

Cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero evitadas por autobuses eléctricos en Latinoamérica: metodología simplificada de análisis de ciclo de vida

Ana Beatriz Rebouças and André Cieplinski

INTRODUCCIÓN

La plataforma E-BUS RADAR rastrea el despliegue de autobuses eléctricos a batería (BEBs, del inglés *battery electric buses*) y trolebuses en los sistemas de transporte público de las ciudades latinoamericanas y sus reducciones en emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en comparación con los modelos convencionales (E-BUS RADAR, 2024). Creada y mantenida por integrantes de la alianza Zero Emission Bus Rapid-Deployment Accelerator (ZEBRA), con el apoyo del Instituto Clima e Sociedade (ICS), la plataforma E-BUS RADAR ha mapeado 5.068 autobuses eléctricos en las flotas de transporte público de 41 ciudades en doce países latinoamericanos.¹

Este trabajo presenta una metodología pensada para actualizar y ampliar la capacidad de la plataforma a fin de calcular las emisiones de GEI evitadas con la utilización de los BEBs. La metodología corresponde a un análisis de ciclo de vida (ACV) para estimar las emisiones de GEI de autobuses con motores eléctricos y motores de combustión interna equivalentes, considerando las emisiones de tubos de escape y las emisiones relacionadas con la fabricación de vehículos y baterías, el mantenimiento, la producción de combustible y la generación de energía eléctrica.

www.theicct.org

communications@theicct.org

[@theicct.org](https://twitter.com/theicct.org)

¹ A diciembre de 2023, los doce países mapeados por la plataforma E-BUS RADAR eran Argentina, Barbados, Brasil, Chile, Colombia, Ecuador, Guatemala, México, Paraguay, Perú, Uruguay y Venezuela.

Agradecimientos: El Instituto Clima e Sociedade (ICS) proporcionó generosamente los fondos para este trabajo.

En cuanto plataforma ágil y frecuentemente actualizada, E-BUS RADAR necesita una metodología robusta y flexible, que, a su vez, pide supuestos simplificadores. Así, asignamos los autobuses a cinco categorías: trolebuses de 12 a 15 m; trolebuses de más de 18 m; BEBs de 8 a 11 m; BEBs de 12 a 15 m; y BEBs de más de 18 m (este último representa los modelos articulados y biarticulados). Para cada categoría de autobús y ciudad, se estiman las emisiones de la fabricación de vehículos, del mantenimiento y de la batería con base en informaciones técnicas y operacionales, como la eficiencia energética media, la capacidad de la batería, el peso y el kilometraje anual recorrido por el vehículo. Se atribuyen valores a cada país por mezcla de biodiésel, las intensidades de carbono de los distintos insumos y la red eléctrica.

El objetivo de esta metodología actualizada es cerciorarse de que E-BUS RADAR pueda presentar informaciones actuales sobre el despliegue de BEBs en Latinoamérica con estimaciones fiables del potencial reductor de emisiones a lo largo de su ciclo de vida.

ALCANCE DEL ESTUDIO

Se calculan las emisiones de GEI evitadas con la electrificación de las flotas de autobuses como la diferencia entre las emisiones de los autobuses con motores de combustión interna reemplazados y las de los autobuses eléctricos desplegados. Entre las emisiones están dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), expresadas en gramos de equivalente CO₂ (CO₂e) y basadas en los posibles factores de calentamiento global en 100 años presentados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2021).

El análisis de ciclo de vida adoptado en este estudio considera las emisiones de GEI producidas durante la vida operacional de un autobús, lo que incluye las emisiones de fabricación y mantenimiento (ciclo vehicular) y de producción y uso de combustible y electricidad (ciclo energético).² La Tabla 1 presenta las emisiones de GEI consideradas en el alcance de este estudio.

Tabla 1
Alcance de las emisiones de GEI consideradas en este estudio

Ciclo de las emisiones	Alcance	Descripción
Emisiones de ciclo vehicular	Deslizador y sistema de propulsión	Producción de autobuses, incluso la extracción y el procesamiento de materias primas, la fabricación de componentes y el ensamblaje de autobuses
	Batería	Producción de baterías, incluso la extracción y el procesamiento de materias primas, la fabricación de componentes y el montaje de baterías
	Mantenimiento	Recambio de piezas y accesorios en uso, incluso llantas, aceite, refrigerante, entre otros.
Emisiones de ciclo energético	Combustibles fósiles	<ul style="list-style-type: none"> Extracción, transporte y procesamiento de petróleo Refinación y distribución de combustibles Combustión de combustible
	Biocombustibles	<ul style="list-style-type: none"> Cultivo, transporte y procesamiento de insumos Producción y distribución de combustibles Emisiones del cambio indirecto de uso del suelo de cultivo de insumos a biocombustibles a base de cultivos
	Electricidad	Generación de energía eléctrica, incluso la infraestructura de la central eléctrica, la transmisión, la distribución y las pérdidas de carga

Observación: un deslizador o *glider* es el armazón y el chasis del vehículo sin el sistema de propulsión.

² Este estudio sigue el mismo análisis de ciclo de vida adoptado por Bieker (2021) y O'Connell *et al.* (2023).

Para el ciclo vehicular, el cálculo contempla las emisiones relacionadas con la producción de baterías para autobuses eléctricos y las emisiones del resto del vehículo —el deslizador y el sistema de propulsión— para los autobuses tanto eléctricos como con motores de combustión interna. El ciclo también tiene en cuenta las emisiones generadas durante el mantenimiento de los autobuses.

El ciclo energético, o por el combustible utilizado por los autobuses con motores de combustión interna o por la energía eléctrica utilizada para cargar los autobuses eléctricos, incluye las emisiones del pozo al tanque (WTT, del inglés *well-to-tank*) de la producción de energía y las emisiones del tanque a la rueda (TTW, del inglés *tank-to-wheel*) del uso. Las emisiones del pozo al tanque incluyen las emisiones de la extracción de fuentes de energía y de la producción y distribución de combustible. Las emisiones del tanque a la rueda corresponden a las emisiones del vehículo durante la combustión del combustible. Las emisiones del ciclo energético completo se llaman emisiones del pozo a la rueda (WTW, del inglés *well-to-wheel*).

Con relación a los biocombustibles a base de cultivos, el ciclo energético también incluye las emisiones del cambio indirecto de uso del suelo (ILUC, del inglés *indirect land-use change*). El ILUC ocurre cuando un aumento de la demanda de insumos para más biocombustibles provoca la conversión del suelo, con la suplantación de las actividades existentes, como la producción agrícola. Las emisiones del cambio indirecto de uso llegan a su punto más alto cuando el aumento de la demanda de biocombustibles provoca la conversión de tierras con altas reservas de carbono que antes no se utilizaban en la agricultura.

Las emisiones relacionadas con la infraestructura de carga de autobuses eléctricos o la distribución de combustible y el reciclaje de autobuses no están incluidas en el alcance de este estudio. Se consideran que o son parecidas ante distintas tecnologías o tienen impacto bajo en las emisiones totales de ciclo de vida.

RECOLECCIÓN DE DATOS DE AUTOBUSES

Uno de los principales retos de la plataforma E-BUS RADAR es la recolección de datos fiables sobre la operación de autobuses en las ciudades latinoamericanas. Son necesarios datos operacionales e informaciones técnicas vehiculares para calcular las emisiones evitadas, conforme a lo detallado en la Tabla 2. Entre las informaciones técnicas necesarias están el modelo y el fabricante del autobús, el tamaño del autobús, la masa del vehículo y la capacidad de la batería. Las características operacionales del autobús incluyen el número de autobuses en funcionamiento por tamaño de autobús, vida útil de autobús, distancia anual recorrida y consumo de energía por kilómetro.

Tabla 2

Datos de autobuses necesarios para cada ciudad latinoamericana que utiliza autobuses eléctricos para estimar las emisiones evitadas

Categoría de datos	Variables	Fuente
Características del vehículo	<ul style="list-style-type: none"> Tamaño del autobús (m) y masa del vehículo (kg) Fabricante y modelo del autobús Capacidad (kWh) de la batería del autobús eléctrico 	<ul style="list-style-type: none"> Publicaciones oficiales de las ciudades Documentos técnicos proporcionados por los fabricantes de autobuses
Características operacionales	<ul style="list-style-type: none"> Vida útil (años), distancia anual recorrida (km), consumo de energía (L/km en autobuses con motores de combustión interna y kWh/km en autobuses eléctricos), presencia de aire acondicionado (sí o no) Tamaño de la flota: número de autobuses por tamaño de autobús 	<ul style="list-style-type: none"> Artículos en la prensa

La Tabla 2 también describe las fuentes de los datos utilizados para esas variables. Se utilizan informaciones oficiales cuando estén disponibles y se complementan los datos con las características técnicas de los autobuses facilitadas por los fabricantes. Sin embargo, no siempre hay informaciones oficiales referentes a los autobuses eléctricos utilizados en todas las ciudades latinoamericanas incluidas en la plataforma. Para aumentar la representatividad regional de la plataforma, se utilizan los datos operacionales encontrados en artículos en la prensa. Solamente se incluyen en el banco de datos los autobuses eléctricos en uso en los sistemas de transporte público y no se consideran aquéllos utilizados en flotas privadas o a efectos de prueba o demostración.

Hay datos técnicos y operacionales detallados referentes a los autobuses eléctricos de 11 ciudades: São Paulo (BRA), Curitiba (BRA), Ciudad de México (MEX), Guadalajara (MEX), Santiago (CHL), Las Condes (CHL), La Reina (CHL), Valparaíso (CHL), Bogotá (COL), Medellín (COL) y Cali (COL). Con relación a las demás ciudades, hay datos menos detallados; normalmente, las informaciones mínimas recopiladas son el número de autobuses eléctricos adquiridos, el tamaño del autobús y el fabricante; a veces también se obtiene el modelo. Son necesarias otras informaciones para el cálculo de las emisiones, como el peso del autobús, el consumo de energía y la distancia anual recorrida. En cuanto a las ciudades con datos incompletos, se complementan las informaciones faltantes con valores medios atinentes a autobuses de tamaño parecido en distintas ciudades del mismo país. De no haber informaciones específicas referentes a determinado país, se adopta el promedio de la región.

CARACTERÍSTICAS VEHICULARES Y OPERACIONALES

La Tabla 3 resume las características vehiculares medias adoptadas para cada categoría de autobús. Se recopilaron datos referentes a las características vehiculares y operacionales de los autobuses eléctricos en 11 ciudades diferentes de Brasil, Chile, Colombia y México en el 2023, que han sido reunidos en el apéndice, en la Tabla A1. Se agregan datos propios de cada ciudad por país y tamaño de autobús; se utilizan promedios para complementar las informaciones faltantes de otras ciudades, conforme a lo descrito en la sección anterior. La Tabla 3 detalla los valores medios de capacidad de batería y peso de autobús por categoría de autobús, teniendo en cuenta los datos recopilados. Se adoptaron las informaciones de aforo y la masa media de pasajero de 65,306 kg del caso de São Paulo (Municipalidad de São Paulo, 2018b).

Tabla 3**Especificaciones vehiculares medias**

Tipo	Tamaño (m)	Aforo	Capacidad de batería (kWh)	Masa de deslizador y sistema de propulsión (kg)	
				Eléctrico	Combustión interna
BEB	8-11	61	248	8.987	6.016
BEB	12-15	87	335	14.880	11.429
BEB	Más de 18	129	533	24.133	18.800
Trolebús	Más de 18	129	152	20.000	18.800
Trolebús	12-15	87	30	10.318	10.318

Se resumen los datos sobre las características operacionales de los autobuses en la Tabla 4, que presenta los promedios latinoamericanos. Lista los valores medios de los periodos de funcionamiento de BEBs (años), las distancias anuales recorridas (km/año), el consumo de energía de BEBs (kWh/km y MJ/km) y el consumo de energía equivalente en diésel (MJ/km) para los cinco tipos y tamaños de autobús considerados en este análisis. Los valores de cada país específico utilizados para obtener estos promedios figuran en la Tabla A1 en el apéndice. Pese a que se observen variaciones, en la mayoría de los casos, están limitados a los cuatro países cuyos datos han sido recolectados. En cuanto a las distancias anuales recorridas en todos los países por autobuses de todos los tipos y tamaños, la variación máxima es de cerca del 33%, de 60.000 a 80.000 km/año, con un promedio de 67.029 km y una desviación estándar de 7.464 km. El consumo de energía varía entre 1,24 y 1,5 kWh/km entre BEBs de 12 m a 15 m y entre 0,77 y 0,98 kWh/km en BEBs más pequeños, de 8 m a 11 m. Se observaron variaciones más significativas entre modelos diferentes. Por ejemplo, los trolebuses con baterías grandes de iones de litio utilizados en México consumen menos energía, más o menos un 44%, que modelos más antiguos en Brasil, Colombia y Chile.

Tabla 4**Características operacionales medias de vehículos estándares**

Tipo	Tamaño	Tiempo de uso (años)	Distancias anuales (km/año)	Consumo de energía [kWh/km (MJ/km)]	Consumo de energía equivalente en diésel (MJ/km)
BEB	8-11	15	62.554	0,92 (3,31)	12,4
BEB	12-15	15	67.296	1,36 (4,90)	18,5
BEB	Más de 18	15	71.384	1,76 (6,34)	25,8
Trolebús ^a	Más de 18	15	80.000	1,74 (6,26)	27,4
Trolebús	12-15	15	66.384	3,28 (11,81)	19,5

^a Sólo se recopilaron datos de trolebuses de más de 18 m de Ciudad de México. Esos modelos más nuevos poseen baterías grandes y, así, tienen una eficiencia energética mejor que la de los trolebuses medios más antiguos de 12 m a 15 m identificados en los demás países de la región.

EMISIONES DE FABRICACIÓN, MANTENIMIENTO Y RECICLAJE DE VEHÍCULOS Y BATERÍAS

Se utilizan los valores del peso del autobús y de la capacidad de la batería para el cálculo de las emisiones producidas por la fabricación y el reciclaje de vehículos y baterías. Las emisiones de mantenimiento son una función de la cantidad de kilómetros recorridos por año y de los años en uso. Con relación a deslizadores y sistemas de propulsión eléctricos a batería y de combustión interna, se aplicó un factor fijo de emisión de 6,6 kg CO₂e/kg (O'Connell *et al.*, 2023). Suponemos que todos los vehículos cuentan con baterías de litio-ferrofosfato (LFP)-grafito con emisiones equivalentes a 58 kg CO₂e/kWh (Bieker, 2021) y una densidad de batería de 0,14 kWh/kg (Basma et

al., 2021). La metodología supone una duración fija de proyecto de 15 años para BEBs con recambio de batería tras siete u ocho años de funcionamiento. Así, el cálculo tiene en cuenta las emisiones equivalentes a la fabricación de un BEB y dos baterías. Para mantener el mismo periodo de análisis en autobuses con motor de combustión interna, que normalmente funcionan durante 10 años, la herramienta considera las emisiones equivalentes a la fabricación de 1,5 autobuses con motor de combustión interna.

Las emisiones de mantenimiento se fundan en los factores de emisión de mantenimiento de autobuses urbanos de 12 m de Hill et al. (2020), que son de 52,4 gCO₂e por kilómetro recorrido por el vehículo (vkm, del inglés *vehicle-kilometer*) en autobuses con motor diésel y de 67,5 gCO₂e/vkm en autobuses eléctricos.

EMISIONES DE COMBUSTIBLE Y ELECTRICIDAD

Las emisiones del ciclo de combustible y electricidad incluyen los gases de efecto invernadero generados por la producción y el consumo de energía utilizada por el vehículo, ya sea combustible fósil, biocombustible o electricidad. Entre las emisiones del ciclo energético también están las emisiones del pozo al tanque, que corresponden a las emisiones generadas durante la producción de combustible y electricidad, y las emisiones del tanque a la rueda, que son las emisiones de tubo de escape generadas durante la combustión del combustible.

La Tabla 5 contiene los datos de la intensidad de GEI adoptados para los principales combustibles utilizados por los autobuses con motor de combustión interna en Latinoamérica. Se utilizan los datos de emisiones de CO₂e del modelo GREET (ANL, 2022), considerando los valores referentes a un posible horizonte de calentamiento global de 100 años. Con relación a biocombustibles, se consideran las emisiones de GEI no biogénicas en las emisiones del tanque a la rueda.

Tabla 5
Emisiones del pozo al tanque, del tanque a la rueda y del pozo a la rueda en gCO₂e/MJ con base en el modelo GREET

Insumo	Del pozo al tanque	Del tanque a la rueda	Del pozo a la rueda
Biodiésel de soja	17,31	4,63	21,94
Biodiésel de palma	29,87	4,63	34,50
Biodiésel de grasa	15,51	4,63	20,14
Biodiésel de aceite de cocina usado	14,89	0,71	15,60
Diésel fósil	15,75	75,66	91,41

El modelo GREET usa la intensidad de carbono de la red eléctrica como dato para la definición de las emisiones del pozo al tanque. Esos valores están basados en la red eléctrica de Estados Unidos, que tienen una intensidad de carbono de 466,5 gCO₂e/kWh. La red eléctrica de Estados Unidos posee un factor de intensidad de carbono parecido al de Chile (416,9 gCO₂e/kWh). Se realizó un análisis de sensibilidad y se calcularon las emisiones del pozo al tanque de GREET, suponiéndose una red completamente descarbonizada. Las diferencias entre las emisiones del pozo al tanque de los biocombustibles considerados en este estudio varían entre 2 y 4 gCO₂e/MJ, dependiendo del insumo. Esta diferencia no representaría un cambio significativo en los resultados y se utilizan los mismos factores de emisiones del pozo al tanque de todos los países.

El porcentaje de mezcla de biodiésel por país proviene del modelo Roadmap de ICCT (ICCT, 2022). De los 12

países latinoamericanos con autobuses eléctricos en sus flotas, cuatro cuentan con una mezcla obligatoria de biodiésel en diésel, como se muestra en la Tabla 6.³ Se obtienen los porcentajes de insumos de biodiésel de los informes anuales sobre biocombustibles del 2022 del Departamento de Agricultura de Estados Unidos para Brasil, Argentina, Perú y Colombia (USDA, 2022a, 2022b, 2022c, 2022d). Se calculan los porcentajes de insumos con los datos del 2021

Tabla 6

Mezclas de biodiésel en diésel, porcentajes de insumos y porcentaje de biodiésel importado por país

	Porcentaje de biodiésel	Insumo				Porcentaje de importación	Origen de las importaciones
		Aceite de soja	Grasa animal (sebo)	Aceite de cocina usado	Aceite de palma		
Brasil	12%	82,2%	12,8%	2,1%	2,9%	0,0%	-
Argentina	9,60%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	-
Perú	3,84%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	51,0%	España (41%), Indonesia (30%), Malasia (21%), Países Bajos (8%)
Colombia	0,40%	0,0%	0,0%	5,2%	94,8%	0,0%	

Además, agregamos las emisiones del ILUC referentes a biocombustibles a base de cultivos. Se calculan esas emisiones con modelos económicos que miden el cambio neto de uso del suelo globalmente y se emparejan a un factor de emisiones para la estimación de los impactos relacionados de las emisiones de GEI. Las emisiones del ILUC corresponden a cada sitio específico, ya que dependen de las características económicas y los patrones comerciales de la región. La Tabla 6 muestra que el biodiésel en los cuatro países considerados es de producción mayoritariamente nacional, salvo en Perú, donde el 51% es importado.

Con relación al biodiésel producido con el aceite de soja en Brasil y Argentina, adoptamos los factores de ILUC de los combustibles derivados de la soja en Brasil que han sido desarrollados en el marco del Plan de Compensación y Reducción de Carbono para la Aviación Internacional (CORSIA) (Organización de Aviación Civil Internacional, 2020). Pese a que CORSIA sea un programa de contabilidad de carbono para la aviación internacional, se consideran los factores de ILUC atinentes al análisis porque corresponden a la cadena de suministro de los insumos de biocombustibles. En este contexto, casi no hay diferencia entre las cadenas de suministro de soja utilizadas para producir el biodiésel o el combustible de aviación sostenible. Con relación al porcentaje de biodiésel de palma que el Perú importa de Indonesia y Malasia, también se adoptaron los valores de ILUC de CORSIA. CORSIA no incluye los factores de ILUC referentes a la palma cultivada en Brasil, Perú y Colombia y, según nuestro leal saber y entender, no se ha realizado un modelado parecido con esos insumos. Debido a esta limitación, se pusieron a cero las emisiones del ILUC, lo que puede considerarse un enfoque conservador, ya que subestima las emisiones evitadas logradas con la introducción de BEBs y trolebuses.

La Tabla 7 muestra las intensidades de carbono del ILUC consideradas en este análisis. Los dos modelos económicos aplicados para el cálculo de las emisiones del cambio indirecto de uso del suelo en CORSIA son GTAP-BIO y GLOBIOM. En nuestro estudio, se aplicaron ambos valores para el cálculo de un rango de variación en las emisiones.

³ Además de estos cuatro países, Uruguay también cuenta con un decreto referente a la mezcla de biodiésel, que era del 5% en el 2021. Sin embargo, Uruguay fue excluido de esta lista, ya que el decreto fue revocado en noviembre del 2021 con la publicación de la Ley 19996 <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/programas/agrocombustibles>.

Tabla 7**Valores de emisiones del cambio indirecto de uso del suelo de CORSIA referentes a combustibles derivados de la palma en Brasil, Malasia e Indonesia**

Region	Insumo	gCO ₂ e/MJ	
		GTAP-BIO	GLOBIOM
Brasil	Aceite de soja	22,5	117,9
Malasia e Indonesia	Aceite de palma (laguna abierta/cubierta)	34,6	60,2

Fuente: Organización Internacional de Aviación Civil (2020).

Las emisiones del tanque a la rueda son cero en trolebuses y BEBs, ya que no generan emisiones por el tubo de escape, pero sus emisiones del pozo al tanque dependen de las fuentes de energía utilizadas para generar energía eléctrica. Se utilizan los valores de intensidad de GEI en el 2021 atinentes a la generación de energía eléctrica de Ember Climate (2021), obtenidos de la plataforma Our World in Data.⁴

La Tabla 8 presenta la intensidad de carbono de la generación de energía eléctrica en el 2021 correspondiente a los países actualmente mapeados en E-BUS RADAR. Se trata de datos estáticos, que ignoran la futura implementación de fuentes de energía renovables, las cuales pueden reducir la intensidad de carbono de las emisiones del pozo al tanque de los autobuses eléctricos durante su vida útil. Así, se multiplican las intensidades de carbono en el 2021 por las reducciones porcentuales en el Escenario de Políticas Declaradas de la Agencia Internacional de la Energía (Agencia Internacional de la Energía, 2022). Se ofrecen proyecciones individuales de intensidad de carbono referentes a Brasil y México y hay una sola proyección de crecimiento para los demás países latinoamericanos. La Figura 1 presenta las proyecciones de variación de la intensidad de carbono adoptadas en Brasil, México y otros países en este análisis y contiene un ejemplo de las intensidades de carbono previstas en Brasil, México, Chile y Colombia.

Tabla 8**Intensidad de carbono de la energía eléctrica por país en el 2021**

País	Intensidad de carbono de la energía eléctrica (gCO ₂ /kWh)
Argentina	357,8
Barbados	644,9
Brasil	158,6
Chile	416,9
Colombia	181,7
Ecuador	136,1
Guatemala	313,0
México	399,9
Paraguay	25,5
Perú	228,6
Uruguay	147,3
Venezuela	189,4

Fuente: Ember Climate (2021).

⁴ Intensidad de carbono de la energía eléctrica según la plataforma Our World in Data, disponible en <https://ourworldindata.org/grapher/carbon-intensity-electricity>.

Figura 1

Proyecciones de intensidad de carbono de la red eléctrica como porcentaje (arriba) y en gCO₂e/kWh (abajo) en ciertos países



CONSEJO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPIO THEICTT.ORG

CÁLCULO DE LAS EMISIONES DE GEI EVITADAS

Esta sección describe cómo los datos presentados arriba sirven para calcular las emisiones de ciclo de vida evitadas con la utilización de BEBs. Las siguientes ecuaciones detallan los cálculos de las emisiones evitadas por un BEB.

El subíndice k indica el tamaño y el tipo del BEB y su autobús con motor de combustión interna correspondiente, listado en la Tabla 3. Se especifican los países y las ciudades con los subíndices i y j , respectivamente. En autobuses con motor diésel, el análisis considera los impactos ambientales del biodiésel producido con distintos cultivos (c). Considerando el nivel de incertidumbre y variación para el cálculo de la intensidad de carbono de las emisiones del ILUC, se presentan los valores de emisiones más bajos y más altos de los dos modelos diferentes considerados, GTAP y GLOBIOM (Organización Internacional de Aviación Civil, 2019). Se indican estas dos opciones referentes a las emisiones del ILUC con el subíndice l .

AUTOBUSES CON MOTOR DE COMBUSTIÓN INTERNA

Se utiliza la Ecuación 1 para calcular las emisiones de ciclo de vida de los autobuses con motor de combustión interna, divididas entre fabricación de vehículos y mantenimiento, producción de combustible y consumo de combustible o emisiones de tubo de escape. Se calcula la masa del deslizador y del sistema de propulsión ($Mass$) como el peso bruto del vehículo (GVW) neto de su aforo (CAP) (datos disponibles en la Tabla 3), multiplicado por la masa media de los pasajeros, $\kappa = 65.306 \text{ kg}$ (Municipalidad de São Paulo, 2018b) (Ecuación 2). Las emisiones del ciclo vehicular ($E_{vehicle}^{ICE}$) consideran las emisiones de la fabricación de vehículos y las emisiones de mantenimiento a lo largo de su vida útil. Se multiplica la masa del vehículo por el parámetro fijo de las emisiones de fabricación de $6,6 \text{ kg CO}_2\text{e/kg}$ (O'Connell et al., 2023) (α) y por 1,5, ya que se esperan 15 años de operación y se supone que, normalmente, se utilizan los autobuses con motor de combustión interna durante 10 años. Se estiman las emisiones de mantenimiento mediante la multiplicación de su factor de emisiones de $52,4 \text{ gCO}_2\text{e/km}$ (Hill et al., 2020) (τ^{ICE}) por los años de operación y el kilometraje recorrido por año.

$$E_{vehicle}^{ICE}_{ijk} = \underbrace{\alpha \cdot 1.5 \cdot Mass_k^{ICE}}_{\text{Fabricación de vehículo}} + \underbrace{\tau^{ICE} \cdot Y \cdot VKT_{ij}}_{\text{Mantenimiento de vehículo}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$Mass_k^{ICE} = GVW_k^{ICE} - k \cdot Cap_k \quad (\text{Ecuación 2})$$

Las emisiones del pozo al tanque en la producción de combustible dependen de si se incluyen los factores de cambio indirecto de uso del suelo (Ecuación 3) y de la intensidad de carbono (ψ) de la producción de combustible (Ecuación 4). Los factores de ILUC considerados en este estudio son presentados en la Tabla 7. La intensidad de carbono de la producción de combustible (ψ) es una función del porcentaje del biodiésel mezclado en diésel (p_{bd}), el porcentaje de cada biomasa (p_{crop}) utilizada para producir el biodiésel y las intensidades de carbono de la producción de diésel fósil (ψ^{diesel}) y biodiésel ($\psi^{biodiesel}$) que evalúan las emisiones relacionadas con la extracción, transporte, distribución y procesamiento industrial de insumos. Se detallan las informaciones de mezcla de biodiésel en cada país, incluso el porcentaje de biodiésel y el porcentaje de insumos, en la Tabla 6. Las intensidades de carbono de la producción de combustible están recogidas en la Tabla 5.

La Ecuación 5 calcula las emisiones de producción de combustible (E_{fuel}^{WTT}) mediante la multiplicación de la intensidad de carbono de su producción (ψ) por la demanda total de combustible, que es una función del kilometraje recorrido por

el vehículo durante el año (VKT), de los años de operación (Y) y del consumo de energía del vehículo (ε^{ICE} , en MJ/km). Los datos operacionales medios (el kilometraje recorrido por el vehículo durante el año, los años de operación y el consumo de energía del vehículo) están consignados en la Tabla 4 y se detallan los valores de cada país específico en la Tabla A1, en el apéndice.

$$ILUC_{cl} = \begin{cases} \min (ILUC_C^{GTAP}, ILUC_C^{GLOBIOM}) \\ \max (ILUC_C^{GTAP}, ILUC_C^{GLOBIOM}) \end{cases} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\psi_{ij} = \left(p_{bd_i} \sum_c p_{crop_{cit}} \cdot (\psi_c^{biodiesel} + ILUC_{cl}) \right) + (1 - p_{bd_i}) \cdot \psi^{diesel} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$E_{fuel_WTT}^{ICE}_{ijkl} = \psi_{ij} \cdot \varepsilon_{jk}^{ICE} \cdot Y_t \cdot VKT_{ij} \quad (\text{Ecuación 5})$$

La etapa final consiste en calcular las emisiones de tubo de escape, también conocidas como emisiones del tanque a la rueda (TTW). Su intensidad de carbono (Ecuación 6) también depende de las mezclas de biodiésel (p_{bd}), su biomasa de composición (p_{crop}) y la intensidad de carbono de las emisiones de tubo de escape de diésel fósil ($\omega^{biodiesel}$) y biodiésel (ω^{diesel}). La multiplicación de la intensidad de carbono (ω) por la eficiencia energética del vehículo (ε^{ICE}), los años de operación (Y) y el kilometraje recorrido durante el año (VKT) tiene como resultado las emisiones totales por combustión o del tanque a la rueda (E_{fuel_TTW}) (Ecuación 7). Se exhiben las informaciones sobre la mezcla de biodiésel en la Tabla 6 y la intensidad de carbono de las emisiones de tubo de escape figuran en la Tabla 5. Se detallan los datos operacionales en la Tabla 4 y en la Tabla A1, en el apéndice.

$$\omega_{it} = \left(p_{bd_{it}} \sum_c p_{crop_{cit}} \cdot \omega_c^{biodiesel} \right) + (1 - p_{bd_{it}}) \cdot \omega^{diesel} \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$E_{fuel_TTW}^{ICE}_{ijk} = \omega_{it} \cdot \varepsilon_{jk}^{ICE} \cdot Y \cdot VKT_{ij} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Las emisiones totales de un autobús típico con motor de combustión interna a lo largo de su vida útil (Ecuación 8) son la suma de los tres componentes explicados arriba.

$$E_{ijkl}^{ICE} = E_{vehicle_k}^{ICE} + E_{fuel_TTW}_{ijk}^{ICE} + E_{fuel_WTT}_{ijkl}^{ICE} \quad (\text{Ecuación 8})$$

AUTOBUSES ELÉCTRICOS

Con relación a BEBs y trolebuses, se adicionan las emisiones del ciclo vehicular, incluso las asociadas a la producción de deslizadores y sistemas de propulsión, la fabricación de baterías y el mantenimiento, a las producidas en la generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

Con relación a las emisiones del ciclo vehicular ($E_{vehicle}^{BEB}$), primero se resta la masa del aforo máximo y la batería del peso bruto del vehículo para obtener la masa del deslizador y del sistema de propulsión (Ecuación 9). Una vez más, se calcula la masa del aforo máximo mediante la multiplicación del aforo del autobús (CAP) (detallado en la Tabla 3) y de la masa media de los pasajeros (κ) de 65,306 kg (Municipalidad de São Paulo, 2018b). La masa de la batería es el producto de la capacidad de la batería ($Batt$, en kWh) y del inverso de la densidad de la batería (δ , en kWh/kg). La capacidad de la batería y la masa del vehículo y del sistema de propulsión por tipo de autobús están recogidas en la Tabla 3. Además, la densidad de batería adoptada es de 0,14 kWh/kg (Basma et al., 2021). Se calculan las emisiones de fabricación y mantenimiento de un BEB típico ($E_{vehicle}^{BEB}$) (Ecuación 10) como la suma de las emisiones de producción del vehículo, de la batería y de mantenimiento, considerando los 15 años de la duración

del proyecto. Se calculan las emisiones de producción del vehículo mediante la multiplicación de la masa del deslizador y del sistema de propulsión ($Mass^{BEB}$) y el mismo parámetro fijo de 6,6 kg CO₂e/kg (O'Connell et al., 2023) considerado para autobuses con motor de combustión interna (α), multiplicando el kilometraje recorrido durante toda la vida útil (VKT) (presentado en la Tabla 4 y la Tabla A1, en el apéndice) por la intensidad de carbono del mantenimiento del BEB específico de 67,5 gCO₂e/vkm (τ^{BEB}) (Hill et al., 2020) y las emisiones equivalentes a dos baterías, teniendo en cuenta un recambio de batería durante la operación. Las emisiones de la batería son el producto de la capacidad de la batería ($Batt$, en kWh) y de la intensidad de carbono de la batería de 58 kg CO₂e/kWh (η) (Bieker, 2021).

$$Mass_k^{BEB} = GVW_k^{BEB} - \frac{1}{\delta} \cdot Batt_k^{BEB} - \kappa \cdot Cap_k \quad (\text{Ecuación 9})$$

$$E_vehicle_{ijk}^{BEB} = \underbrace{\alpha \cdot Mass_k^{BEB}}_{\text{Fabricación de vehículo}} + \underbrace{\eta \cdot 2 \cdot Batt_k^{BEB}}_{\text{Batería}} + \underbrace{\tau^{BEB} \cdot Y \cdot VKT_{ij}}_{\text{Mantenimiento de vehículo}} \quad (\text{Ecuación 10})$$

Las emisiones del pozo al tanque de BEBs y trolebuses (E_energy_WTT) (Ecuación 11) son una función de la intensidad de las emisiones de la red eléctrica en el 2021 (ρ), la reducción prevista de la intensidad de carbono en cada año (Φ_{it}), los años de operación (Y), el consumo de energía (ϵ^{BEB}), que incluye las pérdidas por carga, y el kilometraje recorrido durante la vida útil del vehículo (VGT). Se detallan las emisiones de la red eléctrica y las proyecciones en la Tabla 8 y la Figura 1. El consumo de energía y el kilometraje recorrido durante la vida útil del vehículo están consignados en la Tabla 4 y la Tabla A1, en el apéndice.

$$E_energy_WTT_{ijk}^{BEB} = \sum_{t=t_0}^{t_0+Y} P_i \cdot \Phi_{it} \cdot \epsilon_{jk}^{BEB} \cdot VKT_{ij} \quad (\text{Ecuación 11})$$

Las emisiones totales de un BEB típico durante su vida útil están recogidas en la Ecuación 12.

$$E_{ijk}^{BEB} = E_vehicle_{ijk}^{BEB} + E_energy_WTT_{ijk}^{BEB} \quad (\text{Ecuación 12})$$

EMISIONES EVITADAS

Se calculan las emisiones evitadas por un BEB o trolebús típico durante sus vidas útiles como la diferencia entre las emisiones de autobuses con motor de combustión interna y BEBs en autobuses parecidos (k) en el mismo país (i) y la misma ciudad (j) (Ecuación 13).

$$\Delta E_{ijk} = E_{ijkl}^{ICE} - E_{ijk}^{BEB} \quad (\text{Ecuación 13})$$

Se multiplican las emisiones evitadas por el número de autobuses eléctricos utilizados y se suman los resultados por tipo o tamaño de autobús y ciudad referente a las emisiones evitadas en el país (Ecuación 14).

$$\Delta E_i^{Country} = \sum_j \sum_k N_{ijk} \cdot \Delta E_{ijk} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Por fin, al sumar todas las emisiones evitadas por tipo y tamaño de autobús, ciudad y país, se pueden calcular las emisiones evitadas por año. Las emisiones de fabricación equivalentes a un vehículo son asignadas al primer año de operación de BEBs y autobuses con motor de combustión interna, mientras que se incluyen las emisiones de fabricación de medio vehículo en el décimo año de los autobuses con motor de combustión interna. Se asignan las emisiones de batería, propias de los autobuses eléctricos, por las dos baterías, al primero y octavo años, la mitad de la vida útil prevista del autobús eléctrico. Las emisiones del pozo al tanque de los autobuses

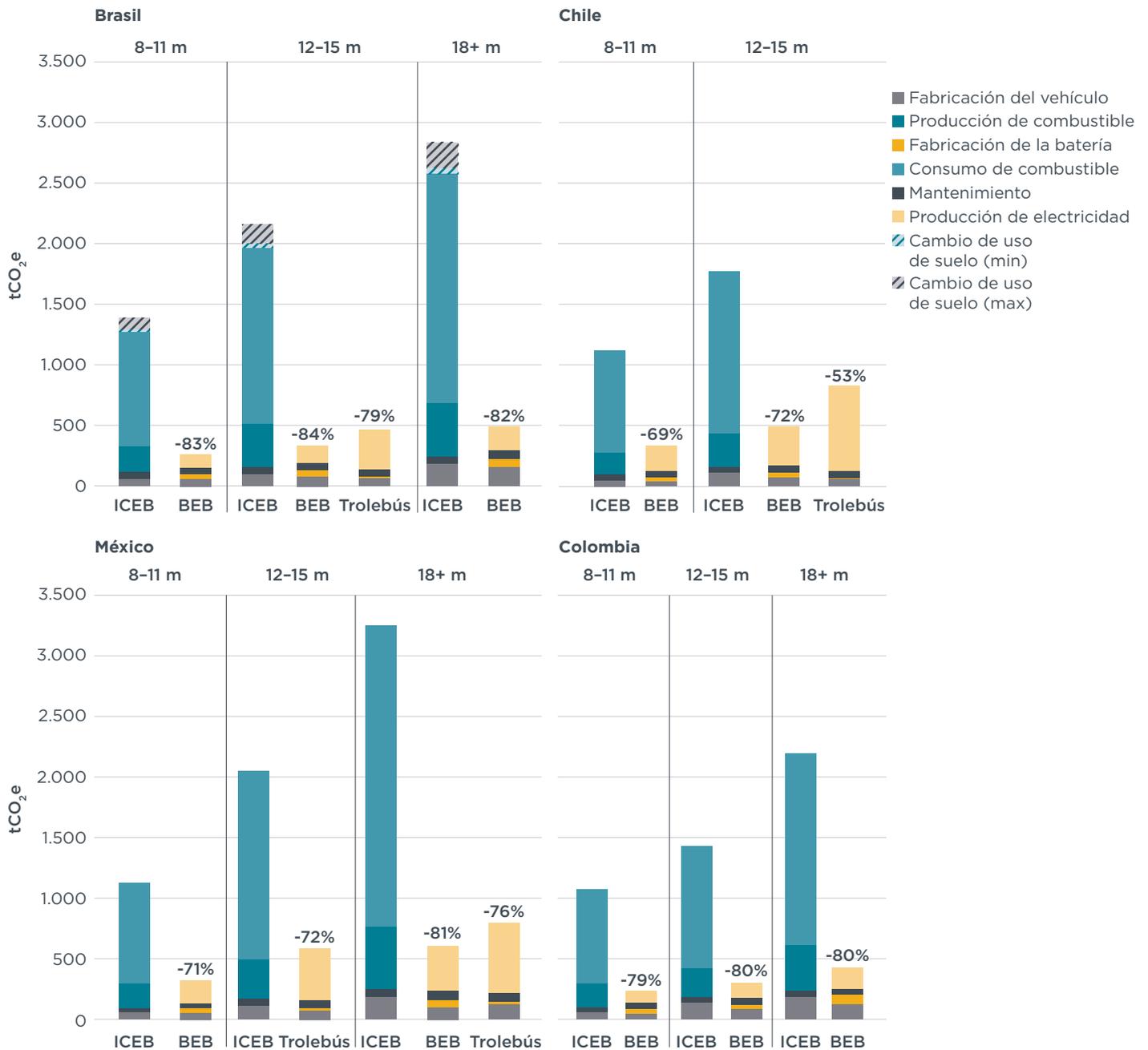
eléctricos varían con el tiempo, de conformidad con las proyecciones de intensidad de carbono de la red eléctrica consignadas en la Figura 1. Se distribuyen las emisiones de todas las demás fuentes —del pozo al tanque para autobuses con motor de combustión interna, del tanque a la rueda, mantenimiento y cambio indirecto de uso del suelo— de manera uniforme durante todos los años de operación, ya que también se supone que la intensidad de la energía y el kilometraje recorrido por el vehículo se mantienen uniformes a lo largo del tiempo.

RESULTADOS

Esta sección presenta un ejemplo de los resultados que se pueden obtener con la metodología desarrollada arriba. La Figura 2 recoge las emisiones de GEI de autobuses eléctricos y con motor de combustión interna durante su vida útil en los cuatro países latinoamericanos que poseen las flotas más grandes de autobuses eléctricos de la región: Brasil, Chile, México y Colombia. Las emisiones registradas corresponden a la vida útil de autobuses unitarios de distintos tamaños: de 8 m a 11 m; de 12 m a 15 m; y de más de 18 m. Los modelos exhibidos en cada país son aquellos a cuyas informaciones detalladas tuvimos acceso, conforme a lo presentado en la Tabla 3 y la Tabla A1. La muestra no representa necesariamente todos los modelos de autobuses eléctricos en uso en esos países. El gráfico también muestra la composición de emisiones totales de GEI por fuente: fabricación deslizador y del sistema de propulsión; fabricación de la batería; mantenimiento; producción de combustible; consumo de combustible; generación de energía eléctrica; y cambio indirecto de uso del suelo mínimo y máximo. Los números encima de las barras referentes a las emisiones de los autobuses eléctricos muestran la reducción porcentual de las emisiones de GEI con relación a autobuses con motor de combustión interna comparables.

Figure 2

Comparación de emisiones de GEI de autobuses con motor de combustión interna, autobuses eléctricos a batería y trolebuses durante sus vidas útiles en Brasil, Chile, México y Colombia



Nota: ICEB = autobus con motor de combustión interna; BEB = autobus eléctrico a batería

CONSEJO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPIO THEICT.ORG

Los resultados muestran que las emisiones de GEI de los autobuses eléctricos a batería durante su vida útil son de un 71% a un 84% más bajas que las emisiones de los autobuses con motor de combustión interna. Pese a que existan variaciones entre los países, la eficiencia energética más alta de los motores eléctricos permite una reducción notable de las emisiones de GEI en países con redes eléctricas con bajas intensidades de carbono, como Brasil y Colombia, y en aquéllos en que relativamente más combustibles fósiles están presentes en la generación de energía eléctrica, como México y Chile. Las diferencias en las emisiones entre los países con relación a modelos

de autobuses parecidos son una función de las características operacionales, como las distancias recorridas por año y la eficiencia energética.

Con relación al tamaño de autobús más común, el de 12 m a 15 m, durante sus vidas útiles, los BEBs generan emisiones un 72% a un 84% más bajas que los autobuses con motor de combustión interna. Se calcula que las emisiones totales de los BEBs durante sus vidas útiles a lo largo de un periodo de 15 años ascienden a 305 tCO₂e en Brasil, 558 tCO₂e en Chile y 323 tCO₂e en Colombia. Se calcula que las emisiones de autobuses con motor de combustión interna de tamaño parecido en los mismos países son de 1.970, 1.964 y 1.587 tCO₂e, respectivamente. El análisis también muestra que las emisiones de los BEBs articulados de más de 18 m son entre un 80% y un 82% más bajas durante sus vidas útiles que las de autobuses con motor de combustión interna comparables. Actualmente disponibles en Brasil, Colombia y México, sus emisiones totales de GEI estimadas durante sus vidas útiles son de 451 tCO₂e, 486 tCO₂e y 505 tCO₂e, respectivamente.

El análisis también demuestra que los sistemas de aire acondicionado causan un impacto significativo en el consumo de energía y, por lo tanto, las emisiones. Los BEBs articulados de más de 18 m que circulan en la Ciudad de México no tienen aire acondicionado, lo que tiene como resultado un consumo de energía medio de 1,10 kWh (Miaja et al., 2022), mientras que los BEBs de tamaño parecido en Brasil y Colombia consumen 2,0 kWh/km y 1,90 kWh/km, respectivamente. Sin embargo, el consumo de energía más bajo es compensado por la intensidad de carbono más alta de la red eléctrica de México, lo que resulta en reducciones porcentuales semejantes en las emisiones de GEI. Modelos más pequeños, que miden entre 8 m y 11 m, con y sin aire acondicionado, están disponibles en los cuatro países y emiten entre un 69% y un 83% menos GEI durante sus vidas útiles en comparación con los autobuses con motor de combustión interna.

El análisis también muestra otras características de modelos que afectan las emisiones totales durante la vida útil. Por ejemplo, los trolebuses modernos implementados en México poseen baterías más grandes y consumen más energía en comparación con los BEBs. Los trolebuses de 12 m a 15 m de Ciudad de México tienen baterías de 128 kWh y consumen 1,46 kWh/km, en comparación con el BEB medio de tamaño parecido en Brasil (1,39 kWh/km), Chile (1,50 kWh/km) y Colombia (1,24 kWh/km). Se calcula que los modelos de trolebuses más antiguos presentes en Brasil y Chile consumen cerca de 3,3 kWh/km. Las emisiones de GEI de los trolebuses durante sus vidas útiles son un 79% más bajas en Brasil, un 53% más bajas en Chile y un 72% más bajas en México que las de autobuses con motor de combustión interna comparables.

CONCLUSIÓN Y DISCUSIÓN

La metodología desarrollada en este trabajo calcula las emisiones evitadas de GEI de los autobuses eléctricos utilizados en ciudades latinoamericanas. Para evaluar las emisiones de GEI de autobuses eléctricos y con motor de combustión interna durante sus vidas útiles, se aplican los valores de cada país referentes a la intensidad de carbono de la generación de energía eléctrica, uso de biocombustible y cultivos. También hemos recopilado datos vehiculares y operacionales nacionales de Brasil, Chile, Colombia y México, incluso tamaño de batería, masa del vehículo, consumo de energía y kilometraje recorrido durante el año.

Para la aplicación de esta metodología en la plataforma E-BUS RADAR, se pueden ampliar los datos utilizados para la inclusión de cálculos más exactos referentes a otros países y modelos. Cuando no existan datos de países específicos, se pueden aplicar los valores latinoamericanos medios. Con relación a modelos de autobuses parecidos, se observan valores de consumo de energía comparables en los diferentes países.

Por eso, los promedios latinoamericanos deben producir buenas aproximaciones. Sin embargo, en caso de diferencias significativas en las especificaciones de los modelos —como los trolebuses modernos con baterías de iones de litio más grandes o los BEBs articulados sin aire acondicionado observados en la Ciudad de México— el uso de los promedios latinoamericanos podrá sobrestimar o subestimar las emisiones de autobuses eléctricos durante sus vidas útiles.

Actualmente, la plataforma E-BUS RADAR rastrea el uso de BEBs en 12 países latinoamericanos. Presentamos, con más detalles, las emisiones de GEI evitadas en los cuatro países con las flotas más grandes de BEBs en Latinoamérica: Brasil, Chile, Colombia y México. Los resultados demuestran un potencial de mitigación notable debido a la utilización de autobuses eléctricos. Las emisiones de GEI de los autobuses eléctricos durante sus vidas útiles en esos cuatro países son un 71% a un 84% inferiores a las emisiones de los autobuses con motor de combustión interna. Se observa un potencial más alto de mitigación de emisiones en países con redes de energía eléctrica con bajas emisiones, como Brasil y Colombia. También se observa un potencial significativo de mitigación en países cuya generación de energía eléctrica utiliza relativamente más combustibles fósiles, como México y Chile, principalmente debido a la eficiencia energética más alta de los vehículos eléctricos.

Las emisiones de modelos de BEBs de 12 m a 15 m son un 72% a un 84% inferiores a las de autobuses con motor de combustión interna comparables. Los BEBs articulados de más de 18 m reducen las emisiones totales en un 80% a un 82%, mientras que los BEBs de 8 m a 11 m generan emisiones de GEI un 69% a un 83% inferiores a las de autobuses con motor de combustión interna. Por fin, los trolebuses en Brasil, Chile y México reducen las emisiones en un 79%, un 53% y un 72%, respectivamente.

La metodología presentada en este trabajo fue desarrollada para representar la utilización de autobuses eléctricos en cualquier país latinoamericano y para poder calcular las emisiones durante las vidas útiles de los vehículos aun con informaciones limitadas sobre las características operacionales, aunque a expensas de estimaciones exactas cuando falten datos de países específicos. Mejoras futuras de la metodología se beneficiarían del aumento de granularidad en los modelos de autobuses eléctricos considerados, además de datos de países específicos sobre las distancias medias recorridas durante el año.

REFERENCES

- Acevedo, H.; Pettigrew, S.; Delgado, O. (2023). *The technology development plan as a tool for the transition to electric buses in the city of Bogotá D.C.* [El plan de desarrollo de tecnologías como herramienta para la transición hacia autobuses eléctricos en la ciudad de Bogotá, D.C.]. Consejo Internacional para el Transporte Limpio. <https://theicct.org/publication/technology-development-plan-transition-to-electric-buses-bogota-dc-dec23/>
- Laboratorio Nacional Argonne (2022). *The Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation Model (GREET)* [El modelo de gases de efecto invernadero, emisiones reguladas y uso de energía en el transporte (GREET)] (versión del 2022). <https://greet.es.anl.gov/index.php>
- Asociación Brasileña de Normas Técnicas (2013). ABNT NBR 1557: *Transportes - Especificações técnicas para a fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros* [Transportes - Especificaciones técnicas para la fabricación de vehículos de características urbanas para el transporte colectivo de pasajeros]. [Norma Técnica Brasileña]. Río de Janeiro, Brasil.
- Basma, H.; Beys, Y.; Rodríguez, F. (2021). *Battery electric tractor-trailers in the European Union: A vehicle technology analysis* [Semirremolques eléctricos a batería en la Unión Europea: análisis de tecnología vehicular]. Consejo Internacional para el Transporte Limpio. <https://theicct.org/publication/battery-electric-tractor-trailers-in-the-european-union-a-vehicle-technology-analysis/>
- Batista, M.; Bastos, P. (2023). El modelo de negocio de Bogotá para la implementación de buses eléctricos. C40. Transformative Urban Mobility Initiative. https://transformative-mobility.org/wp-content/uploads/2023/05/El-modelo-de-negocio-de-Bogota-para-la-implementacion-de-buses-electrico_ES.pdf
- Becerra, L. y Galarza, S. (2022). Costo total de propiedad: buses eléctricos en el nuevo modelo de negocios del transporte público de Santiago de Chile. Centro Mario Molina. <https://theicct.org/publication/costo-total-de-propiedad-buses-electricos-en-el-nuevo-modelo-de-negocios-del-transporte-publico-de-santiago-de-chile/>
- Bieker, G. (2021). *A global comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars* [Comparación global de las emisiones totales de gases de efecto invernadero de automóviles de pasajeros eléctricos y con motor de combustión interna]. Consejo Internacional para el Transporte Limpio. <https://theicct.org/publication/a-global-comparison-of-the-life-cycle-greenhouse-gas-emissions-of-combustion-engine-and-electric-passenger-cars/>
- Bueno C. y Delgado, O. (2022). Estrategia para el despliegue de flota eléctrica en la empresa Flota Nueva Villa en la Ciudad de Medellín. Consejo Internacional para el Transporte Limpio. <https://theicct.org/publication/hdv-latam-estrategia-despliegue-flota-electrica-empresa-flota-nueva-villa-medellin-apr22/>
- Castillo, M.; Galarza, S.; Rivera, J. C.; García, F.; Lefèvre, B.; Camós, G.; Bertossi, F.; Cruz, P. (2021). Desafíos operacionales y soluciones a la integración de buses eléctricos: lecciones de Cali, Colombia. <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Desafios-operacionales-y-soluciones-a-la-integracion-de-buses-electricos-lecciones-de-Cali-Colombia.pdf>
- Dina. [n.d.]. Ridder E: Chasis. <https://dina.com.mx/fichas/riddere.pdf>
- E-BUS RADAR: Electric Buses in Latin America (2024). *E-buses in operation in Latin America* [Buses eléctricos en América Latina] [banco de datos]. <https://www.ebusradar.org>.
- Ember Climate (2021). *Data Methodology* [Metodología de datos]. <https://ember-climate.org/app/uploads/2022/07/Ember-Electricity-Data-Methodology.pdf>
- Empresa de Investigación Energética (2022). *Descarbonização do setor de transporte rodoviário* [Descarbonización del sector de transporte por carretera]. https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-708/NT-EPE-DPG-SDB-2022-03_Intensidade_de_carbono_Transporte_Rodoviario.pdf
- Eufrasio, A.B.R.; Delgado, O.; Rozenfeld, T. (2022). *Análise da implantação de ônibus zero emissão na frota de um operador de ônibus da cidade de São Paulo* [Análisis de la implantación de autobuses cero emisiones en la flota de un operador de autobuses de la ciudad de São Paulo]. <https://theicct.org/publication/ze-hvs-na-paulo-brazil-mar22/>
- Eufrasio, A.B.R.; Daniel, J.; Delgado, O. (2023). *Operational analysis of battery electric buses in São Paulo* [Análisis operacional de autobuses eléctricos a batería en São Paulo]. Consejo Internacional para el Transporte Limpio. <https://theicct.org/publication/brazil-hvs-zebra-operational-analysis-electric-bus-sao-paulo-feb23/>
- Gobierno de la Ciudad de México (2019). Servicio de Transportes Eléctricos de la Ciudad de México. Especificación técnica número SI-DTR-8502692. Especificación técnica para trolebuses nuevos. https://www.ste.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Licitacion%20PpAT/ET%20Trolebuses%202019_6.pdf

- Hill, N.; Amaral, S.; Morgan-Price, S.; Nokes, T.; Bates, J.; Helms, H.; ... y Bauen, A. (2020). *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA* [Determinación por ACV de los impactos ambientales de vehículos movidos por combustibles convencionales y alternativos] [Informe final de la Comisión Europea], DG Climate Action. https://climate.ec.europa.eu/system/files/2020-09/2020_study_main_report_en.pdf
- Consejo Internacional para el Transporte Limpio (2022). *Roadmap Model Documentation (v. 1.9)* [Documentación de modelo Hoja de Ruta (v 1.9)]. <https://theicct.github.io/roadmap-doc/>
- Organización Internacional de Aviación Civil (2020). *CORSIA Supporting Document – CORSIA Eligible Fuels Life Cycle Assessment (LCA) Methodology* [Documento de apoyo de CORSIA – Metodología de análisis de ciclo de vida de combustibles conformes a CORSIA]. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA%20Supporting%20Document_CORSIA%20Eligible%20Fuels_LCA%20Methodology.pdf
- Agencia Internacional de la Energía (2022). *Global energy and climate model* [Modelo global de energía y clima]. <https://www.iea.org/reports/global-energy-and-climate-model>
- Ley n.º 19.996, *Agrocombustibles* [relacionada con la Ley n.º 18.195, *Agrocombustibles*]. (2021). Uruguay, Ministerio de Industria, Energía y Minería. <https://www.gub.uy/ministerio-industria-energia-mineria/politicas-y-gestion/programas/agrocombustibles>
- Miaja, G.G.; Acevedo, H.; Jiménez, C.; Pineda, L.; Delgado, O. (2022). *Analysis of electric bus performance monitoring in Mexico City* [Análisis del monitoreo del desempeño de autobuses eléctricos en la Ciudad de México]. Consejo Internacional para el Transporte Limpio. <https://theicct.org/publication/mexico-hvs-zebra-analisis-desempeno-buses-electricos-cdmx-dec22/>
- Miaja, G.G.; Jiménez, C.; Acevedo, H.; Pineda, L.; Delgado, O. (2023). Consumo energético de autobuses eléctricos articulados para distintos niveles de carga en el BRT de la Ciudad de México. <https://theicct.org/publication/mexico-hvs-zebra-consumo-energetico-buses-cdmx-nov22/>
- Muñoz, C. M.; Borges, L.; Martínez, J. E.; Vieira, L.; Perpetuo, R.; Corradi, R.; Díaz, B.; González, A.; Vélez, J.; Camacho, L. (2023). Estudio de caso: Medellín, Colombia. Movilidad urbana y transición a los buses eléctricos. ICLEI – Local Governments for Sustainability. Transformative Urban Mobility Initiative. <https://americadosul.iclei.org/wp-content/uploads/sites/78/2023/08/casestudy-medellin-colombia-esp-vf.pdf>
- O’Connell, A.; Pavlenko, N.; Bieker, G.; Searle, S. (2023). *A comparison of the life cycle greenhouse gas emissions of European heavy-duty vehicles and fuels* [Comparación de las emisiones totales de gases de efecto invernadero de vehículos pesados europeos y combustibles]. Consejo Internacional para el Transporte Limpio. <https://theicct.org/publication/lca-ghg-emissions-hdv-fuels-europe-feb23/>
- Pettigrew, S.; Acevedo, H.; Delgado, O. (2023). *Charging Infrastructure for zero-emissions buses – strategies in Bogotá, Colombia* [Infraestructura de carga para autobuses cero emisiones – estrategias en Bogotá, Colombia] Consejo Internacional para el Transporte Limpio. <https://theicct.org/publication/charging-infrastructure-for-zero-emissions-buses-strategies-in-bogota-colombia/>
- Pineda, L.; Jimenez, C.; Delgado, O. (2022). Estrategia para el despliegue de flota eléctrica en el Sistema de corredores de transporte público de pasajeros de la Ciudad de México “Metrobús”: Líneas 3 y 4. *Consejo Internacional para el Transporte Limpio*. <https://theicct.org/publication/mexico-latam-hdv-zebra-mar22/>
- São Paulo Transportes S.A. (2021). *Manual dos padrões Técnicos dos veículos de tração elétrica* [Manual de normas técnicas de los vehículos de tracción eléctrica]. <https://www.sptrans.com.br/media/12303/02-manual-dos-padrões-técnicos-dos-veículos-tração-elétrica-novembro-2021-na-2-assinado.pdf>
- São Paulo, Municipalidad de. (2018a). *Anexo 4.5. Política tarifária: metodologia de remuneração do serviço de transporte coletivo por ônibus da cidade de São Paulo* [Anexo 4.5. Política tarifaria: metodología de remuneración del servicio de transporte colectivo por autobús de la ciudad de São Paulo]. https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/transportes/edital2018/001_ESTRUTURna/ANEXO-IV_POLITICA_TARIFARIA/4_5_METODOLOGIA_REMUNERACAO.pdf
- São Paulo, Municipalidad de. (2018b). *Anexo 5.1.1. Manual dos padrões técnicos dos veículos* [Anexo 5.1.1. Manual de las normas técnicas de los vehículos]. https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/transportes/edital2018/001_ESTRUTURAL/ANEXO-V_MANUAIS/5-1-1_MANUAL-DOS-PADROES-TECNICOS-DOS-VEICULOS.pdf
- Unión Internacional de Transporte Público (2020). *Bus tender structure report 2020: Annex IV* [Informe sobre la estructura de licitaciones de autobuses en el 2020: anexo IV]. <https://www.uitp.org/publications/bus-tender-structure-report-2020/>
- Urbanização de Curitiba S.A. (2023). Comisión Especial de Análisis de Convocatorias Públicas de URBS. *Relatório técnico dos testes operacionais do chamamento público para a demonstração de ônibus elétricos em Curitiba* [Informe técnico de las pruebas operacionales de la convocatoria pública para la demostración de autobuses eléctricos en Curitiba]. Pliego 001/2022. <https://transformative-mobility.org/wp-content/uploads/2024/02/URBS-report.pdf>

Servicio Agrícola Exterior del Ministerio de Agricultura de Estados Unidos (2022a). *Brazil Biofuels Annual 2022* [Informe anual sobre biocombustibles en Brasil en el 2022]. <https://www.fas.usda.gov/data/brazil-biofuels-annual-9>

Servicio Agrícola Exterior del Ministerio de Agricultura de Estados Unidos (2022b). *Argentina Biofuels Annual 2022* [Informe anual sobre biocombustibles en la Argentina en el 2022]. <https://www.fas.usda.gov/data/argentina-biofuels-annual-7>

Servicio Agrícola Exterior del Ministerio de Agricultura de Estados Unidos (2022c). *Peru Biofuels Annual 2022* [Informe anual sobre biocombustibles en el Perú en el 2022]. <https://fas.usda.gov/data/peru-biofuels-annual-5>

Servicio Agrícola Exterior del Ministerio de Agricultura de Estados Unidos (2022d). *Colombia Biofuels Annual 2022* [Informe anual sobre biocombustibles en Colombia en el 2022]. <https://www.fas.usda.gov/data/colombia-biofuels-annual-8>

Yutong (2024). ZK5120C: Autobús eléctrico. <https://www.yutong.mx/products/ZK5120C.shtml>

APÉNDICE

La Tabla A1 presenta el promedio de las características vehiculares y operacionales de BEBs y trolebuses en cuatro países latinoamericanos y autobuses equivalentes a diésel. Estos datos se obtuvieron de información pública proporcionada por las autoridades de tránsito de las ciudades y los fabricantes de autobuses (Dina, n.d.; Gobierno de la Ciudad de México, 2019; Prefeitura de São Paulo, 2018a; São Paulo Transportes S.A., 2021; Urbanização de Curitiba S.A., 2023; Yutong, 2024), estudios previos bajo la iniciativa ZEBRA (Acevedo et al., 2023; Batista & Bastos, 2023; Becerra & Galarza, 2022; Bueno & Delgado, 2022; Castillo et al., 2021; Eufrasio et al., 2022; Eufrasio et al., 2023; Miaja et al., 2022; Miaja et al., 2023; Muñoz et al., 2023; Pettigrew et al., 2023; Pineda et al., 2022) y comunicación directa entre el ICCT y las autoridades de tránsito y los operadores de autobuses.

Tabla A1
Características vehiculares y operacionales de cada país

País	Tipo de autobús eléctrico	Tamaño del autobús	Batería	Peso en vacío - eléctrico	Masa del deslizador - eléctrico	Peso en vacío - diésel equivalente	Distancia anual	Consumo de energía - eléctrico	Consumo de combustible - diésel equivalente	Consumo de combustible - diésel equivalente
		m	kWh	kg	kg	kg				
BRA	BEB	8-11	270	8.987	7.058	6.016	72.768	0,92	0,4	12,4
BRA	BEB	12-15	364	15.145	12.544	10.318	72.768	1,39	0,6	19,4
BRA	BEB	Más de 18	531	28.465	24.676	18.800	72.768	2,01	0,7	25,1
BRA	Trolebús	12-15	30	10.318	10.104	10.318	72.768	3,28	0,6	19,4
MEX	BEB	8-11	243	8.987	7.251	6.016	60.000	0,77	0,4	12,4
MEX	BEB	Más de 18	507	19.800	16.179	18.800	80.000	1,10	0,8	27,4
MEX	Trolebús	12-15	128	12.600	11.686	12.000	70.000	1,46	0,6	19,5
MEX	Trolebús	Más de 18	152	20.000	18.914	18.800	80.000	1,74	0,8	27,4
COL	BEB	8-11	243	8.987	7.251	6.016	60.000	0,98	0,4	12,4
COL	BEB	12-15	284	14.350	12.325	13.650	60.000	1,24	0,5	15,9
COL	BEB	Más de 18	564	24.133	20.104	18.800	60.000	1,91	0,7	25,1
COL	Trolebús	12-15	30	10.318	10.104	10.318	60.000	3,28	0,6	19,4
CHL	BEB	8-11	243	8.987	7.251	6.016	60.000	0,98	0,3	12,4
CHL	BEB	12-15	324	14.880	12.566	11.429	60.000	1,50	0,6	19,5
CHL	BEB	Más de 18	533	24.133	20.326	18.800	71.384	1,96	0,7	25,8
CHL	Trolebús	12-15	30	10.318	10.104	10.318	60.000	3,28	0,6	19,5



www.theicct.org

communications@theicct.org

[@theicct.org](https://www.instagram.com/theicct.org)

icct
CONSEJO INTERNACIONAL
DE TRANSPORTE LIMPIO