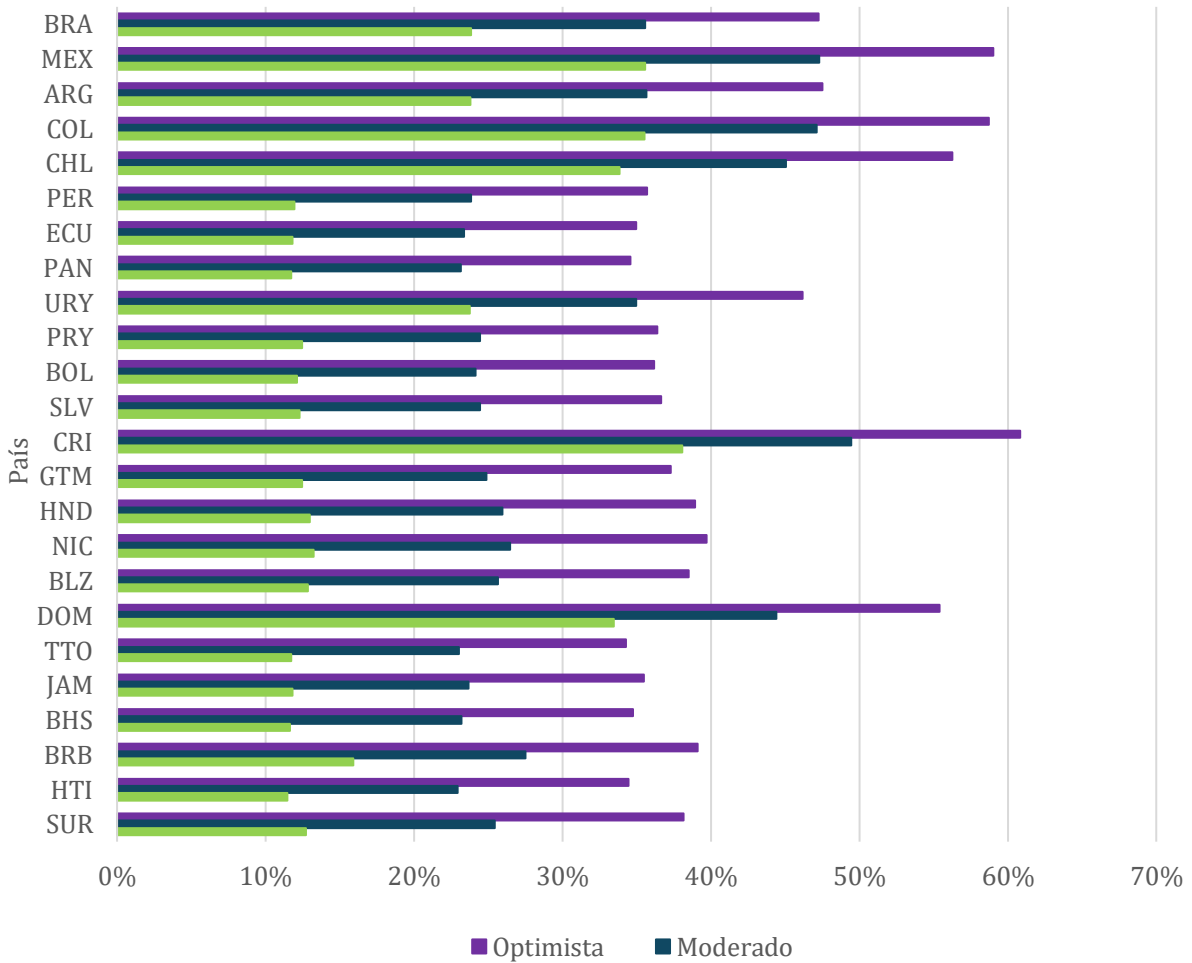


Fuente: Elaboración propia

Aunque los países clasificados en la Categoría A tendrían niveles de penetración de vehículos eléctricos e híbridos enchufables en ventas desde el 60% hasta el 100% a 2050 según el escenario considerado, los porcentajes de penetración en la flota total para estos países oscilarían entre el 35% y el 58%⁹. Esto se debe a que, a pesar de proyectar 100% en ventas a 2050 para estos países bajo el escenario optimista y asumir que los vehículos se van retirando al cumplir 25 años, durante los años 2022-2049 continúan ingresando vehículos a combustión interna (esto ocurre en mayor proporción para los años iniciales y se va reduciendo conforme progresan los años).

⁹ Las proyecciones oficiales específicas por país de electrificación vehicular hasta 2050 en ALC son prácticamente inexistentes. Como referencia a nivel país, un estudio reciente de ICCT para Brasil (Cieplinski, 2025) desarrolla escenarios cuantitativos de largo plazo y estima una penetración de 10–70% en vehículos privados y de 70–100% en transporte público, frente a 25–48% y 60–85%, respectivamente, en este estudio para Brasil. Las diferencias responden a divergencias en la segmentación vehicular, los supuestos de renovación del parque y el alcance del ejercicio (análisis país-específico vs. marco regional comparativo).

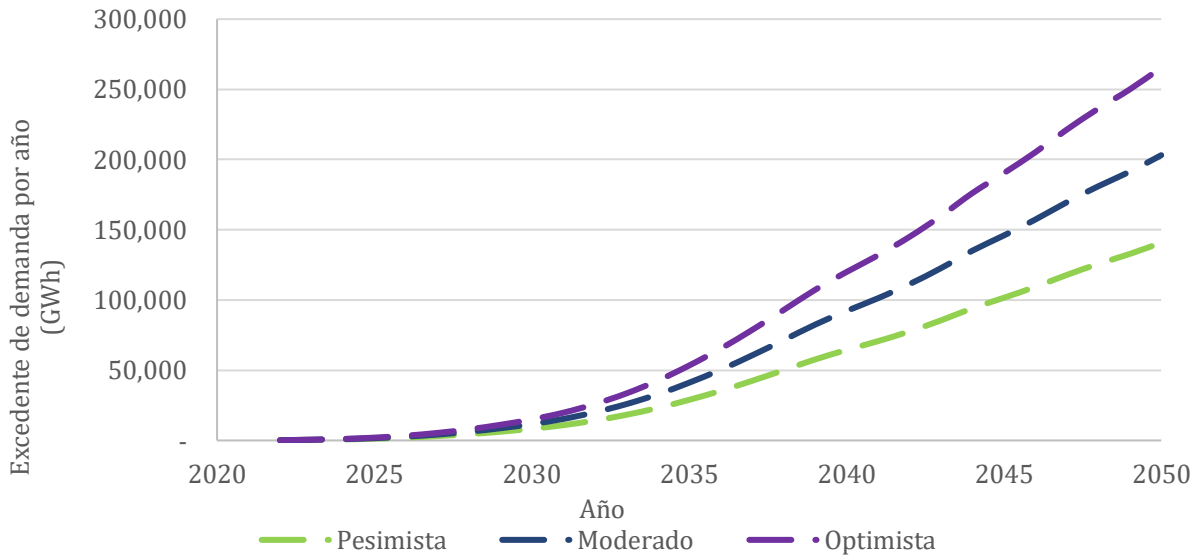
Figura 6. Participación de BEV + PHEV en flota total 2050 por país



Fuente: Elaboración propia

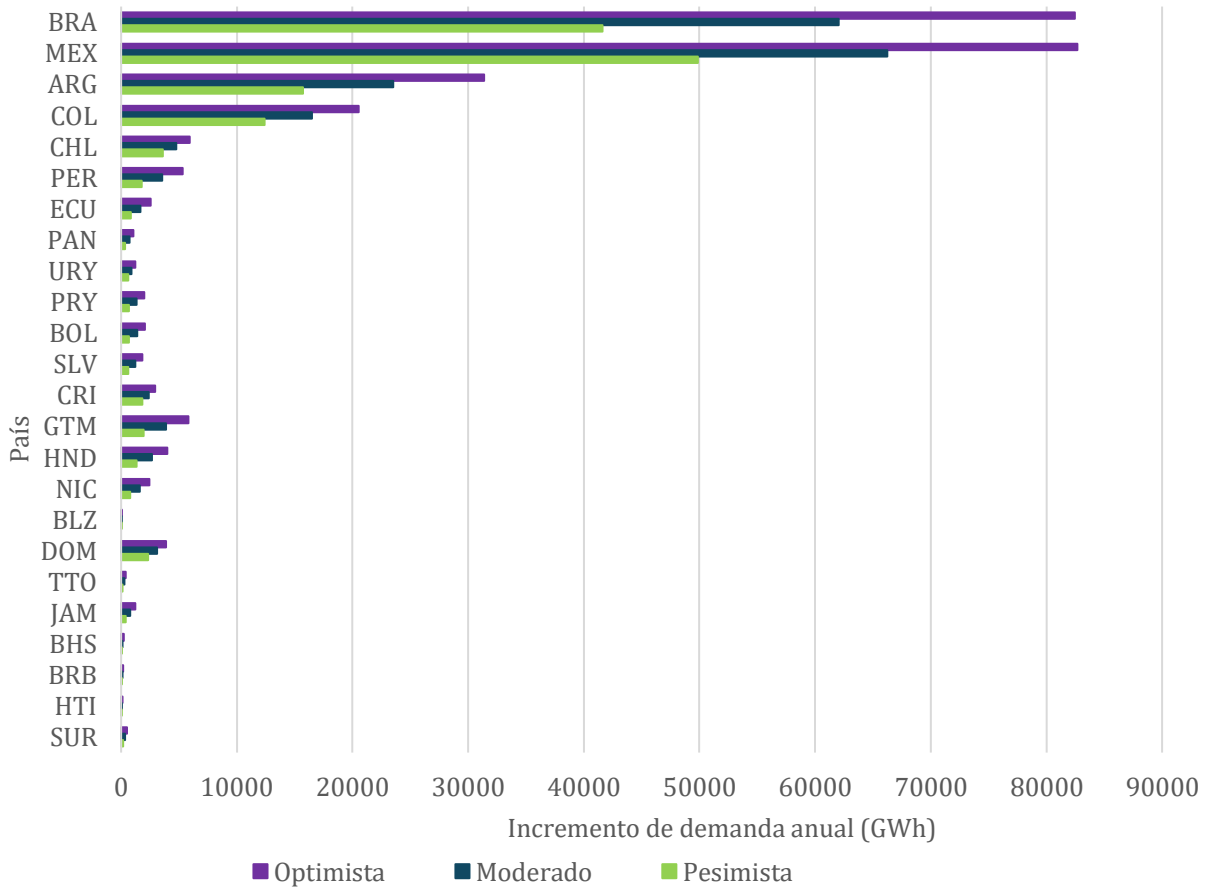
Hacia 2050, el incremento en la circulación de vehículos eléctricos e híbridos enchufables generará una demanda eléctrica adicional en la región que podría oscilar entre 140 mil y 265 mil GWh por año según el escenario considerado (Figura 7), lo cual representa entre el 9% y el 18% del consumo eléctrico actual de la región. Dado el tamaño de su flota total, Brasil y México serán responsables de la mayor parte de este incremento (Figura 8). Estos dos países requerirán más del 62% de la demanda eléctrica adicional de la región en cualquiera de los escenarios considerados.

Figura 7. Incremento de demanda eléctrica en ALC generado por BEV + PHEV



Fuente: Elaboración propia

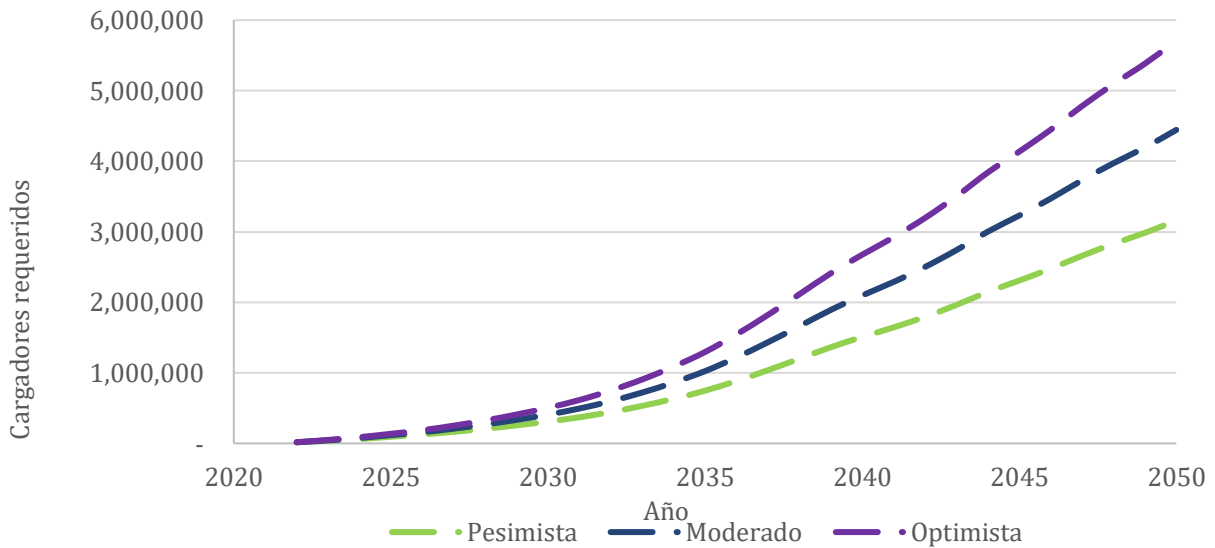
Figura 8. Incremento de demanda eléctrica al 2050 generado por BEV + PHEV por país



Fuente: Elaboración propia

Teniendo en cuenta los supuestos de utilización y potencia de cargadores descritos en la metodología, se estima que la región podría requerir entre 3,1 y 5,7 millones de puntos de carga públicos, según el escenario considerado (Figura 9). El 93% de estos cargadores corresponden a cargadores normales y el 7% restante a cargadores rápidos. Los puntos de carga en el hogar no se presentan en la Figura 8 por estar a cargo de los usuarios. Nótese que, al considerarse únicamente cargadores públicos, se asume inexistente la infraestructura de carga en el año inicial del modelo. Ver Apéndice B para una comparación de la metodología propuesta desde una perspectiva internacional, considerando países donde la adopción de vehículos eléctricos se encuentra en una etapa más adelantada que en los países de la región.

Figura 9. Puntos de carga de uso público requeridos en ALC para BEV + PHEV

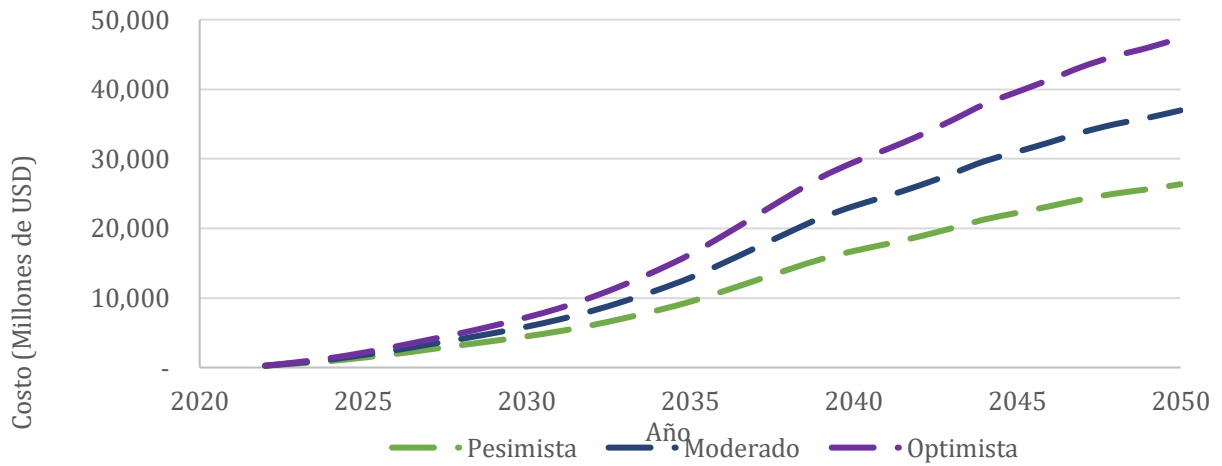


Fuente: Elaboración propia. Excluye cargadores en el hogar

En términos de costos, se proyecta que la región debería invertir entre 26 mil y 47 mil millones de dólares hasta el 2050 para proveer la infraestructura de carga pública de vehículos livianos requerida (Figura 10). Estos valores representan entre el 0,005% y el 0,04% del PIB regional anual (Figura 12).

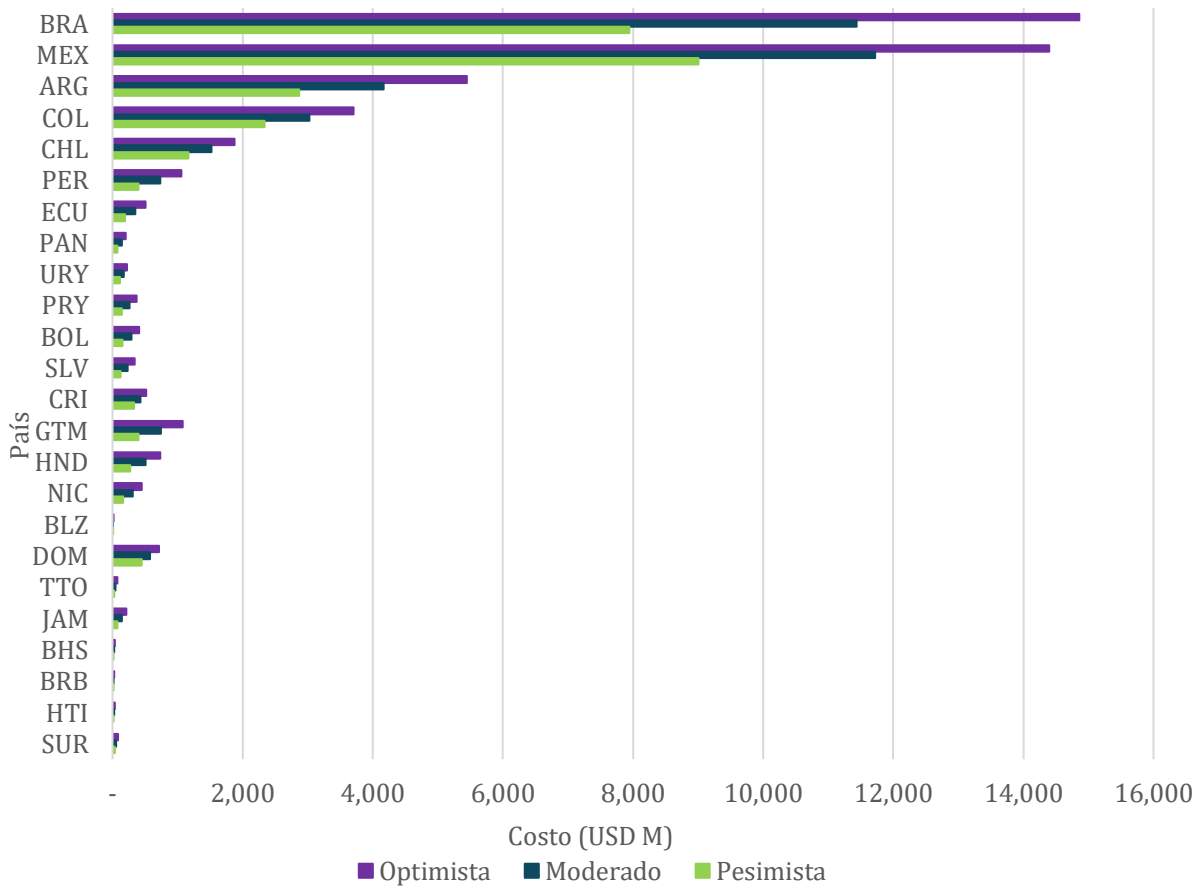
Los picos en la Figura 12 se deben a la metodología diferenciada para estimar cargadores en el hogar y en autopistas. Mientras los primeros dependen del porcentaje de usuarios con acceso a carga residencial, los segundos siguen una tasa fija de un cargador rápido por cada 1.500 vehículos eléctricos. Esto genera variaciones en la inversión, ya que la demanda de infraestructura pública no crece uniformemente (ver detalles en subsección 2.1.3).

Figura 10. Costo total infraestructura de carga pública requerida para BEV + PHEV



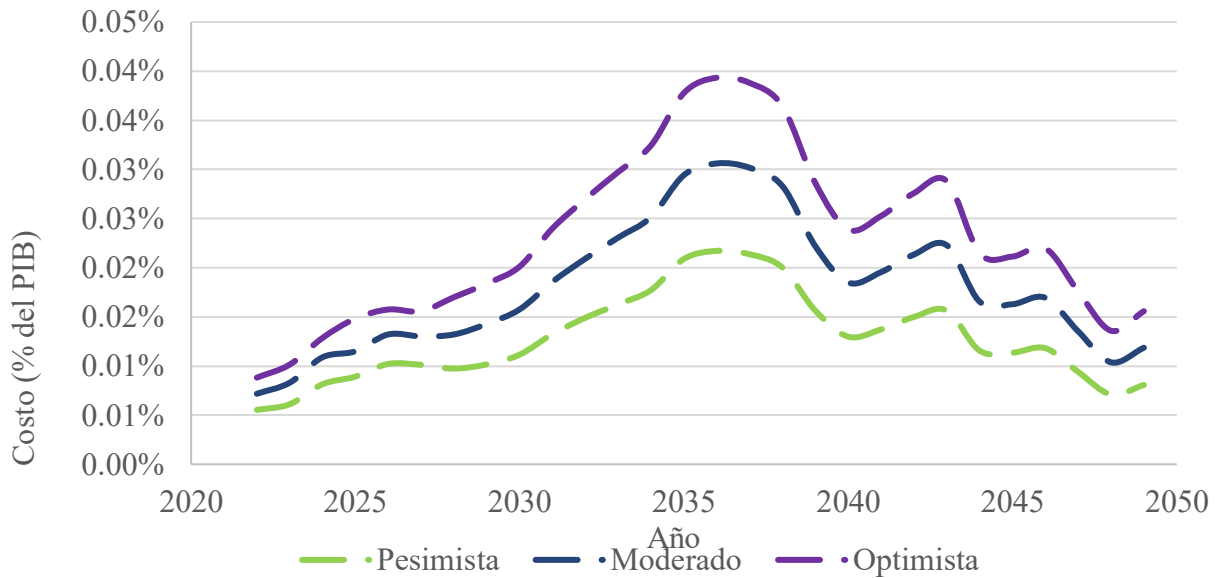
Fuente: Elaboración propia. Excluye cargadores en el hogar

Figura 11. Costo total infraestructura de carga pública requerida por país en 2050 para BEV + PHEV (USD M)



Fuente: Elaboración propia. Excluye cargadores en el hogar

Figura 12. Costo de infraestructura de carga requerida para BEV + PHEV como % del PIB



Fuente: Elaboración propia. Excluye cargadores en el hogar.

3 Transporte público

Esta sección del estudio se centra en la estimación de los costos asociados a la transición hacia la movilidad eléctrica en el transporte público, enfocándose específicamente en los sistemas de buses. El análisis se concentra en las áreas urbanas donde la transición a la movilidad eléctrica es competitiva y cobra relevancia en términos ambientales. El estudio considera tres escenarios (optimista, moderado y pesimista) y clasifica las ciudades en cuatro grupos según su población y nivel actual de penetración de buses eléctricos. Las estimaciones se basan en proyecciones hasta el 2050, considerando factores como el crecimiento urbano, la depreciación de la flota total actual y las necesidades de infraestructura de carga.

La transición de los buses tradicionales de combustibles fósiles a Unidades Eléctricas (UEs) se puede hacer con dos tipos de buses:

- **Buses eléctricos de celda de combustible (FCEBs por sus siglas en inglés):** Adecuados para rutas más largas, beneficiándose de tiempos de recarga rápidos utilizando hidrógeno. Nótese que este tipo de bus no es considerado dentro del estudio.
- **Buses eléctricos de batería (BEBs por sus siglas en inglés):** Más eficientes para rutas más cortas donde existe una infraestructura de carga establecida.

Dado que este estudio se enfoca en áreas urbanas densamente pobladas, donde las rutas son relativamente cortas y las paradas frecuentes permiten aprovechar el frenado regenerativo, el presente análisis considera únicamente los BEBs. Adicionalmente, la infraestructura de carga para BEBs es más simple y económica que las estaciones de hidrógeno requeridas para

FCEBs, lo que los hace más apropiados para una implementación gradual en ciudades de la región. Asimismo, esta tecnología lidera la tendencia global de UEs, donde los BEBs dominan el mercado de buses eléctricos urbanos (Frost y Sullivan, 2024).

3.1 Metodología

La estimación de los costos de transición hacia la electromovilidad en el transporte público se aborda en tres etapas: *i)* en primer lugar se determinará el costo asociado a renovación de la flota eléctrica; *ii)* por otro lado, se estimará el incremento de la demanda eléctrica para garantizar el funcionamiento de la flota eléctrica; *iii)* finalmente, se estimará la cantidad óptima de cargadores y el costo de la construcción de dicha infraestructura de carga. A continuación, se presentan los supuestos considerados.

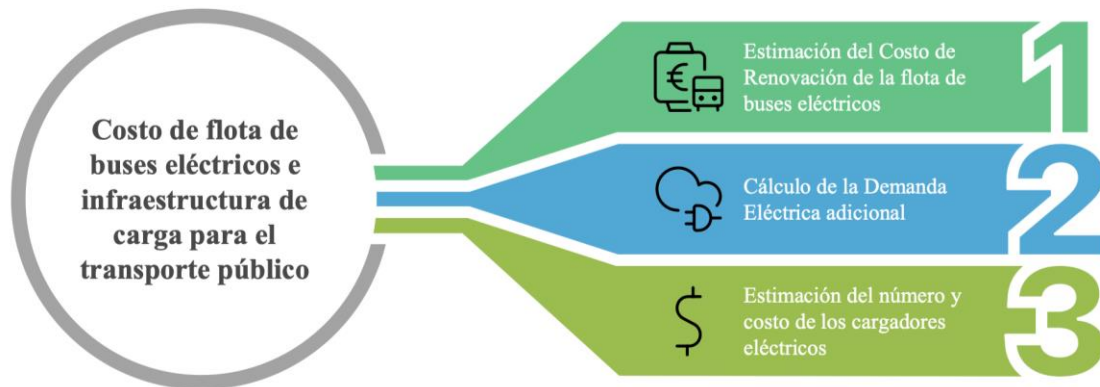
Supuestos

- **Costo de los buses:** Se asume que el costo de los buses eléctricos decrecerá siguiendo la tendencia sugerida por Frost y Sullivan (2024). En el largo plazo, para el año 2050, se asume que el costo del bus eléctrico es igual al de combustión interna.
- **Población considerada:** El transporte público eléctrico es costo-eficiente en áreas altamente densas debido a: *i)* altos niveles de congestión, ya que su consumo de electricidad se mantiene estable a bajas velocidades, además de que el frenado frecuente y el tiempo de inactividad en el tráfico congestionado, permiten el uso de frenado regenerativo; *ii)* alta frecuencia y uso, debido a que el costo de mantenimiento de los buses eléctricos es inferior al de los de combustión interna; y *iii)* alto impacto en efectos medioambientales, donde la contaminación puede afectar significativamente a una gran población (Avenali et al., 2023). Por estos motivos se ha considerado la renovación de la flota total para las ciudades de más de 500.000 habitantes.
- **Clasificación:** Las ciudades han sido clasificadas en cuatro grupos de acuerdo con un criterio poblacional y de penetración de la flota de buses eléctricos actualmente (ver subsección 3.1.1.2 para una explicación detallada).
 - **Categoría A:** Ciudades con compromiso de penetración de movilidad eléctrica preestablecido.
 - **Categoría B:** Ciudades de más de 5 millones de habitantes o más de 1% de penetración actual de flota de buses eléctrica.
 - **Categoría C:** Ciudades entre 1 y 5 millones de habitantes.
 - **Categoría D:** Ciudades de menos de 1 millón de habitantes.
- **Escenarios:** Se han propuesto tres escenarios: *i)* Optimista; *ii)* Moderado; *iii)* Pesimista (ver subsección 3.1.1.2 y Tabla 11 para una explicación detallada).
- **Estandarización de la flota total:** Para la estimación de la flota total de transporte público se ha realizado una armonización del tipo de vehículo. Es decir, se ha establecido una proporción de la cantidad de microbuses que representa un bus de acuerdo con los pasajeros que regularmente transporta cada tipo de vehículo—igualmente para bus articulado y biarticulado—(Tabla 12).

- **Crecimiento de la flota total:** Se ha asumido que la proporción de la flota total de transporte público respecto de la población se mantiene constante. En este sentido, la flota crece proporcionalmente con el crecimiento urbano $F_{i,t}(U_{c,t}) = F_{i,t-1}(1 + \Delta\%U_{c,t-1})$. Donde los subíndices i y t representan ciudad y año, respectivamente; mientras que el subíndice c representa país. $F_{i,t}$ es la flota total estimada y $U_{c,t}$ es la población urbana.
- **Crecimiento urbano:** Se ha asumido que todas las ciudades de un mismo país crecen al mismo ritmo, siguiendo las estimaciones de crecimiento urbano propuesta por Naciones Unidas.
- **Crecimiento económico:** Se ha asumido que el crecimiento económico es el proyectado por OCDE y World Economic Forum, y los años posteriores—para los que no existen estimaciones actualmente—se ha usado el crecimiento del último año.
- **Flota total para ciudades menores:** Se ha estimado que las ciudades sin registro de flota total de buses tienen 1 bus por cada 1.000 habitantes, con un rango de error estimado entre 0,5 – 1,5 por cada 1.000 habitantes, siguiendo al Banco Mundial y PPIAF (2006). Ver subsección 3.1.1.3 para un análisis detallado de este rango.
- **Longevidad de los buses:** Se ha asumido una longevidad de 15 años por bus (Beltrán et al., 2021; Roa et al., 2020).
- **Depreciación flota eléctrica existente (en 2024):** Para ciudades como Santiago o Bogotá, la flota eléctrica actual es relevante (23% del total de la flota para Santiago). Se ha asumido que los buses eléctricos se han adquirido entre 2020 - 2023 para su posterior desgaste del bus en el largo plazo del modelo, que coincide con las principales incorporaciones de buses en estas ciudades.
- **Uso del bus:** Se ha asumido que la distancia recorrida por bus por año es de 55,360 km (Avenali et al., 2023). Esta cifra es coincidente con valores obtenidos y publicados por institutos de estadística como Dirección de Transporte Público Metropolitano (DTPM), donde el recorrido anual promedio por bus es de 49,000 km en Santiago de Chile.

El Cuadro 2 muestra el proceso metodológico para la estimación de los costos para la transición hacia la movilidad eléctrica. Así, en primer lugar, se hará una estimación de la sustitución de la flota. Para esto se requiere calcular la flota actual y la proyección de la misma en el tiempo del estudio, esto es del 2025 al 2050. Asimismo, esta etapa requiere hacer una estimación de la proyección de los precios de los buses eléctricos durante este intervalo de tiempo. En segundo lugar, con base en la dimensión de la flota eléctrica, se hará una estimación del incremento de demanda de energía como consecuencia de la flota de buses eléctrica. Finalmente, de acuerdo con las características de las ciudades se hará una estimación de la cantidad óptima de infraestructura de carga requerida para garantizar el funcionamiento del sistema de transporte electrificado.

Cuadro 2. Representación de la metodología del modelo de Transporte Público



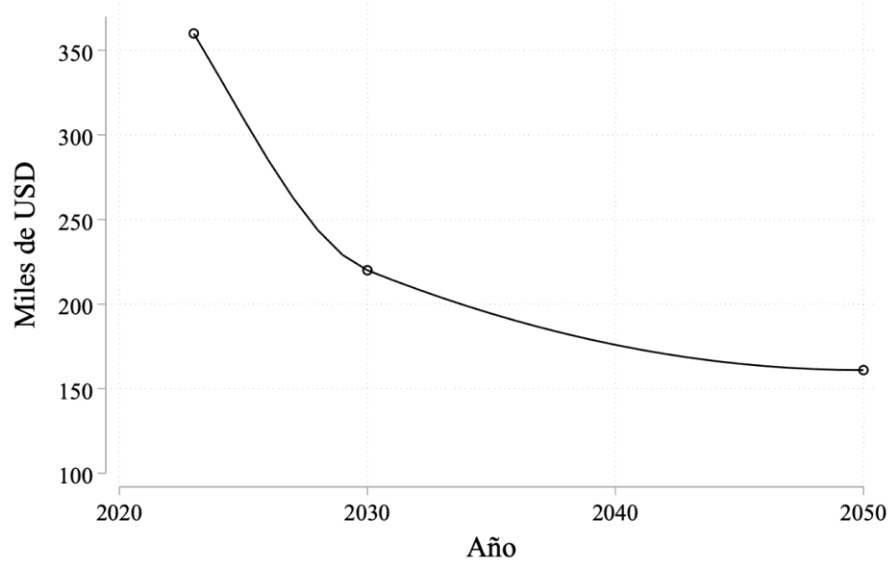
3.1.1 Estimación de sustitución de la flota de buses eléctricos

En esta sección se presenta el modelo para la estimación de diferentes escenarios de penetración de buses eléctricos. La sustitución de la flota total consta de cuatro pasos. En primer lugar, se detalla el precio de adquisición de los buses en el período 2025 - 2050. En segundo lugar, se plantea una clasificación de las ciudades y se detallan los escenarios considerados. En tercer lugar, se plantea la metodología de estimación de la flota total de buses. Finalmente, se estima la proyección de la flota total de buses y la ejecución del modelo según los escenarios planteados.

3.1.1.1 Costo del bus eléctrico

A partir de las estimaciones de Frost y Sullivan (2024), se ha estimado el costo del bus eléctrico a lo largo del periodo de análisis. La Figura 13 muestra la evolución del precio del bus eléctrico en la región, donde los puntos representan las estimaciones propuestas por Frost y Sullivan (2024). Por su parte, la función que une los extremos es una interpolación cúbica usando el algoritmo de Hermite. Este método utiliza funciones cúbicas a trozos que se unen suavemente, de modo que tanto la función interpolada como su primera derivada son continuas.

Figura 13: Costo de bus eléctrico por año



Fuente: Elaboración propia usando proyecciones de Frost y Sullivan (2024)

3.1.1.2 Clasificación de ciudades y definición de escenarios

Las ciudades se clasifican en cuatro grupos de acuerdo con su población y nivel de penetración de buses eléctricos. En primer lugar, las ciudades que han adquirido compromiso de renovación de flota de buses eléctrica a través de sus gobiernos locales han entrado en la categoría A. Estas ciudades son São Paulo, Ciudad de México, Bogotá y Santiago de Chile, que comparten el compromiso de que, a partir de un año determinado, el 100% de las adquisiciones deberán ser eléctricas.¹⁰ Por su parte, las ciudades cuya población es superior a 5 millones de residentes o la flota de buses eléctricos es superior al 1%, han sido categorizadas como tipo B. Las ciudades con población entre 1 – 5 millones han sido categorizadas como tipo C. Finalmente, las ciudades con población inferior han sido categorizadas como tipo D. Así, este estudio incluye 149 ciudades en la región, que representan el 41% del total de la población de ALC. De estas ciudades, la mayoría —dos terceras partes— son de tipo D. Por su parte, si bien el tipo A incluye solo 4 ciudades, estas reúnen aproximadamente al 23% del total de la población dentro del estudio (ver Tabla 10).

Nótese que hay ciudades pequeñas que pueden entrar en el grupo A y B bajo el marco de los criterios *compromiso* y *Flota actual mayor al 1%*. Esto es relevante ya que permite que ciudades pequeñas tengan alta penetración de la flota de buses eléctricos. Sin embargo,

¹⁰ Ver *São Paulo*: https://mobilityportal.lat/transwolff-compra-304-autobuses-electricos-para-operar-en-sao-paulo-100-circularan-este-ano/?utm_source=chatgpt.com; *Bogotá*: <https://theicct.org/buses-cero-emisiones-en-bogota-a-partir-de-2022-liderazgo-politico-para-acelerar-la-transicion/#:~:text=Bogotá%2C%20Colombia%2C%20se%20ha%20convertido,interna%20a%20partir%20de%202022!>; *Santiago de Chile*: https://spanish.xinhuane.com/20240813/eb48418559884125ae4f03140095d014/c.html?utm_source=chatgpt.com; *Ciudad de México*: <https://animalpolitico.com/2016/12/ciudades-del-mundo-que-prohibiran-autos-y-autobuses-diesel#>

alterar este criterio para que se determinen los grupos por criterios poblacionales no afecta de manera significativa los resultados del modelo.

Tabla 10: Distribución de ciudades por grupos según compromisos de renovación de flota a buses eléctricos y población

Grupo	Ciudades	Criterio	Población (millones)	Porcentaje
A	4	Compromiso	62	23,1%
B	8	Pob>5M Flota >1%	57	21,5%
C	49	Pob>1M	87	32,6%
D	87	Pob>500.000	61	22,8%
Total	148		267	100%

Fuente: Elaboración propia.

Considerando la distribución de ciudades propuesta en la Tabla 10, se plantean tres escenarios. Todos los escenarios asumen que un porcentaje de buses nuevos que se adquieran serán eléctricos. Esta adquisición responde tanto a la renovación de flota por antigüedad, como a la adquisición de buses para satisfacer incrementos en la demanda—demanda nueva—. Se ha asumido que la vida útil de un bus es de 15 años. Debido a que no se tiene información sobre la antigüedad actual de la flota de buses, se asume que la salida de buses es, en promedio, el 6.67% de la flota total,¹¹ lo que implica que cada año salen de circulación una proporción igual de buses a causa de depreciación. Por su parte, se asume que el crecimiento de la población urbana es igual en todas las ciudades de cada país, proyectando el crecimiento de las ciudades a partir de las estimaciones de Naciones Unidas. En este sentido, la transición a la electromovilidad sería por sustitución de flota y/o para satisfacer demanda por crecimiento poblacional, es decir, adquisición de nueva flota en el largo plazo. Nótese que, bajo estos supuestos, la sustitución de los buses es siempre un rubro mayor que la demanda nueva (ver Figura C.1).

Finalmente, de manera similar al modelo de transporte privado, se han planteado tres escenarios de penetración de la flota de buses eléctricos (Tabla 11). Estos escenarios marcan la senda de sustitución de la flota eléctrica para cada grupo de ciudad de la siguiente manera:

Escenario optimista: Bajo este escenario la sustitución de la flota hacia unidades eléctricas es considerablemente rápida. Para las ciudades del Grupo A, la totalidad de buses nuevos corresponde a vehículos eléctricos (100%), es decir, vehículos que responden tanto a demanda nueva como renovación; mientras que en el caso del Grupo B dicho porcentaje asciende a 80%; en las ciudades del Grupo C a 50%; y finalmente, para el Grupo D a 20%.

Moderado: Bajo este escenario, en las ciudades del Grupo A el 80% de buses adquiridos serían eléctricos. En las del Grupo B el 60%; en las del grupo C el 30%; y en las del Grupo D el 10%.

¹¹ Nótese que $6.67\% = 1/\text{años de longevidad} = 1/15$

Pesimista: Bajo este escenario, la adquisición de buses eléctricos es un poco más lenta que en los otros escenarios. En este marco, en las ciudades del Grupo A el 60% de buses adquiridos sería eléctrico; 40% para el Grupo B; mientras que solo 20% y 5% para los Grupos C y D, respectivamente.

Tabla 11. Categorías y escenarios de penetración de buses eléctricos

Categoría	Criterio	% población de la región	Penetración buses eléctricos a 2050		
			Pesimista	Moderado	Optimista
A	Compromiso de incorporación de buses eléctricos	23,1%	60%	80%	100%
B	Población >5M Flota >1%	21,5%	40%	60%	80%
C	Población >1M	32,6%	20%	30%	50%
D	Población >500K	22,8%	5%	10%	20%

Fuente: Elaboración propia

3.1.1.3 Estimación de la flota existente de buses

Para estimar la flota existente total de buses en la región se han usado dos bases de datos principales: *i)* el Observatorio de Movilidad Urbana (OMU) cuenta con una documentación detallada de la infraestructura de movilidad en 29 de las principales ciudades de la región realizado por la CAF. Es importante notar que estas ciudades representan una tercera parte de la población urbana en ALC; *ii)* base de datos de SimpleMaps contiene información sobre la población urbana de todas las naciones del mundo, incluyendo ALC, recolectada a través de inteligencia artificial usando imágenes satelitales. Esta ha sido construida por la National Geospatial-Intelligence Agency, U.S. Census, USGS y NASA.

Para determinar la flota existente total, se ha utilizado en primer lugar la flota de microbús, bus estándar, bus articulado y biarticulado reportada en el OMU. Con el fin de llevar todos los datos de flota existente total a las mismas unidades se consideran las equivalencias presentadas en la Tabla 12.

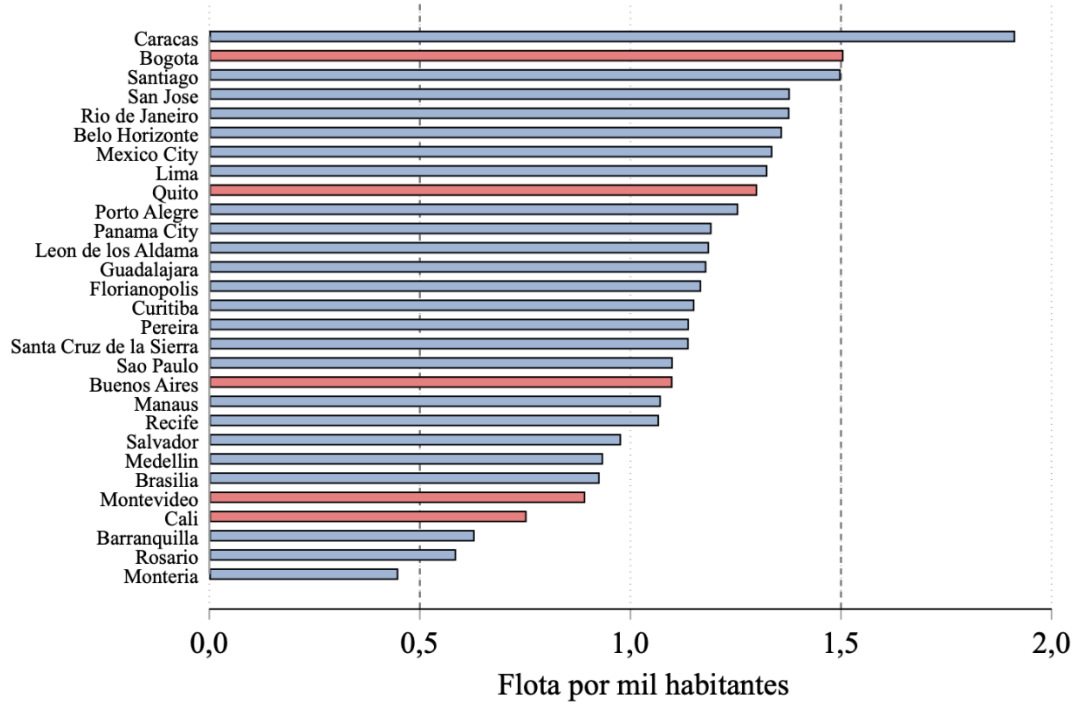
Tabla 12: Equivalencia de tipo de buses a bus estándar

Tipo de Bus	Capacidad de Pasajeros	Equivalencia a Bus Estándar
Microbús	20	0,5
Bus Estándar	40	1,0
Bus Articulado	80	2,0
Bus Biarticulado	120	3,0

Fuente: Elaboración propia con datos de OMU

Basándose en las equivalencias de la Tabla 12, la Figura 14 presenta la proporción de buses por cada mil habitantes en 29 de las principales ciudades de la región en 2015. Estas ciudades representan el 55% de la población total dentro del análisis. Es importante notar que, con excepción del caso de Caracas (Venezuela) y Montería (Colombia), todas las ciudades se encuentran en el rango de 0,5 – 1,5 buses por cada mil habitantes, de acuerdo con el rango recomendado Banco Mundial y PPIAF (2006).

Figura 14: Buses por cada mil habitantes 2024 en ciudades con datos dentro del OMU o con datos oficiales



Fuente: Elaboración propia usando datos del OMU y datos gubernamentales

Nota: Las líneas azules provienen del OMU y han sido actualizados para 2024. Mientras que las rojas son datos gubernamentales de 2024.

Las estimaciones del 2015 se actualizaron al 2024 considerando el crecimiento poblacional y supuestos sobre la proporción de buses por habitantes. Para las ciudades que tienen registro dentro de los datos del OMU (las ciudades contenidas en Ω , donde Ω representa el conjunto de ciudades del OMU), se ha asumido que la proporción de buses respecto de su población ha sido constante a lo largo del tiempo. Por su parte, para las ciudades que no están contenidas en esta base de datos, se ha asumido que tienen una proporción de un bus por cada mil habitantes. Así, la Ecuación 10 representa el cálculo de estimación de flota total de buses para 2024 en las ciudades donde no se tienen datos oficiales:

$$F_{i,t} = \begin{cases} P_{i,t} \frac{b_{i,2015}}{P_{i,2015}} & \text{si } i \in \Omega \\ P_{i,t} \frac{1}{1000} & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (10)$$

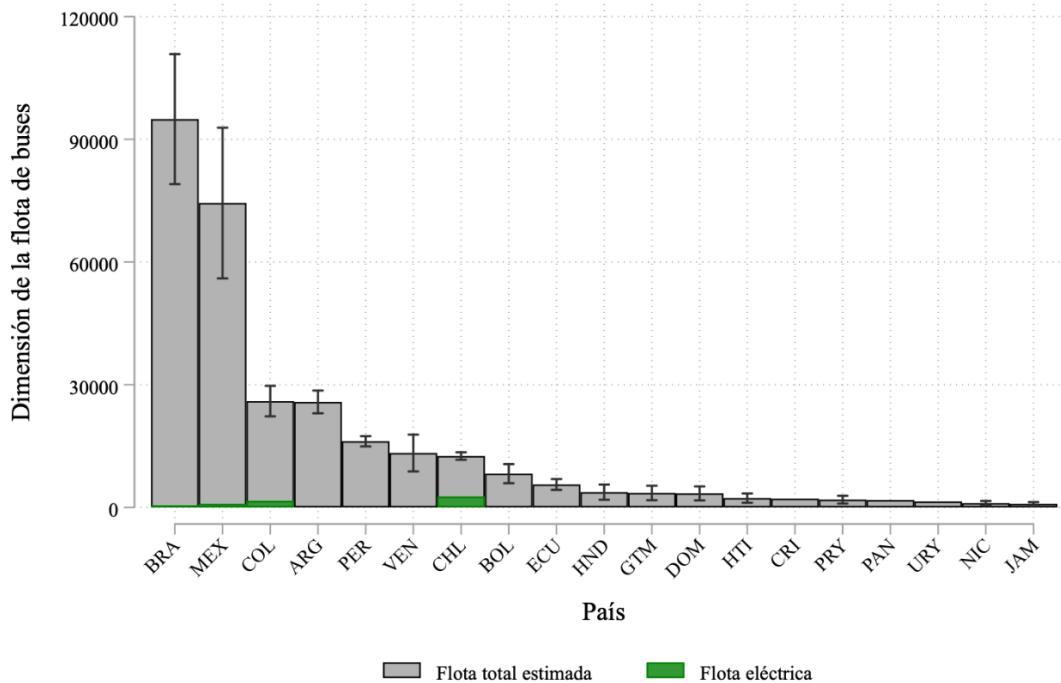
Donde los subíndices i y t representan ciudad y año, respectivamente; F es la dimensión de la flota total estimada, P simboliza la población, y b es la cantidad de buses estándar. Finalmente, Ω es el conjunto de ciudades representadas en el OMU. Nótese que, cuando se dispone de datos más recientes sobre la flota total provenientes de fuentes oficiales, estos son los utilizados. Este es el caso de Bogotá, Quito, Buenos Aires, Montevideo y Cali. Por otro lado, con el fin de que las estimaciones de flota total mantengan un mayor grado de fiabilidad, se asume que la flota total de las ciudades no representadas en OMU tienen un margen de error, conservando las proporciones sugeridas por el Banco Mundial y PPIAF (2006), de acuerdo con el siguiente detalle.

$$F_{it}^{min} = P_{it} \frac{1}{2000}$$

$$F_{it}^{max} = P_{it} \frac{1}{667}$$
(11)

La Figura 15 presenta la flota total de buses estimada para cada país de la región. La barra gris representa la flota total de buses, mientras que la verde representa la flota eléctrica ya adquirida en cada país de acuerdo con las estadísticas reportadas por Frost y Sullivan (2024). Las líneas de error representan el margen estimado siguiendo lo señalado en la Ecuación 11. Nótese que el margen de error a nivel regional es de aproximadamente 20%. Solo cuatro países tienen presencia significativa de buses eléctricos; estos son Chile, Colombia, México y Brasil, en su orden de mayor a menor.

Figura 15: Flota total estimada de transporte público existente en ALC (2024)



Fuente: Elaboración propia usando datos del OMU y SimpleMaps

3.1.1.4 Proyección de la flota total

En esta sección se presenta la metodología para estimar la dimensión de la flota total de buses hasta el 2050 en la región, y una sustitución de la flota siguiendo los lineamientos planteados en los escenarios. En primer lugar, la proporción de la flota total de buses respecto de la población total se asume constante a lo largo del tiempo. En este sentido, la flota crece de acuerdo con el crecimiento urbano:

$$F_{i,t+l}(U_{c,t+l}) = F_{i,t}(1 + \Delta\%U_{c,t+l}) = F_{i,t} \left(\frac{P_{c,t+l}^u}{P_{c,t}^u} \right) \quad (12)$$

Donde los subíndices i y t representan ciudad y año, respectivamente; mientras que el subíndice c representa al país. $F_{i,t}$ es la flota total estimada para 2024, como se ha propuesto previamente. Finalmente, $P_{c,t}^u$ es la población urbana en el país c y año $t + l$. Para esto, se usarán las estimaciones de crecimiento de población urbana proyectada por Naciones Unidas. Debido a que estas proyecciones no existen para cada ciudad individual, se ha asumido que todas las ciudades dentro de cada país crecen al mismo ritmo. De esta manera, la flota total de buses es una función del crecimiento urbano del país. En este sentido, se asume que la relación de la flota total respecto de la población de cada ciudad se mantiene constante.

De acuerdo con la metodología propuesta, la adquisición de nuevas unidades de transporte público eléctrico se puede dar por dos razones. Esto es, por renovación de buses que han cumplido su ciclo; o por compra de buses que se usan para satisfacer demanda nueva por crecimiento poblacional. El porcentaje de nuevas unidades que serán eléctricas dependerá del tipo de ciudad—grupo A, B, C o D—y del escenario—optimista (O), moderado (M) o pesimista (P)—de acuerdo con lo descrito en la sección 3.1.1.2. En este sentido, la flota de buses eléctricos evoluciona de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\Gamma_{i,t}^{j,s} = \phi_{i,t}^{j,s} [\delta F_{i,t-1}(U_{c,t}) + \Delta F_{i,t}(U_{c,t})] \quad (13)$$

Donde los subíndices i y t representan ciudad y año, respectivamente. El superíndice $j \in \{A, B, C, D\}$, es el grupo al que la ciudad pertenece; y $s \in \{O, M, P\}$ representa el escenario. Γ representa la flota de buses eléctrica; $F(U)$ es la flota total de buses de la ciudad, que depende del crecimiento urbano U ; δ representa la fracción de la flota total que se deprecia anualmente; finalmente, ϕ es la fracción de la flota que se adquiere eléctrica anualmente, que depende del escenario y el tipo de ciudad. En este sentido, la adquisición de flota de buses eléctricos depende de dos componentes: en primer lugar, de la *renovación* de flota depreciada $\delta F_{it}(U_{ct})$, y por el otro, de la *demanda nueva* de flota para satisfacer la demanda naciente $\Delta F_{it}(U_{ct})$.

Por su parte, la metodología plantea que la renovación neta de depreciación es según los escenarios planteados en la Figura 14. Para esto, los objetivos de las ciudades están planteados según la Ecuación 5:

$$\Gamma_{i,t}^{j,s} - \Gamma_{i,t-\Delta}^{j,s} = \theta^{j,s} [\delta F_{i,t-1}(U_{c,t}) + \Delta F_{i,t}(U_{c,t})] \quad (14)$$

Donde $\Gamma_{i,t-\Delta}^{j,s}$ representa los buses eléctricos que serían chatarrizados, y $\theta^{j,s}$ es la proporción de sustitución eléctrica, neta de depreciación. La diferencia entre las Ecuaciones 13 y 14 radica en que la primera es el máximo nivel de sustitución que puede alcanzar una ciudad para un año dado. Mientras que la segunda—al considerar la salida de buses obsoletos—representa la sustitución neta de depreciación, que es el objetivo de sustitución de las ciudades según lo planteado previamente. Es decir, $\theta^{j,s}$ es un parámetro objetivo, que se obtiene decidiendo $\phi_{i,t}^{j,s}$. De esta manera, las ciudades tomarán decisiones de sustitución de acuerdo con la Ecuación 15:

$$\phi_{i,t}^{j,s} = \min \left\{ \theta^{j,s} + \frac{\Gamma_{i,t-\Delta}^{j,s}}{\delta F_{i,t-1}(U_{c,t}) + \Delta F_{i,t}(U_{c,t})}; 1 \right\} \quad (15)$$

Nótese que para los primeros años $\theta^{j,s} = \phi_{i,t}^{j,s}$ debido a que no hay desgaste de buses eléctricos. Es decir, $\Gamma_{i,t-\Delta}^{j,s} = 0$ antes del 2040. Por consecuencia, a partir de este año la sustitución de la flota eléctrica será más costosa. Esto debido a que a partir de este año los buses eléctricos adquiridos en 2025 se depreciarían por completo. Finalmente, cuando las metas son lo significativamente altas se deberá adquirir el 100% de la nueva flota eléctrica para poder cumplir con los objetivos de los escenarios. En este sentido, debido a que el máximo nivel de renovación es 100% de las adquisiciones, $\phi_{i,t}^{j,s}$ es el mínimo entre el objetivo y 1.

Si se sigue el criterio de sustitución propuesto en la Ecuación 6, se garantizará que todas las ciudades, más allá del periodo de análisis, renovarían la flota total de buses a una flota eléctrica eventualmente. Esto sucedería al cumplirse el tiempo lo suficientemente extenso para el caso de las ciudades cuyas metas son relativamente bajas—ciudades del Grupo D—.

Finalmente, el costo relativo al PIB es el costo contable para cada año. Es decir, este indicador ha sido construido como el costo de renovar la flota—numerador de la Ecuación 7—relativo al PIB regional—denominador de la Ecuación 16—.

$$\Lambda_t = \frac{\sum_i^N \Gamma_{i,t}^{j,s} \lambda_t}{\sum_p GDP_{p,t}} \quad , \quad (16)$$

donde λ_t es el costo unitario por vehículo en el año t ; mientras que Λ_T es el costo relativo al PIB.

3.1.2 Demanda eléctrica

El bus eléctrico induce a un incremento en la demanda de energía eléctrica para la movilidad. La autonomía de los buses eléctricos ha sido ampliamente estudiada recientemente. El consumo de energía del bus eléctrico varía según diferentes aspectos, entre los que se encuentran: la tecnología utilizada en la construcción del bus eléctrico; la experiencia del

conductor; las condiciones del tráfico; las condiciones atmosféricas; el perfil de altitud de la ruta; el grado de ocupación de los pasajeros; entre otros. En general, el rendimiento de los buses se encuentra entre 1,0 y 3,5 kWh/km (Li et al., 2016; Vellucci y Pede, 2018). Por su parte, Iclodean et al. (2019) encuentra que un bus eléctrico tiene un rendimiento de 1,37 kWh/km. En este sentido, se asume que $E = 1,5 \text{ kWh}/\text{km}$, para ser conservadores.

Para determinar el consumo energético de electricidad total, se debe considerar la intensidad de uso de los buses. En este sentido, el estudio toma como referencia una distancia anual recorrida de 55.360 kilómetros por bus (Avenali et al., 2023), lo cual representa un parámetro estándar de operación para buses urbanos en servicio regular en la región. Además, esta cifra es coincidente con fuentes alternativas en la región como lo registrado por DTP en Santiago de Chile con 49.000 kilómetros recorridos por bus en 2024. Esta cifra permite calcular la demanda eléctrica agregada considerando tanto el rendimiento por kilómetro como la utilización esperada de la flota.

3.1.3 Costo de cargadores

Existen diversas formas de infraestructura para cargar los buses eléctricos. En primer lugar, las estaciones de carga permiten cargar los buses una vez terminen el ciclo de circulación diario. Por otro lado, las estaciones de cambio de batería, se trata de también de un mecanismo de carga inductivo en el que, a diferencia del método anterior, los buses no tienen que estar estacionados para ser recargados, sino que las baterías son cargadas para ser reemplazadas. Finalmente, a través de la infraestructura de carga en circulación, los buses reciben carga de manera conductiva, lo que implica que los buses no llevan una batería incorporada, sino que reciben carga a medida que circulan.

Chen et al. (2018) identificaron los costos de oportunidad asociados a estos tres métodos. En este estudio se determina el modelo de carga más beneficioso para 38 ciudades alrededor del mundo, entre las cuales se encuentran seis latinoamericanas: Bogotá, Buenos Aires, Cali, León, Lima y Ciudad de México. De acuerdo con sus hallazgos, el 90% de las ciudades tiene ventaja comparativa de adecuar sus instalaciones a un método de infraestructura de carga en circulación—a todas las latinoamericanas se les recomienda este método (Chen et al., 2018). Sin embargo, esta infraestructura tiene varios problemas que dificultan su implementación: *i)* en primer lugar, este tipo de infraestructura está diseñada para rutas de buses con carriles independientes como BRT; *ii)* por otro lado, este tipo de infraestructura requiere una inversión de choque para renovar la flota, ya que es rentable siempre que la totalidad de la flota sea eléctrica (Chen et al., 2018). Por tales motivos, y teniendo en cuenta que se plantea una sustitución gradual de la flota hacia unidades eléctricas, es un tipo de infraestructura difícil de implementar de manera generalizada en la región. De esta manera, para la presente estimación se propone el uso de estaciones de carga de batería. Si bien esta infraestructura es un poco menos competitiva que la infraestructura de carga en circulación y estaciones de cambio de batería, esta es la tecnología que ha sido masificada en la región actualmente.

De esta manera, el modelo propuesto por Chen et al. (2018) argumenta que la decisión de construcción de una *estación de carga* viene dada por la minimización de costos de acuerdo con el siguiente modelo:

$$\min Z(n, E, Q) = R(n) + QB(E) \quad (17)$$

$$s. t: \quad k = \left\lceil \frac{\theta E \beta}{l} \right\rceil$$

$$Q = ft$$

$$t = \left\lceil \frac{l}{v} + \frac{\left(\frac{fT}{Qk} - 1\right) \left(\frac{kl}{\beta \alpha P} + t_0\right) Q}{fT} \right\rceil$$

$$n \geq \frac{lf}{\beta \alpha P} - \frac{klQ}{\beta \alpha PT}$$

Donde $Z(n, E, Q)$ es el costo total de mantener servicio con buses eléctricos, compuesto por $R(n)$ que es el costo de la infraestructura de carga de baterías; Q representa la flota y $B(E)$ es el tipo de bus con batería de dimensiones E . De esta manera, $R(n) = (A_0 + na_0)C_a + C_s P n$, donde C_a representa los costos fijos de construcción de la *estación de carga*, A_0 es el área fija para su construcción, a_0 es el área requerida para cada cargador y C_s son los costos unitarios por cargador. E es la dimensión de la batería, α es la eficiencia de recarga, P el poder de carga, de tal manera que αP es la potencia de energía por hora efectiva, y n el número de estaciones de carga óptimo. Asimismo, $B(E) = C_b + C_e E$, donde C_b es el precio del bus eléctrico y C_e el costo de la batería. Por otro lado, T representa el tiempo total de operación, θ el rango de estado de carga, de modo que θE representa el estado de carga máximo bajo el cual una batería puede ser usada, y β es el rendimiento de la batería. De esta manera, k es el número máximo de vueltas que puede dar un bus antes de tener que recargar la batería, y t_0 representa el retraso en el acceso y salida de carga de los buses. Nótese que, si bien el modelo incluye todos los costos asociados a la movilidad eléctrica como costo del bus y costo de la batería eléctrica, todos estos costos han sido determinados en la subsección 3.1.1.1. Esta subsección se encargará de determinar específicamente el número óptimo de estaciones de carga para cualquier cantidad de buses eléctricos en circulación.

Finalmente, los factores variantes entre los tipos de ciudades que determinan las decisiones óptimas son f que representa la frecuencia de buses por hora, l que es la longitud por donde circulan los buses, y v que representa la velocidad del servicio. Intuitivamente, este sistema de ecuaciones responde cuál es el costo para atender un número de buses (Q) dado que se pueden instalar n cargadores.

Las Tablas 13 y 14 presentan la parametrización del modelo. La Tabla 13 presenta los parámetros que son invariantes entre las ciudades. Por su parte, la Tabla 14 muestra la

calibración de los parámetros de longitud del sistema de transporte, frecuencia de servicio y velocidad promedio. De acuerdo con Nie y Ghamami (2013), el área de construcción fija para una estación de carga (A_0) se establece en 185,8 metros cuadrados, con un costo unitario de construcción (C_a) de \$2.239 por metro cuadrado. En su investigación, el área de construcción variable requerida para un cargador (a_0) se estima en 83,61 metros cuadrados considerando que el bus eléctrico es aproximadamente tres veces mayor que el automóvil particular. De acuerdo con el Chen et al. (2018), el costo de instalación de un cargador enchufable con potencia de 90kW puede alcanzar los \$40.000. Por lo tanto, establecemos que $C_s = \$40.000/90kW = \$444/kW$.

Tabla 13: Parametrización del modelo

Parámetro	Descripción	Valor
T	Horas de operación	22,2 h
α	Eficiencia de recargo	0,9
θ	Rango de estado de carga	0,6
P	Poder de carga	120 kW
A_0	Área de construcción para cada estación de carga	185,8 m ²
a_0	Área de construcción requerida para un cargador	83,6 m ²
C_s	Costos unitarios por cargador	\$444/kW
C_e	Costo de la batería	\$570/kWh
C_b	Costo de fabricación del bus eléctrico	\$360.000/veh
C_a	Costo de construcción unitario	\$2.239/m ²

Fuente: Chen et al., (2018)

La Tabla 14 presenta los parámetros usados para cada tipo de ciudad. Debido a la escasez de datos para la calibración de cada ciudad, se han agrupado las ciudades según su tamaño. De manera consistente con la división propuesta en la Tabla 10, se ha dividido las ciudades en tres grupos: el primero grupo corresponde ciudades grandes, cuya población es superior a 5 millones de habitantes, el segundo grupo a ciudades medianas que cuentan con una población entre 1 y 5 millones, y el tercer grupo a ciudades pequeñas, que son aquellas que tienen menos de 1 millón de residentes. Para los parámetros de las ciudades grandes se ha usado el promedio de Bogotá, Buenos Aires, Lima y Ciudad de México, mientras que para las ciudades medianas se usa el promedio de Cali y León. Finalmente, para la calibración de las ciudades pequeñas se ha usado la calibración del escenario base usado en Chen et al. (2018).

De esta manera, las estaciones de carga más costosas son las de las ciudades grandes que alcanza un costo superior a USD 15,1 millones, mientras que en las ciudades medianas llegan a un costo de USD 6,6 millones y ciudades pequeñas de USD 1,5 millones. Sin embargo, al considerar la cantidad de buses que puede atender cada estación se evidencian las economías de escala de las ciudades grandes. Así, las ciudades que incurren en los menores

incrementos de costos son las ciudades grandes, mientras que las ciudades pequeñas son las que incurren en los mayores costos promedio por estaciones de carga.

Tabla 14: Parámetros variantes por tipo de ciudad

Parámetro	Descripción	Grande (Pob > 5M)	Mediana (5M> Pob > 1M)	Pequeña (Pob <1M)
l	Distancia	115,2 km	49,0 km	12,4 km
f	Frecuencia del servicio	117 veh/h	92 veh/h	9 veh/h
v	Velocidad promedio	20,5 kmh	20,6 kmh	19,0 kmh
$R(n)$	Costo estación de carga	\$27,2 M	\$11,2 M	\$0,7 M
$R(n) / Q$	Costo estación de carga por bus	\$35.122	\$41.506	\$94.194
$R(n) / n$	Costo estación de carga por cargador	\$242.662	\$249.462	\$350.003

Fuente: Chen et al., (2018)

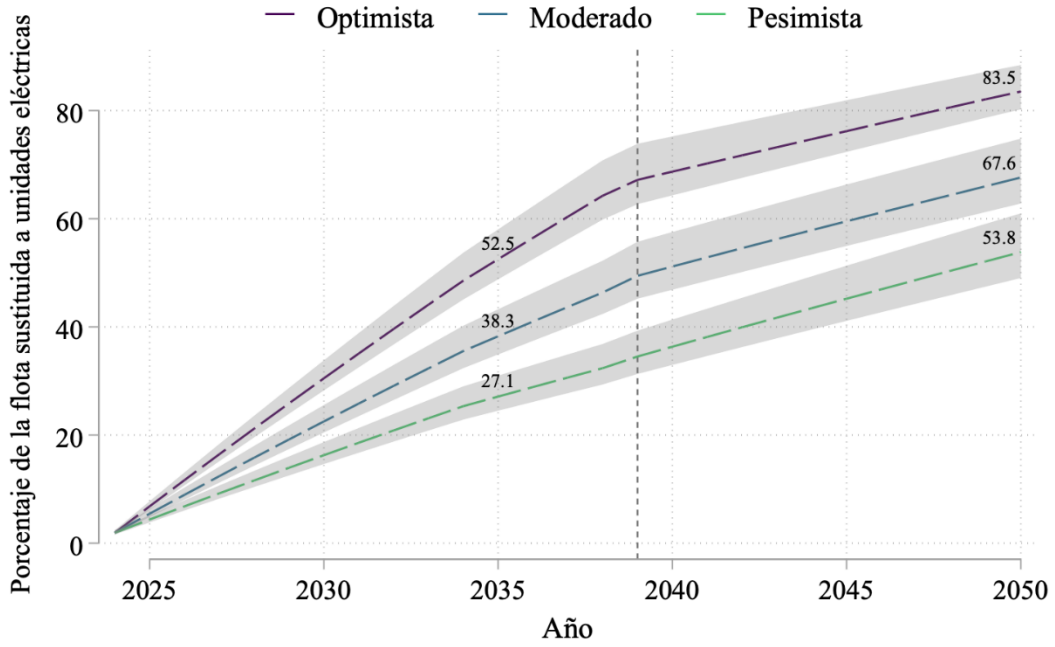
Nota: Los valores presentados corresponden a promedios por tipo de ciudad. Existen diferencias relevantes entre ciudades dentro de cada categoría, por lo que estos parámetros deben interpretarse como valores representativos y no como estimaciones específicas para cada caso urbano.

3.2 Resultados

La Figura 16 presenta el porcentaje de flota de buses eléctrica para el período bajo análisis 2025-2050 considerando los diferentes escenarios asociados a la electrificación. El área gris representa el intervalo de confianza de las estimaciones (ver subsección 3.1.1.2). En el marco del escenario optimista, la mitad de la flota se lograría sustituir a unidades eléctricas para 2035, y este valor ascendería a más del 80% del total de la flota para el 2050. Por su parte, el escenario pesimista plantea que la sustitución de mediano plazo registraría una cuarta parte del total, mientras que la de largo plazo alcanzaría la mitad de la flota. Finalmente, en el escenario moderado se alcanzaría a sustituir hasta dos terceras partes de la flota para 2050. Nótese que a partir de 2040 la velocidad de sustitución es menor. Esto se debe a que se ha asumido una vida útil de 15 años de los buses, por tal motivo los buses adquiridos en 2025 han de ser chatarrizados en este año.

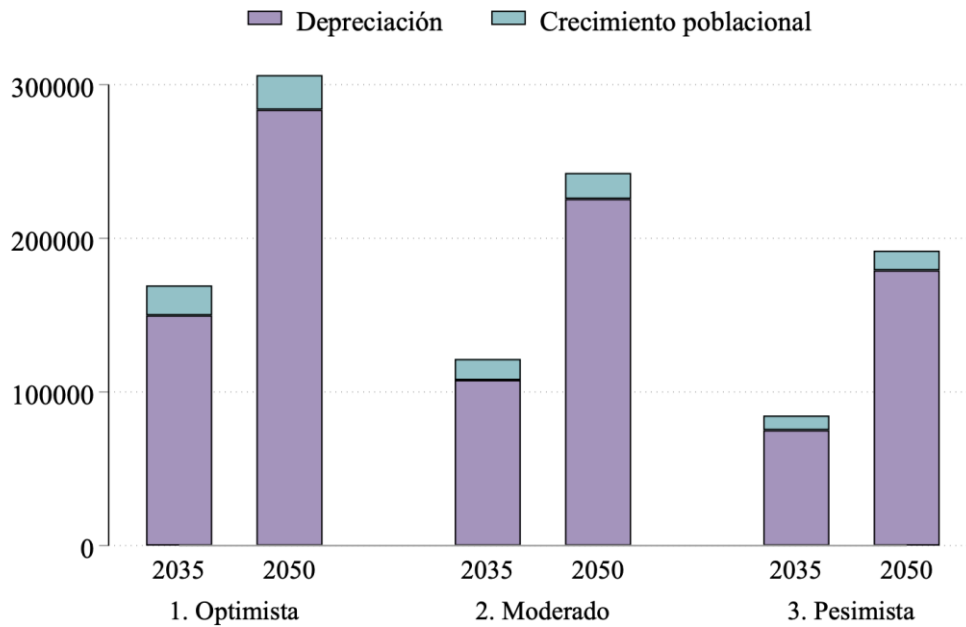
Por su parte, la Figura 17 muestra la proporción de la sustitución causada por depreciación y la proporción causada por crecimiento de la población para los años 2025 y 2050. La depreciación es la principal causante de sustitución de la flota de buses. Indistinto del escenario, esta representa el 88% en 2035. Para 2050, la depreciación es causante del 93% de la sustitución de la flota. El Apéndice C muestra en detalle los datos por los que la depreciación es la principal causante.

Figura 16: Porcentaje de la flota eléctrica de buses renovada



Fuente: Elaboración propia usando datos del OMU y SimpleMaps
 Nota: El área gris representa los intervalos de confianza del modelo

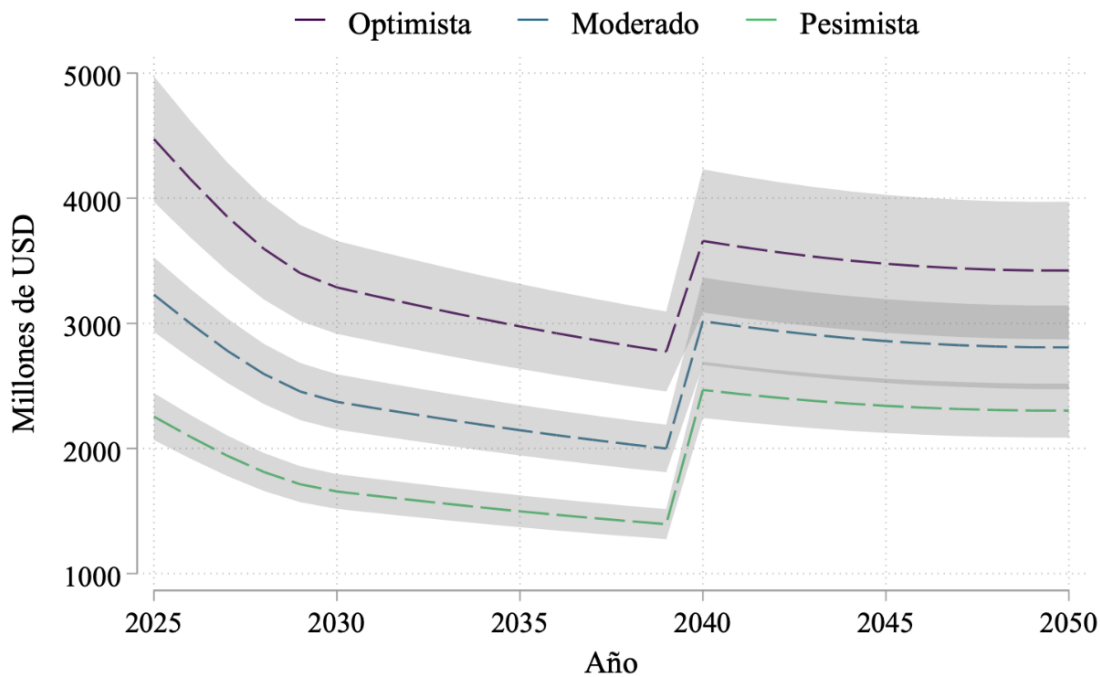
Figura 17: Proporción de flota eléctrica renovada por depreciación y crecimiento poblacional



Fuente: Elaboración propia usando datos del OMU y SimpleMaps

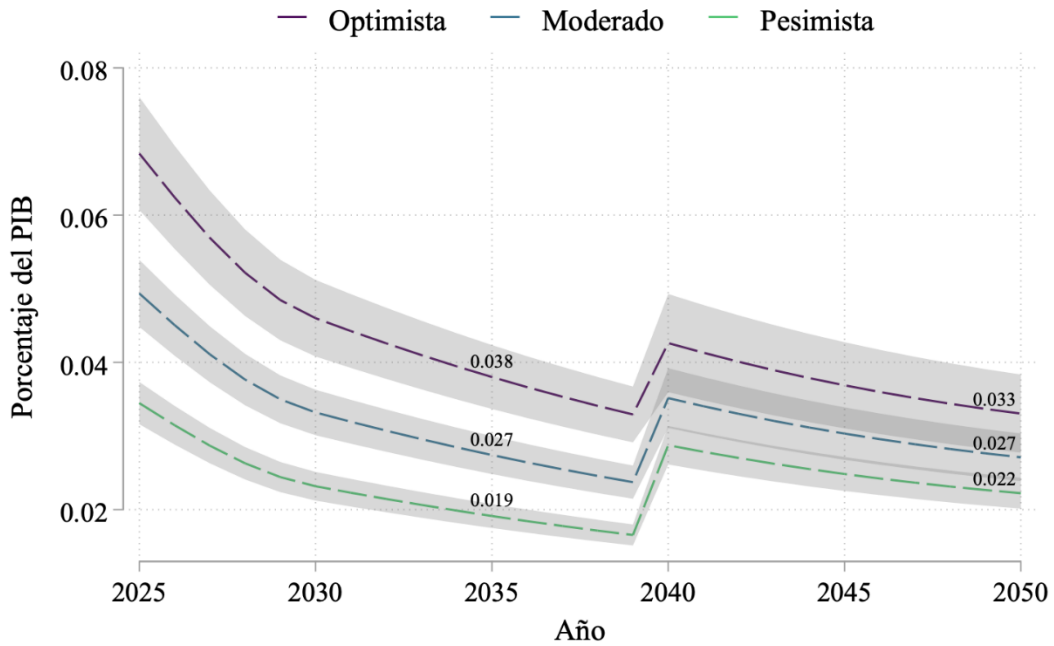
Por su parte, la Figura 18 presenta el costo total de la sustitución de la flota de buses. A pesar de que el costo por unidad decrece—siguiendo lo asumido en la subsección 3.1.1.1—el costo total tiene un incremento significativo en el 2040. Esto se debe a que para este año se deben reponer los buses chatarrizados que habrían sido adquiridos en 2025. En este sentido, debido al desgaste, la velocidad de renovación respecto a la flota total decrece y los costos de sustitución se incrementan, a pesar de que se ha asumido que los costos unitarios por unidad decrecen. De manera similar, la Figura 19 presenta cuánto es este costo relativo al PIB regional. Para esto, se han usado las proyecciones de crecimiento del PIB de OCDE y el World Economic Outlook. Bajo los escenarios planteados, los costos de sustitución ascenderían entre el 0,023 – 0,041% del PIB anual. El escenario Moderado pronostica que, para 2050, dos terceras partes de la flota serían sustituidas por unidades eléctricas. El costo de lograr esta meta de sustitución ascendería a 0,031% del PIB regional anual—este valor no tiene en cuenta la inversión en flota a combustión interna que tendría que hacerse si no se adquirieran unidades eléctricas—. Por su parte, lograr el 100% de sustitución de la flota para 2050 requeriría una inversión del 0,053% del PIB regional, lo que representa un 15% más que la renovación de los buses a combustión interna.

Figura 18: Costo de renovación a buses eléctricos por año según escenarios de electrificación



Fuente: Elaboración propia usando datos del OMU y SimpleMaps
 Nota: El área gris representa los intervalos de confianza del modelo

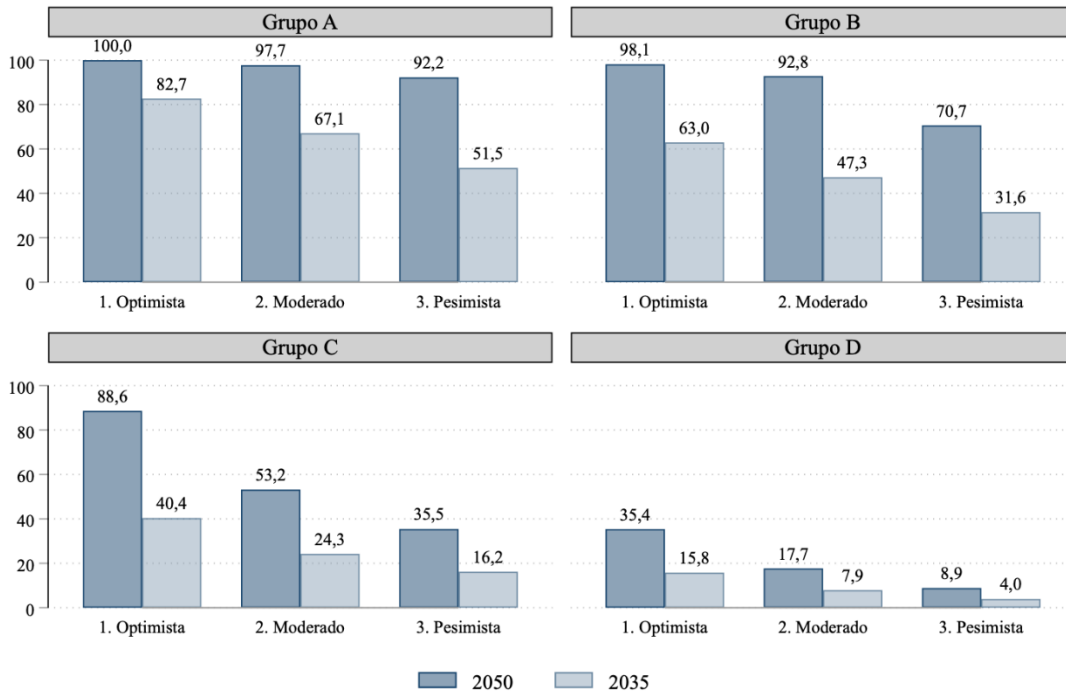
Figura 19: Costo de renovación a buses eléctricos respecto del PIB según escenarios de electrificación



Fuente: Elaboración propia usando datos del OMU, SimpleMaps y World Economic Forum
 Nota: El área gris representa los intervalos de confianza del modelo

Finalmente, la Figura 20 presenta el porcentaje de flota de buses sustituida a eléctricos en cada escenario al 2050 para cada grupo de ciudad, según lo categorizado en la Tabla 10. El Grupo A, que corresponde a la categoría de ciudades que tiene un compromiso de adquisición de flota de buses eléctricos, tendría una sustitución notoria, donde en el peor de los escenarios más del 90% de la flota total sería eléctrica a 2050. Por su parte, el Grupo D, que corresponde a la categoría de ciudades más pequeñas, tendría una sustitución de una tercera parte de su flota en el escenario más optimista y apenas de una décima parte en el escenario pesimista. Por su parte, la Figura 21 presenta el nivel de penetración para cada país de acuerdo con los escenarios planteados. De esta manera, bajo el escenario *optimista* todos los países—exceptuando Jamaica—superarían el 50% de penetración de la flota de buses eléctrica, mientras que bajo el marco del escenario *pesimista* todos los países superarían el umbral del 20%.

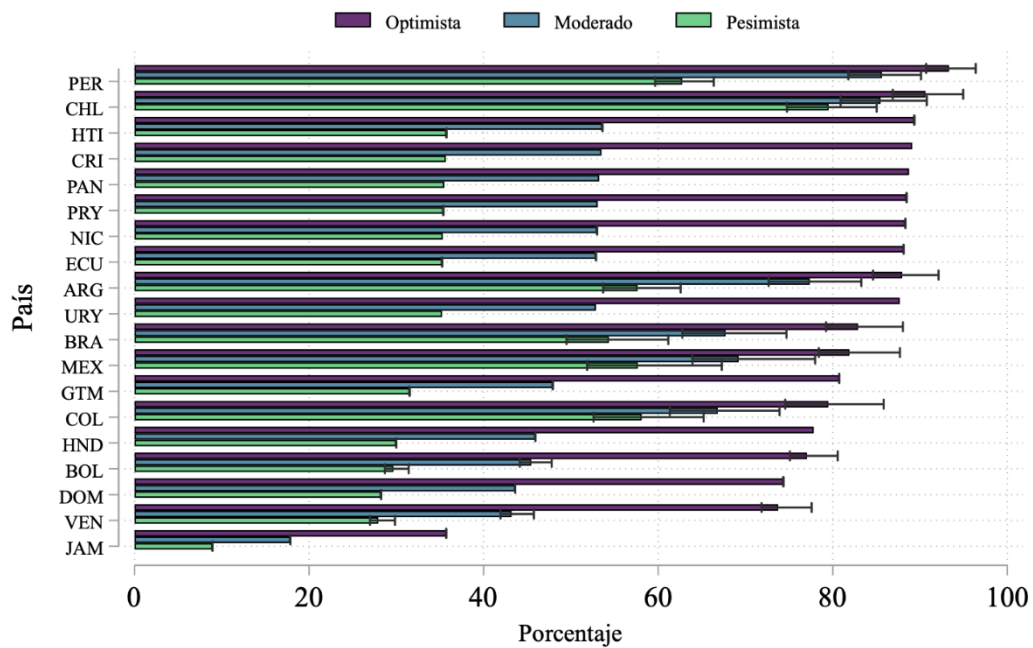
Figura 20: Porcentaje de flota total de buses sustituida por flota eléctrica al 2050 según grupo de ciudad



Fuente: Elaboración propia usando datos del OMU y SimpleMaps

Nota: Los grupos se definen de acuerdo con lo descrito en la Tabla 10 (ver subsección 3.1.1.2)

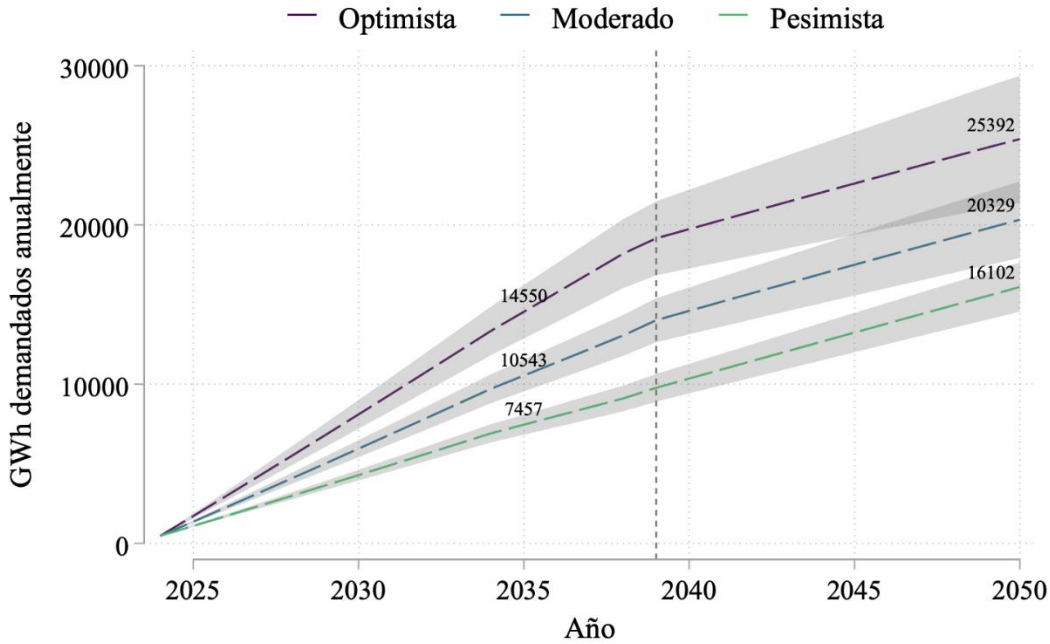
Figura 21: Estimación de porcentaje de flota de buses eléctrica al 2050 por país



Fuente: Elaboración propia usando datos del OMU y SimpleMaps

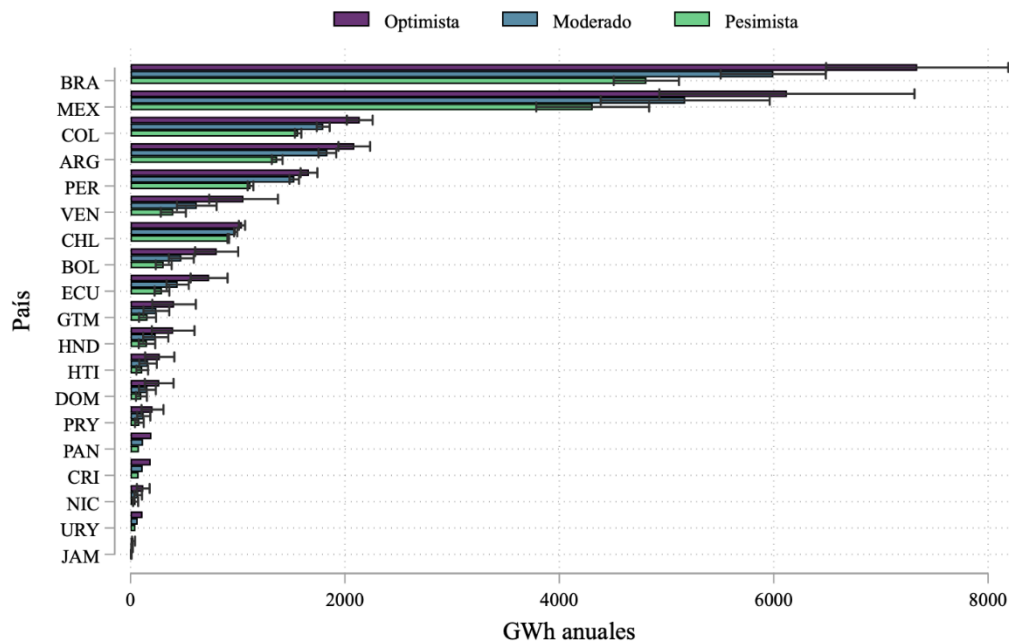
La Figura 22 presenta la evolución de la demanda eléctrica de los buses eléctricos siguiendo los lineamientos planteados en la sección previa. Bajo estos lineamientos, la región incrementaría su demanda eléctrica anual en aproximadamente 20 mil GWh para 2050. Brasil y México son los países donde la demanda eléctrica se espera que incremente más significativamente por su tamaño poblacional. Estos incrementarían en 6.000 y 5.300 GWh, respectivamente (ver Figura 23). Este aumento representa aproximadamente el 1,4% del total de electricidad consumida actualmente en la región.

Figura 22: Incremento de la demanda eléctrica según escenarios de electrificación de buses



Fuente: Elaboración propia usando datos del OMU y SimpleMaps
 Nota: El área gris representa los intervalos de confianza del modelo

Figura 23: Incremento de la demanda eléctrica por país según escenarios de electrificación de buses



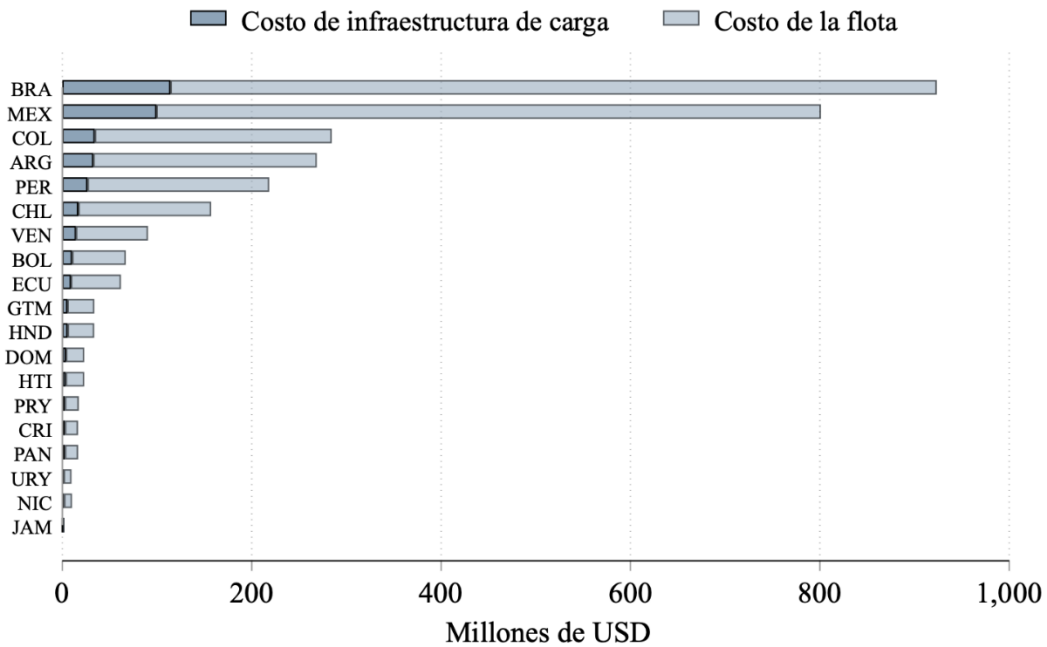
Fuente: Elaboración propia usando datos del OMU y SimpleMaps

Finalmente, la Figura 24 presenta el costo promedio anual del escenario *moderado*. Como es de esperarse, el costo de la infraestructura de carga de buses eléctricos es superior en los países de mayor tamaño, ya que estos tienen una flota mayor. Sin embargo, respecto del ingreso del país, Bolivia y Haití tienen que hacer el mayor esfuerzo económico (ver Figura 25). Esto se debe a que tienen una alta proporción de la población en áreas urbanas, con lo que la flota renovada es considerable, y tienen un ingreso relativamente bajo para la región.

El costo total de la transición hacia un sistema de movilidad eléctrica equivale al 0,036% del PIB regional anual, de los cuales 0,031% corresponde a la adquisición de los buses eléctricos y 0,005% al de la infraestructura de carga. En términos absolutos, esto implica que el costo anual aumentaría de alrededor de US\$ 2.600 millones a cerca de US\$ 3.000 millones al incluir el costo de la infraestructura de cargadores. Cabe destacar que esta estimación no contempla los costos asociados a la generación eléctrica ni al refuerzo de las redes de distribución eléctrica.

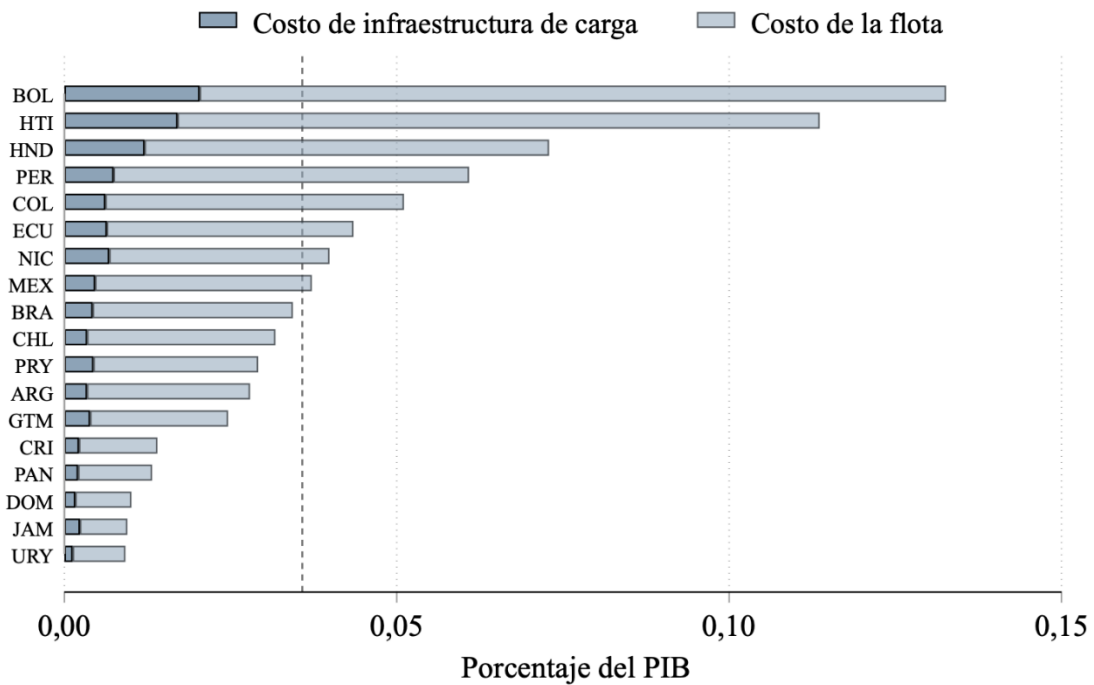
Transitar hacia un sistema de transporte público 100% eléctrico en el período 2025 – 2050, requiere una inversión de 0,061% del PIB regional anual. Esto representa una inversión anual promedio de US\$ 5,066 millones. Por su parte, si no se toman medidas de transición hacia un sistema de transporte eléctrico y se mantiene una renovación de buses de combustión interna, el costo ascendería a un 0,046% del ingreso regional. En otras palabras, la transición a un sistema de transporte de buses eléctrico, considerando tanto la sustitución de la flota como la infraestructura de cargadores, sería un 33% más costoso que mantener el sistema actual de buses a combustión interna.

Figura 24: Costo total de la renovación de la flota eléctrica de buses bajo el escenario moderado (2050)



Fuente: Elaboración propia usando datos del OMU y SimpleMaps

Figura 25: Costo total de la renovación de la flota eléctrica de buses bajo el escenario moderado respecto del PIB (2050)



Fuente: Elaboración propia usando datos del OMU y SimpleMaps

4 Limitaciones

Es importante recalcar que en el marco de este estudio consideramos el costo contable en lugar del costo económico. Esto es relevante, ya que los buses eléctricos ganan competitividad respecto de los de combustión interna al considerarse estos costos (Chen y Wang, 2023). En consecuencia, este estudio no considera ahorros operativos ni beneficios ambientales, los cuales mejorarían su relación costo-beneficio.¹² Un análisis más amplio, incluyendo mantenimiento, externalidades y reducción del consumo de petróleo, queda fuera del alcance de este estudio. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es determinar el valor de la inversión inicial desde el punto de vista de los gobiernos para garantizar la transición a un sistema de transporte de buses eléctricos, y no desde el modelo de negocio de los operadores. Asimismo, en el caso del transporte privado, se consideran únicamente las inversiones requeridas por parte del sector público, correspondientes a la infraestructura de carga. No se incluyen en el análisis los ahorros potenciales en costos de operación y mantenimiento de los vehículos privados por parte de sus usuarios.¹³

Por su parte, este estudio ha permitido determinar el incremento de la demanda eléctrica asociado a la transición a automóviles y buses eléctricos considerando diferentes escenarios de penetración. No obstante, los costos de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica para garantizar la circulación de los buses eléctricos se encuentran fuera del alcance de este estudio. Este es un potencial camino para futuros estudios. Asimismo, los costos de la energía eléctrica, en comparación con los ahorros derivados del consumo de petróleo dada la sustitución de automóviles y buses a combustión interna, también se encuentran fuera del alcance de este estudio. Además, en el análisis del transporte privado, se considera únicamente al automóvil, excluyendo el cálculo de la motocicleta.

Finalmente, este estudio no considera posibles efectos sobre el cambio modal que puedan ocurrir. Por un lado, la renovación de la flota con mejoras operacionales, estándares de confort y tecnología de los vehículos, fomentan el cambio modal hacia el transporte público (Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones de Chile, 2025). Por otro lado, el transporte público es un bien inferior, y el crecimiento económico impacta negativamente su uso (Gandelman et al., 2019). Determinar si habrá un mayor uso del transporte público o privado, así como dimensionar este efecto, está fuera del alcance de este estudio.

¹² En el caso de Santiago de Chile, por ejemplo, ver Romero y Ramírez (2020).

¹³ Tampoco se incluyen los costos asociados a los cargadores residenciales que corresponderían a los propietarios de los vehículos.

5 Conclusiones

Este estudio presenta una evaluación comprehensiva de los costos asociados a la transición hacia la electromovilidad en ALC, tanto para el transporte privado como público, proyectando tres escenarios de electrificación hasta el 2050.

Para el transporte privado, se proyecta que la región podría alcanzar entre 68 y 127 millones de vehículos eléctricos e híbridos enchufables hacia 2050, representando entre el 27% y 50% de la flota total de vehículos livianos. Los países clasificados en la Categoría A, que cuentan con estrategias nacionales, incentivos y metas establecidas, alcanzarían niveles de penetración en ventas de entre 60% y 100% para 2050, aunque su penetración en la flota total sería considerablemente menor (entre 33% y 56%) debido a la significativa flota preexistente de vehículos convencionales.

El incremento en la demanda eléctrica asociada a los nuevos vehículos livianos oscilaría entre 141 mil y 265 mil GWh anuales, representando entre el 10% y 18% del consumo de electricidad actual de la región. Brasil y México representan más del 60% de esta demanda adicional en cualquiera de los escenarios considerados. De esta manera, la infraestructura de carga pública para garantizar el funcionamiento del sistema se estima entre US\$ 0,9 y US\$ 1,6 mil millones anuales, lo que equivale a un requerimiento de inversión anual de 0,013-0,022% del PIB regional. Este valor excluye los costos de cargadores residenciales que serían asumidos por los usuarios.

En cuanto al transporte público, bajo el escenario *Moderado*, se estima que dos terceras partes de la flota de buses podría ser eléctrica para 2050, requiriendo una inversión anual de 0,024-0,042% del PIB regional anual, considerando solo la sustitución de la flota, esto es sin considerar la infraestructura de carga. Por su parte, la infraestructura de carga representa aproximadamente el 14% del costo total de la transición en el transporte público. Esto se traduce en un requerimiento de inversión anual total de aproximadamente US\$ 3.000 millones anuales para el cumplimiento del escenario *Moderado*. Finalmente, el incremento de demanda eléctrica para el transporte público se estima en aproximadamente 20 mil GWh anuales para 2050, representando cerca del 1,4% del consumo energético actual de la región.

La transición completa hacia un sistema de transporte público de buses 100% eléctrico requeriría una inversión del 0,061% del PIB regional anual. Esto es 33% más costosa que mantener la renovación con buses convencionales de combustión interna (0,046% del PIB). Es importante destacar que estas estimaciones representan un límite superior de costos al considerar únicamente los costos contables y no los económicos, excluyendo potenciales ahorros operativos y beneficios ambientales que podrían mejorar significativamente la relación costo-beneficio de la transición.

Es notable que, aunque en el escenario moderado la renovación de la flota de transporte público es considerablemente mayor (67,6%) que la del transporte privado (38,3%), el incremento de la demanda eléctrica es mucho más alto en el transporte privado (100 mil GWh anuales) que en el público (20 mil GWh). Esta diferencia refleja las características

inherentes de cada sector: el transporte privado genera mayor demanda eléctrica debido al gran volumen de vehículos y sus patrones de uso menos eficientes, mientras que el transporte público permite movilizar más personas con un menor costo energético.

Los resultados también señalan importantes disparidades regionales. Brasil y México, debido a su tamaño, requerirán las mayores inversiones y experimentarán los mayores incrementos en demanda eléctrica (ver Figura 24). Sin embargo, países como Bolivia y Haití enfrentarán un esfuerzo económico proporcionalmente mayor debido a la combinación de su menor ingreso per cápita y relativamente alta proporción de población urbana (ver Figura 25).

Este análisis proporciona una base cuantitativa para la planificación de políticas públicas orientadas a la implementación de políticas de transporte costo-eficientes en la región. Investigaciones futuras deberían abordar los costos de generación energética asociados y realizar un análisis económico más amplio que incluya externalidades ambientales y ahorros operativos. Asimismo, será crucial explorar mecanismos de financiamiento innovadores para facilitar esta transición, especialmente en países con menores recursos económicos y altos niveles de informalidad.

6 Apéndice

6.1 Apéndice A

En esta sección se realiza un análisis de sensibilidad del supuesto de que los vehículos tienen una vida útil de 25 años antes de su chatarrización. Para esto, se ha ejecutado el modelo de Transporte Privado considerando una duración de 20 y 30 años, comparándolos con el parámetro base de 25 años. Nótese que por simplicidad la comparación se realiza bajo el marco del escenario *moderado*.

Por la naturaleza del modelo, a medida que se reduce la vida de los vehículos hay una mayor penetración de los vehículos eléctricos. Esto se debe a que la penetración de los vehículos eléctricos tiene lugar a medida que los vehículos de combustión interna van saliendo de circulación. Sin embargo, el efecto es claramente no lineal. Esto se nota en que, recortar la vida de los vehículos tiene un incremento superior en términos de penetración de vehículos eléctricos y costos, que la reducción ante un incremento de la vida útil de los vehículos. En este sentido, reducir la vida útil de 25 a 20, incrementa los costos en aproximadamente 16,3%, mientras que incrementar la longevidad a 30 años reduce los costos en 3,5%.

Tabla A.1: Sensibilidad de duración de los vehículos privados

	20 años	25 años	30 años
<i>Flota de Vehículos Eléctricos (millones)</i>	116,5	97,4	95,9
<i>Excedente de energía (miles de GWh)</i>	242,9	203,1	200,0
<i>Costo de cargadores (miles de millones de USD)</i>	43,5	37,0	36,4
<i>Costo de cargadores como porcentaje del PIB (promedio anual)</i>	0,020	0,018	0,017

Fuente: Elaboración propia

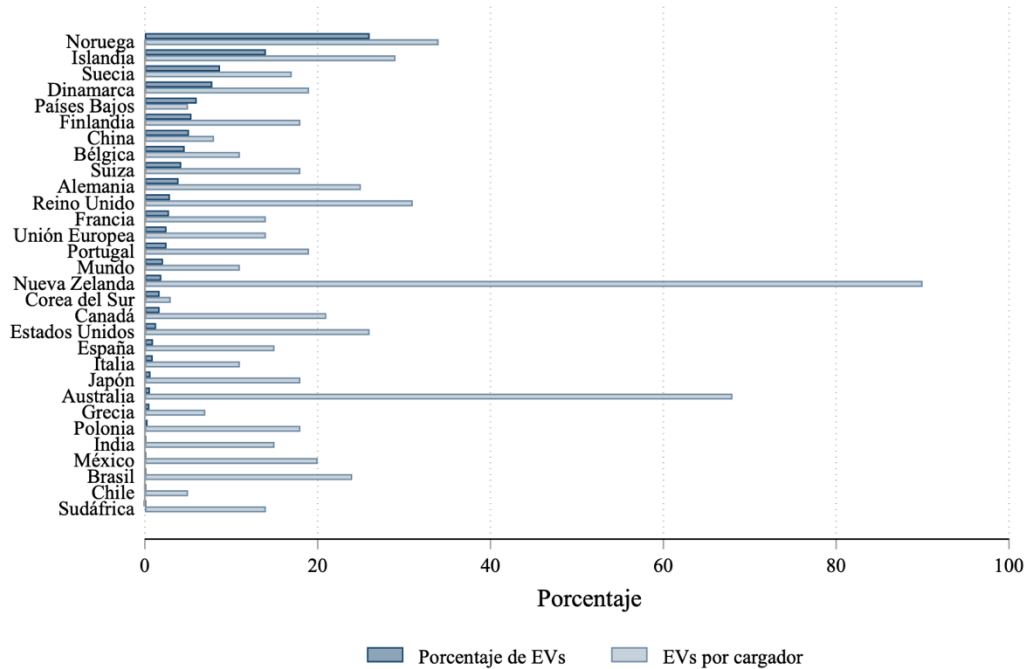
6.2 Apéndice B

En esta sección se analizan los resultados del modelo en el marco de países con alta penetración de vehículos eléctricos. Es decir, la transición hacia la electromovilidad en ALC se analiza en el contexto de la experiencia internacional, particularmente de aquellos países que han logrado avances significativos en esta materia. Los países nórdicos, especialmente Noruega, lideran la transformación del sector transporte hacia la movilidad eléctrica, ofreciendo lecciones valiosas para ALC. En particular, este Apéndice analiza la relación entre la infraestructura de carga y el número de vehículos eléctricos según las estimaciones del modelo de transporte privado.

La Figura B.1 presenta el nivel de penetración de vehículos eléctricos y la infraestructura de *cargadores públicos* de 28 países, además del promedio de la Unión Europea y el global. Esta Figura muestra que, en las primeras etapas de adopción de vehículos eléctricos, no existe una

relación claramente definida entre el número de vehículos eléctricos y el número de cargadores. De esta manera, el análisis se concentrará en los países donde la penetración es superior al 5% de la flota total, es decir, China (5,1%), Finlandia (5,4%), Países Bajos (6,0%), Dinamarca (7,8%), Suecia (8,7%), Islandia (14,0%) y Noruega (26,0%).

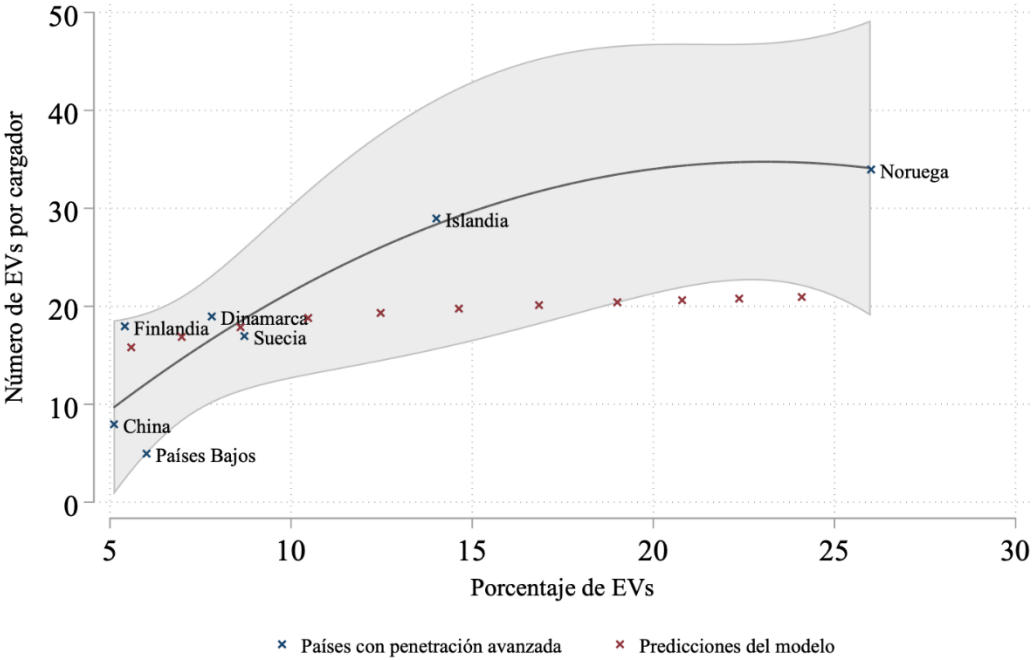
Figura B.1: Vehículos eléctricos y cargadores por país (2022)



Fuente: Elaboración propia usando datos de International Energy Agency. Global EV Outlook 2024

Una vez se consideran los países con un alto nivel de penetración, se evidencia la relación positiva entre número de vehículos eléctricos por cargador y el nivel de penetración de la electromovilidad (ver Figura A.2). En base a esta información, se ha construido una predicción usando *quadratic fit* (la línea es la predicción de este modelo). Por su parte, los puntos rojos denotan las predicciones del modelo propuesto previamente en el modelo de transporte privado. Estos datos deben ser analizados con cautela debido a la cantidad de observaciones. Teniendo en cuenta esta consideración, se evidencia que la metodología utilizada en el presente estudio refleja el desarrollo coordinado de infraestructura de carga y crecimiento de la flota de acuerdo con los países que cuentan con una mayor penetración de movilidad eléctrica a nivel mundial.

Figura B.2: Relación entre infraestructura de carga y penetración de vehículos eléctricos en países seleccionados (2022)

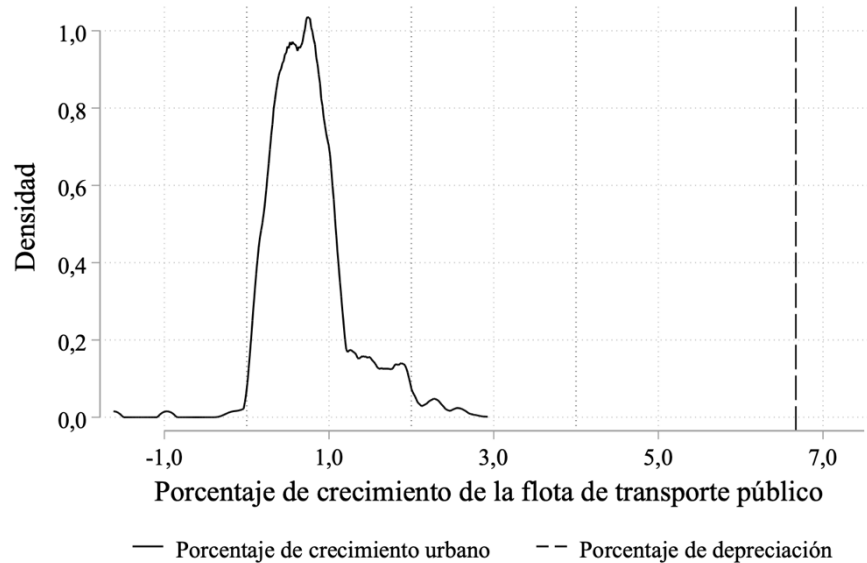


Fuente: Elaboración propia usando datos de International Energy Agency. Global EV Outlook 2024

6.3 Apéndice C

La Figura C.1 presenta la distribución del crecimiento urbano de los diferentes países en la región. Por su parte, la línea punteada representa el porcentaje de buses que se deben renovar debido a la depreciación. Como se puede apreciar, el principal motor para la sustitución de la flota es consecuencia de la depreciación.

Figura C.1: Componentes del crecimiento de flota de transporte público: sustitución por depreciación vs crecimiento urbano, 2025-2050¹⁴



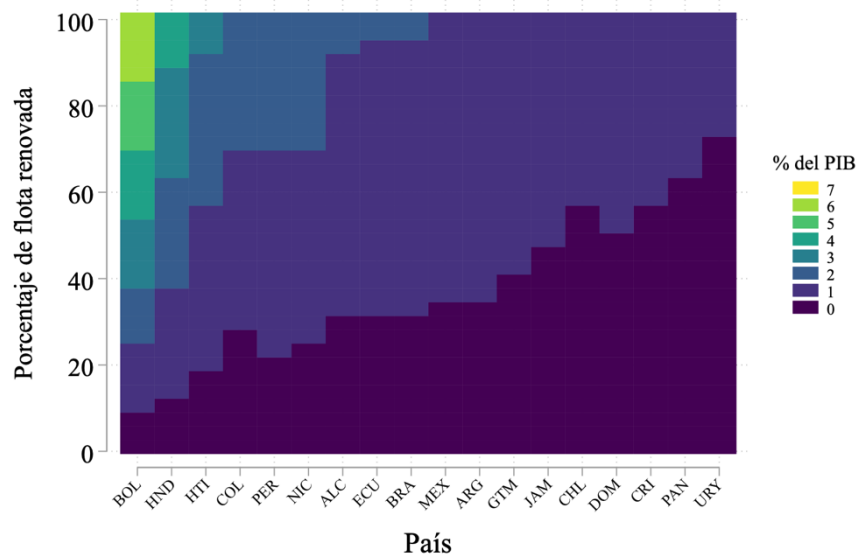
Fuente: Elaboración propia usando datos de WDI

¹⁴ Hay dos causantes de la sustitución de la flota de buses: depreciación y crecimiento urbano.

6.4 Apéndice D

La Figura D.1 representa el costo de sustitución de la flota total a una flota de buses eléctricos como porcentaje del PIB en el 2024. Es decir, sin considerar una transición paulatina a lo largo del tiempo.

Figura D.1: Inversión requerida para renovar la flota total de buses por flota eléctrica actual (2024)



Fuente: Cálculos propios usando datos del OMU y SimpleMaps

7 Referencias

Avenali, A., Catalano, G., Giagnorio, M., & Matteucci, G. (2023). Assessing cost-effectiveness of alternative bus technologies: Evidence from US transit agencies. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 117, 103648.

Banco Mundial y Deloitte. (2024). Estrategia Nacional para la Infraestructura de Carga para vehículos eléctricos Capítulo 1. Evaluación de la viabilidad técnica y económica del despliegue de infraestructuras de carga.

Beltrán, M., Lefevre, B., & Mojica, C. (2021). Lecciones aprendidas en la implementación de modelos de negocio para la masificación de buses eléctricos en latinoamérica y el caribe. Technical report. Inter-American Development Bank (IDB).

Beltrán, C., Rivas, M. E., y Calatayud, A. (2024). *Transporte y cambio climático en América Latina y el Caribe: brechas de conocimiento y prioridades de investigación*. Technical report. Inter-American Development Bank (IDB).

Calatayud, A., Rivas, M. E., Camacho, J., Beltrán, C., Ansaldo, M., & Café, E. (2023). *Transporte 2050: el camino hacia la descarbonización y la resiliencia climática en América Latina y el Caribe*. Inter-American Development Bank.

Cavallo, E. A., Powell, A., & Serebrisky, T. (2020). *From Structures to Services: The Path to Better Infrastructure in Latin America and the Caribbean*. Inter-American Development Bank.

Chen, Z., & Wang, H. (2023). Total cost of ownership analysis of fuel cell electric bus with different hydrogen supply alternatives. *Sustainability*, 16(1), 259.

Chen, Z., Yin, Y., & Song, Z. (2018). A cost-competitiveness analysis of charging infrastructure for electric bus operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 93, 351-366.

Cieplinski, A., Romero Marques, P., & Nassif Pires, L. (2025). *The transition to electric vehicles in Brazil's automotive industry and its effects on employment and income* (ID 397). International Council on Clean Transportation. <https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/06/ID-397-%E2%80%93-ENG-Brazil-jobs-report-final.pdf>

C40 Cities. (2023). Pipeline of electric bus projects in Latin America. C40 Knowledge Hub.

Dargay, J., Gately, D., & Sommer, M. (2007). Vehicle ownership and income growth, worldwide: 1960-2030.

Dorner Gallardo, O., & Rivas Zeballos, I. (2022). Análisis de costos de infraestructura de carga para Vehículos Eléctricos en Chile. Agencia de Sostenibilidad Energética.

Frost & Sullivan (2023). Latin American Electric Vehicle Charging Infrastructure Growth Opportunities

Frost & Sullivan. (2024). Análisis del Mercado de Buses Eléctricos en América Latina y el Caribe.

Giraldez, F., Sánchez González, S., & Calatayud, A. (2022). Hechos estilizados de la movilidad urbana en América Latina y el Caribe División de Transporte. Inter-American Development Bank.

Gandelman, N., Serebrisky, T., & Suárez-Alemán, A. (2019). Household spending on transport in Latin America and the Caribbean: A dimension of transport affordability in the region. *Journal of Transport Geography*, 79, 102482.

Iclodean, C., Cordos, N., & Todorut, A. (2019). Analysis of the electric bus autonomy depending on the atmospheric conditions. *Energies*, 12(23), 4535.

International Council on Clean Transportation (ICCT). The transition to electric vehicles in Brazil's automotive industry and its effects on jobs and income.

Johnson, C., Nanayakkara, S., Cappellucci, J., & Moniot, M. (2020). Foundations of an electric mobility strategy for the city of Mexicali. *National Renewable Energy Laboratory*.

Kohli, S., Khan, T., Yang, Z., & Miller, J. (2022). Zero-emission vehicle deployment: Latin America (ICCT Briefing). *International Council on Clean Transportation*.

Li, W., Stanula, P., Egede, P., Kara, S., & Herrmann, C. (2016). Determining the main factors influencing the energy consumption of electric vehicles in the usage phase. *Procedia CIRP* 48, 352-357.

Michelena, G., Iannuzzi, P., & Barafani, M. (2023). Hacia una integración sostenible: el potencial de la electromovilidad en América Latina y el Caribe.

Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones de Chile. (2025). 1er informe de electromovilidad. Dirección de Transporte Público Metropolitano (DTPM). <https://www.dtpm.gob.cl/>

Nicholas, M. (2019). Estimating electric vehicle charging infrastructure costs across major US metropolitan areas. International Council on Clean Transportation. Washington, DC, USA: ICCT.

Nicholas, M., & Lutsey, N. (2020). Quantifying the electric vehicle charging infrastructure gap in the United Kingdom. International Council on Clean Transportation. ICCT: London, UK.

Nicholas, M., Hall, D., & Lutsey, N. (2019). Quantifying the electric vehicle charging infrastructure gap across US markets. *International Council on Clean Transportation*, 20, 1-39.

Nie, Y. M., & Ghamami, M. (2013). A corridor-centric approach to planning electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part B* 57, 172-190.

Organización Latinoamericana de Energía. (2024). *Movilidad eléctrica en América Latina y el Caribe: Monitor regional*. OLADE.

Puma-Benavides, D. S., Cevallos-Carvajal, A. S., Masaquiza-Yanzapanta, A. G., Quinga-Morales, M. I., Moreno-Pallares, R. R., Usca-Gomez, H. G., & Murillo, F. A. (2024). Comparative analysis of energy consumption between electric vehicles and combustion engine vehicles in high-altitude urban traffic. *World Electric Vehicle Journal* 15(8), 355.

Rajon Bernard, M., Hall, D., & Lutsey, N. (2021). Charging infrastructure to support the electric mobility transition in France. International Council on Clean Transportation.

Roa, N., Calatayud, A., Montes, L., Rodríguez, P., Taddia, A., Pinto, A. M., Leaño, J. M., Uechi, L., Sánchez, S., & Alem, M. (2020). Transportation sector framework document. Inter-American Development Bank.

Romero, J.P. y Ramírez, P. (2020). Análisis de ciclo de vida de buses eléctricos del sistema de transporte público de Santiago RED. Swisscontact.

Sindipeças (2023). Relatório da Frota Circulante. Edição de 2023.

Slowik, P., & Lutsey, N. (2018). The continued transition to electric vehicles in United States cities. International Council on Clean Transportation.

The World Bank Group & PPIAF. (2006). Urban bus toolkit: Evaluate your bus system. Urban Bus Toolkit: Tools and options for reforming urban bus systems.

Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2024). *Latin America and the Caribbean hop into electric mobility*. United Nations Environment Programme.

Vellucci, F., & Pedde, G. (2018). Fast-charge life cycle test on a lithium-ion battery module. *World Electric Vehicle Journal* 9, 13.