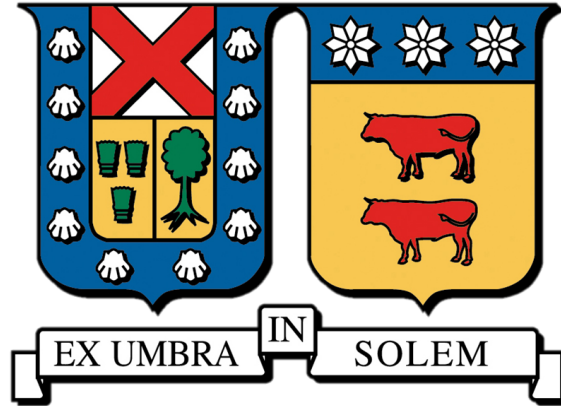


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
VALPARAÍSO - CHILE



“ANÁLISIS DE LOS FACTORES DE EMISIÓN Y CONSUMO
ENERGÉTICO DE LOS MODOS DEL SECTOR TRANSPORTE EN EL
PERIODO 2020-2050”

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERA CIVIL MECÁNICA

CONSUELO INÉS VILLEGAS OELCKERS

PROFESOR GUÍA DR- ING MAURICIO OSSES ALVARADO
CORREFERENTE ING. CARLOS BENAVIDES FARIÁS (CENTRO DE ENERGÍA)

VALPARAÍSO, ENERO, 2022

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a toda mi familia, sobre todo a mis padres: Verónica y Raúl, y también agradecer a Marius Schuler por todo su apoyo.

Para mí fue muy importante elegir un tema de memoria que me permitiera aportar al desarrollo sostenible y a la toma de decisiones desde la ingeniería, por lo que quiero agradecer a mi profesor guía, Mauricio Osses, por recibirme en su equipo de trabajo y como memorista, y a mi profesor correferente, Carlos Benavides, del Centro de Energía U. Chile.

Durante toda esta etapa universitaria estuve acompañada de increíbles personas a las que debo agradecer, en especial a mis ahora colegas: Marcela, Kenneth, Eduardo y Fernando por su empatía, generosidad, bondad y honestidad a toda prueba. También a Guillermo por siempre inspirarme a ir más allá, y a Martín por enseñarme lo que significa ser sansana. ¡Gracias a todas las personas con las que trabajé y compartí todos estos años! Por último, no puedo dejar de agradecer a Bernardita por su incondicionalidad y apoyo permanente.

Resumen

Este trabajo tiene por objetivo analizar los factores de emisiones y consumos energéticos de los modos del sector transporte en el periodo 2020-2050. Las emisiones y consumos energéticos de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y contaminantes locales asociados al transporte se definen sobre la base de sus cuatro modos: caminero, aéreo, marítimo y ferroviario. Estas emisiones se calculan considerando factores que dependen principalmente de las condiciones de operación, combustible y tecnologías.

En el presente trabajo se analizan los modos de transporte mencionados considerando las características relevantes para la estimación de emisiones y las perspectivas a futuro de cada uno con énfasis en las opciones para descarbonizar los modos de transporte. Se consideran además los estudios nacionales sobre inventarios de emisiones.

Los factores evaluados se estiman sobre la base de metodologías que siguen las directrices del IPCC para la realización de inventarios de emisiones, siendo las más relevantes para este trabajo las desarrolladas por el programa EMEP de la EEA. Se utilizan los niveles de estimación más detallados disponibles para cada modo en conjunto con información reportada por las organizaciones nacionales relevantes para cada modo, con lo cual se obtienen más de 31.000 factores considerando 9 contaminantes con más de 113 combinaciones de categorías y tecnologías para el modo caminero, 10 modelos para el modo aéreo, 17 tipos de embarcaciones para el modo marítimo y 4 para el modo ferroviario.

Estos factores son empleados en tres escenarios de proyección de emisiones. El primero es un escenario base que considera las medidas anunciadas por el Gobierno de Chile - principalmente en las Estrategias de Electromovilidad de 2017 y 2021 - y principales empresas de cada modo hasta octubre 2021. El segundo se generó considerando una introducción acelerada de la electromovilidad en los vehículos livianos del modo caminero, que implica una participación de autos eléctricos del 70 % al 2050, en comparación con un 57 % en el escenario base, lo cual resulta en una reducción del 17 % de las emisiones con respecto al escenario base en el 2050. El tercer escenario considera la intermodalidad en el traspaso de parte de la actividad del modo caminero a los modos ferroviario y marítimo. Un 3 % de reducción en los vehículos livianos de pasajeros y un 30 % en los camiones pesados de carga que en conjunto suponen un 3,5 % adicional de reducción de emisiones de CO₂ en el año 2050 frente al escenario base.

Abstract

The aim of this work is to analyse the emissions and energy consumption factors of the transport modes in Chile in the period 2020-2050. Emissions and energy consumption of GHG and local pollutants associated with transport are defined on the basis of the four modes of the transport sector: road, aviation, maritime and railways. These emissions are calculated considering factors that depend mainly on operating conditions, fuel and technologies.

In this thesis, the above-mentioned transport modes are analysed considering the relevant characteristics for the estimation of emissions and the future perspectives of each one with emphasis on the options to decarbonise the four transport modes. National studies on emission inventories are also considered.

The factors assessed are estimated on the basis of methodologies that follow the IPCC guidelines for emission inventories, the most relevant for this work being those developed by the EEA Emission Inventory Programme. The most detailed estimation levels available for each mode are used in conjunction with information reported by the relevant national organisations for each mode, resulting in more than 31.000 factors including 9 pollutants with over 113 combinations of categories and technologies for the road mode, 10 models for the aviation mode, 17 vessel types for the maritime mode and 4 for the rail mode.

This data is used in three emission projection scenarios. The first is a baseline scenario that considers the measures announced by the Chilean Government - mainly in the 2017 and 2021 Electromobility Strategies - and major companies for each mode until October 2021. The second scenario was generated considering an accelerated introduction of electromobility in light-duty road mode vehicles, implying a 70% share of electric cars by 2050, compared to 57% in the baseline scenario, resulting in a 17% reduction in emissions compared to the baseline scenario in 2050. The third scenario considers intermodality through shifting part of the activity from road to rail and maritime modes. Specifically, a 3% reduction in light-duty passenger vehicles and a 30% reduction in heavy-duty freight trucks, which together account for an additional 3.5% reduction in emissions of CO₂ in 2050 compared to the baseline scenario.

Índice general

Índice de figuras	viii
Índice de cuadros	x
1 Introducción	1
1.1 Objetivo general	2
1.1.1 Objetivos específicos	2
2 Marco Teórico	4
2.0.1 Sobre metodologías de inventarios de emisiones	4
2.0.2 Sobre perspectivas para el sector transporte	7
2.1 Modo caminero	10
2.1.1 Metodología EMEP/EEA para modo caminero	11
2.1.2 Perspectivas para el modo caminero	13
2.2 Modo aéreo	20
2.2.1 Metodología EMEP/EAA para el modo aéreo	21
2.2.2 Perspectivas para el modo aéreo	24
2.3 Modo marítimo	27
2.3.1 Metodología Entec UK (2010)	27
2.3.2 Metodología para obtención de Factores de Emisión de SMED	30
2.3.3 Metodología EMEP/EEA para el modo marítimo	30
2.3.4 Perspectivas del modo marítimo	34
2.4 Modo ferroviario	36
2.4.1 EIB Project Carbon Footprint Methodologies	36
2.4.2 Metodología UIC - ESRS	38
2.4.3 Metodología EMEP/EEA para modo ferroviario	42
2.4.4 Perspectivas del modo ferroviario	44

2.5	Inventarios nacionales de emisiones en Chile	46
2.5.1	Proyecto STEP	46
2.5.2	Proyecto MAPS	48
2.5.3	INGEI del Ministerio de Medio Ambiente	50
2.5.4	Estudio sobre mitigación de BC de CR2	52
3	Factores de Emisión y Consumo Energético	57
3.1	Modo Caminero	58
3.1.1	Resultados modo caminero	62
3.2	Modo Aéreo	66
3.2.1	Resultados modo aéreo	69
3.3	Modo Marítimo	71
3.3.1	Resultados modo marítimo	74
3.4	Modo Ferroviario	78
3.4.1	Resultados modo ferroviario	79
4	Proyección de escenarios	80
4.1	Escenario base	81
4.1.1	Resultados Escenario Base	89
4.2	Escenario electromovilidad acelerada	95
4.2.1	Resultados Escenario Electromovilidad Acelerada	96
4.3	Escenario intermodal	97
4.3.1	Resultados Escenario Intermodal	99
5	Conclusiones	106
5.1	Conclusiones generales	106
5.2	Conclusiones específicas	107
5.3	Recomendaciones	109
	Anexos	111
A	Procesamiento de bases de datos	112
A.1	Modo Caminero	112
A.1.1	COPERT 5.4	112
A.1.2	Factores de emisión y consumo energético	115
A.1.3	Emisiones	119
A.2	Modo Aéreo	125

A.2.1	Vuelos Comerciales Nacionales	126
A.2.2	Vuelos Comerciales Internacionales	128
A.2.3	Análisis de flota aérea	129
A.3	Modo Marítimo	130
A.3.1	Factores de emisión SMED en [g/kWh]	131
A.3.2	Factores en [g/km] y [g]	136
B	Proyección de flota vehicular	139
	Bibliografía	140

Índice de figuras

2.1	Resumen de opciones para descarbonizar para el sector transporte	8
2.2	Cantidad de vehículos eléctricos de pasajeros en el mundo, 2010-2020	10
2.3	Distribución tecnológica de los vehículos cero y bajas emisiones en Chile (11/2021)	14
2.4	Etapas de un vuelo y agrupación en categorías para inventarios.	21
2.5	Emisiones del modo aéreo sin acciones y metas de reducción de emisiones de la industria	25
2.6	Actividad ferroviaria de pasajeros por tipo de motorización, 1995-2016	45
2.7	Estructura general del modelo STEP 2.0	47
2.8	Categorización de los modos para factores de emisión STEP 3.0	48
3.1	Resumen de factores de emisión modo caminero	61
3.3	Factores de degradación para VLP urbano en la RM	61
3.2	Correspondencia de categorías COPERT	62
3.4	Factores de emisión para vehículos de pasajeros livianos y taxis	63
3.5	Factores de emisión para vehículos comerciales livianos	63
3.6	Factores de emisión para motos	64
3.7	Factores de emisión para buses	64
3.8	Factores de emisión para camiones	64
3.9	Factores de emisión interurbanos (todas las regiones)	65
3.10	Resumen de factores de emisión modo aéreo	66
3.11	Factores de emisión modo aéreo	70
3.12	Resumen de factores de emisión modo marítimo	71
3.13	Metodología para cálculo de emisiones	72
3.14	Supuestos asociados a cada tipo de embarcación	75
3.15	Factores de emisión modo marítimo en océano	76
3.16	Factores de emisión modo marítimo en maniobra	76
3.17	Factores de emisión modo marítimo en puerto	77

3.18	Resumen de factores de emisión modo ferroviario	78
3.19	Factores de emisión modo ferroviario	79
4.1	Escenario base: flota vehicular VLP	82
4.2	Escenario base: flota vehicular camiones medianos	83
4.3	Escenario base: flota aérea	85
4.4	Escenario base: flota marítima	87
4.5	Escenario base: flota ferroviaria	88
4.6	Emisiones Escenario Base	90
4.7	Emisiones de CO ₂ para Escenario Base	91
4.8	Emisiones de CO ₂ modo caminero para Escenario Base	92
4.9	Consumo energético modo caminero para Escenario Base	92
4.10	Emisiones Escenario Base Modo Caminero por categorías	93
4.11	Comparación de emisiones de CO _{2eq} [kton] en el año 2018 según escenario base e INGEI	94
4.12	Escenario 2: flota VLP	96
4.13	Emisiones de CO ₂ para Escenario Electromovilidad Acelerada	97
4.14	Emisiones de CO ₂ para Escenario Intermodal (modo caminero)	99
4.15	Emisiones Escenario Intermodal	100
4.16	Emisiones de CO ₂ para Escenario Intermodal	101
4.17	Emisiones de CO ₂ para todos los escenarios	102

Índice de cuadros

2.1	Estructura general de los capítulos de las Directrices del IPCC	5
2.2	Grupos de contaminantes Metodología EMEP/EEA para modo caminero	11
2.3	Ejemplo de coeficientes COPERT para vehículos de pasajeros a gasolina Euro 5 y 6	12
2.4	Categorías consideradas por el modelo COPERT para el modo caminero	13
2.5	NDC de Chile relacionadas con el sector transporte	15
2.6	Normas de emisión para vehículos livianos	16
2.7	Normas de emisión para vehículos pesados	16
2.8	Propuesta A y B para Euro 7 y comparación con Euro 6	18
2.9	Propuesta para Euro VII	19
2.10	Niveles de la metodología EMEP/EAA para el modo aéreo	22
2.11	Emisiones (MMtCO ₂ eq) sector transporte Proyecto MAPS-Chile	51
2.12	Métodos de Nivel aplicados en el INGEI de Chile 1990-2018	51
2.13	Emisiones [ktCO ₂ eq] del sector transporte, INGEI 2020	52
2.14	Medidas de mitigación de BC consideradas en cada escenario	54
2.15	Emisiones anuales de BC en kton/a	55
3.1	Contaminantes considerados por modo	58
3.2	Velocidades para FE modo caminero	59
3.3	Factores EMEP/EEA para A320 motor 3CM026	67
3.4	Información registrada en la Bitácora de Actividades de la DGAC	67
3.5	Factores EMEP/EEA para A320 motor 3CM026 vuelos nacionales en Chile	67
3.6	Características modelos modo aéreo	68
3.7	Factor de ocupación para el modo aéreo	69
3.8	Fuentes de información para supuestos modo marítimo	72
3.9	Capacidad de carga y factor de ocupación para el modo marítimo	73
3.10	Resumen de factores modo ferroviario de pasajeros	78
3.11	Resumen de factores modo ferroviario de carga	79

4.1	Crecimiento del parque vehicular chileno	81
4.2	Participación por región modo caminero	84
4.3	Proporción de flota modo aéreo	86
4.4	Participación en actividades por tipo de buque modo marítimo	87
4.5	Actividad anual por tipo de vehículo modo caminero	88
4.6	Actividad modos ferroviario, aéreo y marítimo	89
4.7	Porcentajes de variación de las emisiones de CO ₂ en el escenario base con respecto al año 2020	90
4.8	Porcentajes de variación de las emisiones de CO ₂ del transporte terrestre con respecto al año 2020 para el escenario base	92
4.9	Comparación de emisiones de CO _{2eq} [kton] en el año 2018 según escenario base e INGEI	94
4.10	Reducción de emisiones de CO ₂ en Escenario 2 con respecto al Escenario 1	97
4.11	Reducción de emisiones de CO ₂ en Escenario 2 con respecto 2020	97
4.12	Transporte de pasajeros escenario intermodal caminero-ferroviario	98
4.13	Transporte de carga escenario intermodal caminero-ferroviario-marítimo	99
4.14	Variación de emisiones de CO ₂ en Escenario 3 con respecto al Escenario 2	100
4.15	Variación de emisiones de CO ₂ en Escenario 3 con respecto al Escenario 1	101
4.16	Variación de emisiones en Escenario 1 con respecto a 2020 (todos los modos)	102
4.17	Variación de emisiones en Escenario 3 con respecto a 2020 (todos los modos)	102
4.18	Comparación de CO _{2eq} con respecto al año 2018 para evaluación de metas ECLP	105

Glosario

- ANAC** Asociación Nacional Automotriz de Chile A.G.. 13, 81
- ASTM** Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales. 26
- BC** Carbono Negro. 53
- BEI** Banco Europeo de Inversiones. 36, 78
- CCD** Climb/Cruise/Descent. 20, 47, 66
- CLOVE** Consortium for ultra Low Vehicle Emissions. 18
- CMNUCC** Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. 4, 21, 50, 51
- COPERT** Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport. 11, 12, 109
- CORSIA** Carbon Offsetting and Reduction Scheme for Internacional Aviation. 20, 24
- DGAC** Dirección General de Aeronáutica Civil. 21, 66
- DIRECTEMAR** Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante. 71
- ECLP** Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile. 103
- EEA** European Environment Agency. iii, 3, 4, 7, 11, 22
- EFE** Empresa de los Ferrocarriles del Estado. 45
- EMEP** Programa Europeo de Monitoreo Medioambiental. iii, 3, 7, 22
- FE** Factor de Emisión. 2, 13
- GEI** Gases de Efecto Invernadero. iii, 1, 4, 5, 37, 49, 52–54
- GWP** Potencial de Calentamiento Global. 5, 93, 104
- HEFA** Hydroprocessed Esters and Fatty Acids. 26
- HVO** Hydrotrated Vegetable Oils. 26
- IATA** Asociación Internacional de Transporte Aéreo. 24
- IEA** International Energy Agency. 14
- INGEI** Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero. 50, 51, 93

IPCC Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. iii, 2–4, 7, 37, 42, 47, 51

JAC Junta de Aeronáutica Civil. 25, 84

LMIU Lloyd’s Marine Intelligence Unit. 28, 29

LTO Landing and Take-Off. 20, 47, 66

MARPOL Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación por los Buques. 34, 73

MMA Ministerio de Medio Ambiente. 2, 15, 16, 48, 52

MTT Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. 1, 15, 46

NDC Contribución Nacionalmente Determinada. 15, 52–54

NMVOC Compuestos Orgánicos Volátiles sin Metano. 22

OACI Organización de Aviación Civil Internacional. 20, 22, 24, 66

OMI Organización Marítima Internacional. 34, 73, 74

PKM Pasajeros-Kilómetro. 57

PM Material Particulado. 22

SAF Sustainable Aviation Fuel. 84

SECTRA Programa de Vialidad y Transporte Urbano de la Subsecretaría de Transportes del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones. 1, 46

SIG Sistema de Información Geográfica. 28

SMED Swedish Methodology for Environmental Data. 30, 71

TKM Toneladas-Kilómetro. 57

UIC Union Internationale des Chemins de fer o Unión Internacional de Ferrocarriles. 38, 42, 43, 78

USEPA Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos. 2, 43

Capítulo 1

Introducción

Desde la incorporación de radicales innovaciones tecnológicas a mejoras en rutas y nuevas formas de movilizarse, el transporte del futuro se proyecta tan único y variado como las ciudades en las que se desarrollará. El desafío crucial que debe enfrentar el transporte es que la movilización de millones de ciudadanos permita garantizar su salud, seguridad, accesibilidad a sus propios espacios, y acceso a conectividad y bienes.

En el 2018, el sector transporte representó el 36 % del consumo energético final de Chile y el 25,2 % de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) según el Inventario Nacional 2020 [1], lo cual convierte al sector en el segundo principal emisor en el país, después de la generación eléctrica. La amenaza del cambio climático gana relevancia continuamente, por lo que las ciudades y el transporte se deben transformar en los próximos años para alcanzar las imprescindibles metas de reducción de emisiones, disminuyendo su dependencia y uso de combustibles fósiles. En consecuencia, el análisis de los procesos de planificación del transporte es clave para contribuir a un futuro sustentable y a la calidad de vida de los habitantes.

Con el objetivo de proveer una herramienta para dicho análisis, el estudio “Actualización Metodológica del Modelo de Consumo Energético y Emisiones para el Sector Transporte (STEP), Etapa II” del Programa de Vialidad y Transporte Urbano: SECTRA, del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT), busca mejorar la proyección al 2050 del consumo energético y emisiones del sector transporte desagregado por región y en sus cuatro modos: caminero, aéreo, ferroviario y marítimo, determinando el impacto que éstos generan en el medio ambiente en cuanto a su vinculación al cambio climático por la emisión de gases efecto invernadero que ellos producen. El estudio se presenta como la motivación de este trabajo, este comparte los factores de emisión y consumo energético acá estimados.

Las emisiones y consumos energéticos son calculados a partir factores según la relación de la ecuación 1.1. La Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (USEPA) define a un Factor de Emisión (FE) como un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un contaminante emitido a la atmósfera con una actividad asociada a la liberación de este (USEPA, 2021). Los factores de emisión son, por lo tanto, elaborados para cada contaminante y toman en consideración variables como tecnología específica o motor, tipo de combustible, modo de operación, velocidad de operación, entre otros. Generalmente, se expresan como el peso del contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia o duración de la actividad que emite este contaminante, teniendo como objetivo general facilitar la estimación de las emisiones de diversas fuentes de contaminación del aire.

$$Emision = Nivel\ de\ actividad \times Factor\ de\ Emision \quad (1.1)$$

El objetivo general de este trabajo consiste en determinar los factores de emisión y consumo energético de los modos caminero, ferroviario, aéreo y marítimo del sector transporte en el periodo 2020-2050 de acuerdo con las directrices del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) y del Ministerio de Medio Ambiente (MMA), incluyendo el análisis de nuevas tecnologías, normativas y perspectivas relativas a los diferentes modos de transporte para su actualización en el estudio antes descrito.

1.1 Objetivo general

Analizar los factores de emisiones y consumos energéticos de los modos del sector transporte en el periodo 2020-2050.

1.1.1 Objetivos específicos

- Analizar las metodologías de estimación de factores de emisiones y consumo energético de los diferentes modos caminero, ferroviario, aéreo y marítimo de transporte.
- Proyectar factores de emisiones y consumo energético para el periodo 2020-2050 con base en los datos de los años 1990-2019.
- Formular escenarios sobre la base del análisis del comportamiento por modo de transporte.

En el presente trabajo, se exhibe el marco teórico del estudio que busca cumplir los objetivos descritos. Éste se compone de una introducción a las metodologías de estimación de emisiones el análisis de las principales características, metodologías, perspectivas y normativas de uno de los

cuatro modos de transporte y descripciones de proyectos y estudios relacionados a este trabajo en respecto a estimación de emisiones correspondientes al sector transporte en Chile. En particular, destacan las metodologías de inventarios nacionales expuestas en la guía de la European Environment Agency (EEA) dentro del marco del Programa Europeo de Monitoreo Medioambiental (EMEP), las cuales fueron realizadas - y son actualizadas periódicamente - de acuerdo con la directrices del IPCC. Estas guías técnicas - o una parte de ellas - son utilizadas en todos los modos del transporte.

El segundo capítulo describe los supuestos y procedimientos llevados a cabo para la obtención de los factores de emisión y consumo energético para cada uno de los modos y presenta los resultados obtenidos. Finalmente, el tercer capítulo describe la base y supuestos de los tres escenarios planteados sobre los cuales se calculan las emisiones y presenta estos resultados para cada uno de los escenarios de proyección planteados en el periodo 2020-2050 con un análisis del efecto de las medidas consideradas.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.0.1 Sobre metodologías de inventarios de emisiones

Las metodologías de inventarios de emisiones nacionales de GEI se realizan de acuerdo a las directrices del IPCC, las cuales fueron elaboradas por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) en 2006. Los inventarios nacionales incluyen las emisiones y la eliminación de GEI que ocurren dentro del territorio nacional y en áreas de alta mar donde el país tiene jurisdicción.

Las Directrices del IPCC de 2006 proporcionan metodologías para estimar los inventarios nacionales tanto de las emisiones antropogénicas mediante las fuentes de emisión como la absorción a través de los sumideros de gases de efecto invernadero. El enfoque del IPCC satisface las necesidades de la CMNUCC para calcular los totales nacionales (sin mayor resolución espacial) e identificar los sectores en los que se producen las emisiones, mientras que el enfoque de las metodologías desarrolladas por la European Environment Agency (EEA) se basa en la tecnología e incluye la asignación espacial de las emisiones (fuentes puntuales y de área).

En general, las Directrices del IPCC de 2006 ofrecen una guía sobre los métodos de estimación en *Tiers* o niveles de detalle; desde el nivel 1 - método por defecto y menos detallado - hasta el nivel 3. La guía consiste en la especificación matemática de los métodos, la información sobre los factores de emisión u otros parámetros que deben utilizarse para generar las estimaciones, y la especificación de las fuentes de datos de actividad para estimar el nivel global de emisiones netas. Para definir qué nivel se utilizará, las metodologías utilizan árboles de decisión, los cuales orientan la selección del nivel dadas las circunstancias nacionales. Este contexto nacional incluye la disponibilidad de datos necesarios y la contribución de la categoría al total de emi-

siones y adsorciones nacionales y su tendencia en el tiempo, lo que determina la importancia de las categorías. De estas últimas, las más importantes se denominan categorías clave y los árboles de decisión suelen indicar que se requiere un método de Tier 2 o 3 para ellas. La estructura general de las metodologías planteadas por las Directrices del IPCC se encuentran en la tabla 2.1.

Cuadro 2.1: Estructura general de los capítulos de las Directrices del IPCC

Aspectos metodológicos	
1°	Elección del método, incluyendo árboles de decisión y definición de tier.
2°	Elección de factores de emisión
3°	Elección de data de actividad
4°	Exhaustividad
5°	Desarrollo de una serie temporal coherente
Evaluación de la incertidumbre	
1°	Incertidumbres de factor de emisión
2°	Incertidumbres de data de actividad
Garantía de calidad / control de calidad, informes y documentación	
Hojas de trabajo	

Las Directrices del IPCC de 2006 incluyen los siguientes GEI:

- Dioxido de carbono (CO_2)
- Metano (CH_4)
- Óxido nitroso (N_2O)
- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre (SF_6)
- Trifluoruro de nitrógeno (NF_3)
- Pentafluoruro de azufre trifluorometílico (SF_5CF_3)
- Éteres halogenados
- Otros halocarbonos no cubiertos por el Protocolo de Montreal, incluyendo CF_3I , CH_3Cl , CH_2Br_2 , CHCl_3 , CH_2Cl_2 .

El impacto de estos gases en el calentamiento global se define por su Potencial de Calentamiento Global (GWP) o *Global Warming Potential*. Un GWP compara el forzamiento radiativo de una tonelada de un gas de efecto invernadero durante un periodo de tiempo determinado (por

ejemplo, 100 años) con una tonelada de CO₂.

Además, las Directrices del IPCC de 2006 proporcionan información para la notificación de los siguientes precursores: óxidos de nitrógeno (NO_x), amoníaco (NH₃), compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOC), monóxido de carbono (CO) y dióxido de azufre (SO₂), aunque no se indican los métodos para estimar las emisiones de estos gases.

En cuanto al carbono, las Directrices del IPCC de 2006 estiman las emisiones en función de las especies que se emiten. Durante el proceso de combustión, la mayor parte del carbono se emite inmediatamente como dióxido de carbono (CO₂); sin embargo, parte del carbono se libera como monóxido de carbono (CO), metano (CH₄) o compuestos orgánicos volátiles no metánicos (NMVOC). La mayor parte del carbono emitido en la forma de especies distintas del CO₂ acaba oxidándose en la atmósfera hasta convertirse en CO₂. En el caso de la quema de combustibles, las emisiones de estos otros gases contienen cantidades muy pequeñas de carbono en comparación con la estimación de CO₂ y, en el nivel 1, es más preciso basar la estimación de CO₂ en el carbono total contenido en el combustible. Esto se debe a que el carbono total del combustible depende únicamente del combustible, mientras que las emisiones de los gases distintos del CO₂ dependen de muchos factores, como las tecnologías, el mantenimiento, etc. que, en general, no se conocen bien. En los niveles de estimación más detallados, se puede contabilizar la cantidad de carbono de estos otros gases.

A continuación se describen brevemente los niveles de estimación para el sector energía, donde se incluye la categoría de transporte.

El método de **Tier 1** se basa en el combustible, ya que las emisiones de todas las fuentes de combustión pueden estimarse sobre la base de las cantidades de combustible quemado (normalmente a partir de las estadísticas energéticas nacionales) y los factores de emisión promedio. Los factores de emisión de nivel 1 están disponibles para todos los gases de efecto invernadero directos relevantes.

Los factores de emisión para el metano y el óxido nitroso dependen de la tecnología de combustión y de las condiciones de funcionamiento y varían significativamente, tanto entre instalaciones de combustión individuales como a lo largo del tiempo. Debido a esta variabilidad, el uso de factores de emisión promediados para estos gases presenta incertidumbres considerables ante la necesidad de tener en cuenta una gran variabilidad en las condiciones tecnológicas.

En el método de **Tier 2** para energía, las emisiones procedentes de la combustión se estiman a partir de estadísticas de combustible similares a las utilizadas en el método de nivel 1, pero se utilizan factores de emisión específicos del país en lugar de los valores por defecto del nivel 1. Dado que los factores de emisión específicos del país disponibles pueden diferir para diferentes combustibles específicos o tecnologías de combustión, los datos de la actividad podrían catalogarse más específicamente para reflejar adecuadamente esas fuentes desagregadas.

En los métodos de **Tier 3** se utilizan modelos de emisión detallados o mediciones y datos a nivel de planta individual. Si se aplican correctamente, estos modelos y mediciones deberían proporcionar mejores estimaciones principalmente para los gases de efecto invernadero distintos al CO₂, aunque a costa de un requerimiento de información más detallado y de un mayor esfuerzo.

Metodologías EMEP/EEA

Las metodologías EMEP/EEA provienen de una guía técnica para la elaboración de inventarios de emisiones a nivel nacional para Europa creada por la European Environment Agency (EEA) dentro de su Programa Europeo de Monitoreo Medioambiental (EMEP), cuya labor consiste en proporcionar información sólida e independiente sobre el medio ambiente. La Agencia Medioambiental Europea define como su objetivo *“apoyar el desarrollo sostenible y contribuir a conseguir una mejora significativa y cuantificable del medio ambiente europeo facilitando información actualizada, específica, pertinente y fidedigna a los responsables de la política medioambiental y al público en general”* (European Environment Agency, 2021).

Esta guía está dividida en directrices generales y en los sectores considerados para la generación de inventarios. Los sectores fuente, al igual que las directrices del IPCC, incluyen energía, procesos industriales y agricultura, entre otros. A su vez, el sector energía es dividido en dos tipos de fuentes: combustión y emisiones fugitivas de combustibles. El transporte se encuentra desagregado por modo bajo la categoría combustión. Estas metodologías se describen en mayor detalle en las respectivas secciones de cada modo.

2.0.2 Sobre perspectivas para el sector transporte

En general, hay tres vías principales para reducir las emisiones del sector del transporte al disminuir su dependencia en los combustibles fósiles desde el ámbito tecnológico, es decir, además del cambio modal y la mejora de la eficiencia energética:

1. La electrificación directa, principalmente con energías renovables;
2. El uso directo de las energías renovables, especialmente de los biocombustibles; y
3. La electrificación indirecta, utilizando hidrógeno verde y combustibles sintéticos.

Para cada modo se discutirán las opciones con mayor potencial a corto y largo plazo, aun cuando muchas de las soluciones no se encuentran actualmente desarrolladas a escala comercial.

La figura 2.1 muestra una mirada general de las vías que se encuentran disponibles para descarbonizar el sector transporte a través de vectores energéticos o electrificación directa. Algunas de estas opciones, como la electrificación, ya se han adoptado con diferentes niveles de penetración en los modos camineros y ferroviarios y, además, se observa que han mostrado grandes mejoras en cuanto a autonomía, costos y participación en el mercado en los últimos años.

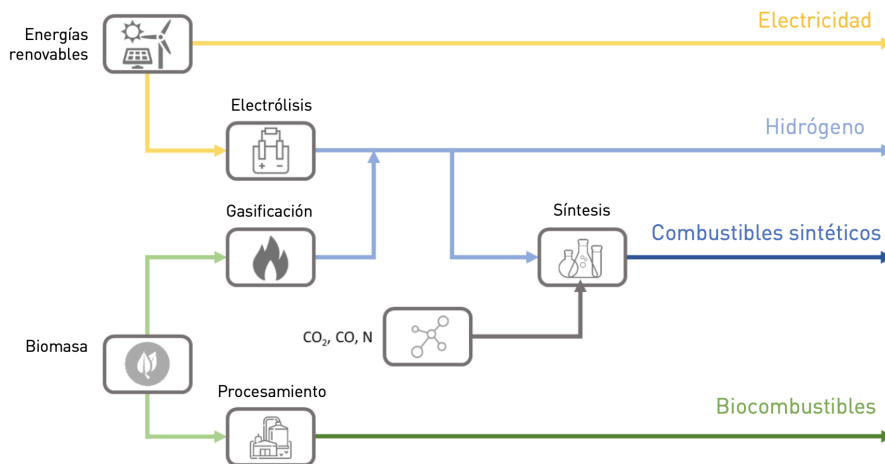


Figura 2.1: Resumen de opciones para descarbonizar para el sector transporte

El término combustibles sintéticos se refiere a una gama de combustibles basados en el hidrógeno. Estos no son combustibles inherentemente bajos en emisiones debido a que convencionalmente se obtienen a partir del gas de síntesis que se ha producido convencionalmente mediante procesos químicos a partir de una fuente basada en el carbono, como el carbón o el gas natural. Sin embargo, también pueden producirse a partir de energías renovables, ya sea mediante la gasificación de biomasa o sintetizando hidrógeno verde con una fuente de carbono (CO y CO₂ capturados de flujos de emisión, fuentes biogénicas o directamente del aire) o con nitrógeno en el caso del amoníaco. Estas rutas a partir de energías renovables se denominan Power-to-X y, a su vez, los combustibles se pueden denominar synfuels, powerfuels o e-fuels. Estos términos por lo general incluyen al hidrógeno verde, gas sintético (metano, propano, por ejemplo) y los combusti-

bles líquidos sintéticos y químicos (metanol, diésel, gasolina, queroseno y amoníaco, por ejemplo).

Los biocombustibles resultan una opción atractiva para el transporte porque pueden sustituir a los combustibles fósiles con bajas necesidades de adaptación de la infraestructura para las cadenas de suministro. A nivel global, la mayor parte del biocombustible se utiliza actualmente en el sector del transporte caminero, el mayor consumidor de combustibles líquidos para el transporte. También se utilizan pequeñas cantidades en el transporte ferroviario con motor diésel y en la aviación.

Los biocombustibles avanzados se fabrican a partir de una materia prima de biomasa no alimentaria y no forrajera, incluidos los materiales de desecho (como los aceites vegetales o las grasas animales) y los cultivos específicos para la producción de energía que pueden cultivarse en tierras menos productivas y degradadas. Por lo tanto, tienen un menor impacto en los recursos alimentarios y deberían tener un menor impacto en términos de uso de la tierra [2]. Las vías de conversión disponibles para los biocombustibles avanzados pueden clasificarse generalmente en cuatro grupos:

1. Conversión microbiana de biomasa lignocelulósica en bioetanol o biobutanol.
2. Transesterificación de aceites vegetales y grasas animales para producir biodiésel (FAME).
3. Hidrotratamiento de aceites vegetales o grasas animales para producir combustibles “drop-in” (HVO/HEFA o diésel renovable).
4. Procesamiento termoquímico de la biomasa para la producción de biocombustibles.

El biometano, por su parte, puede producirse por dos vías diferentes, la digestión anaeróbica y la gasificación térmica. En la actualidad, la mayor parte del biometano se produce mediante digestión anaeróbica.

A continuación se presentan generalidades y antecedentes tecnológicos relevantes, metodologías consideradas en este trabajo y perspectivas futuras, estructuradas por modo de transporte:

- Modo Caminero
- Modo Aéreo
- Modo Marítimo
- Modo Ferroviario

2.1 Modo caminero

Las emisiones representan la mayor proporción de emisiones de los diferentes modos. En general, éstas dependen principalmente de las características del vehículo, el combustible utilizado y el modo de conducción.

Los vehículos pertenecientes al modo caminero en general se distinguen entre livianos, como vehículos livianos de pasajeros o comerciales y taxis, y pesados, como buses y camiones y - al igual que en los demás modos de transporte - prevalece el uso de combustibles fósiles; sin embargo, se está comenzando a ver un aumento en la cantidad de vehículos eléctricos, como muestra la figura 2.2.

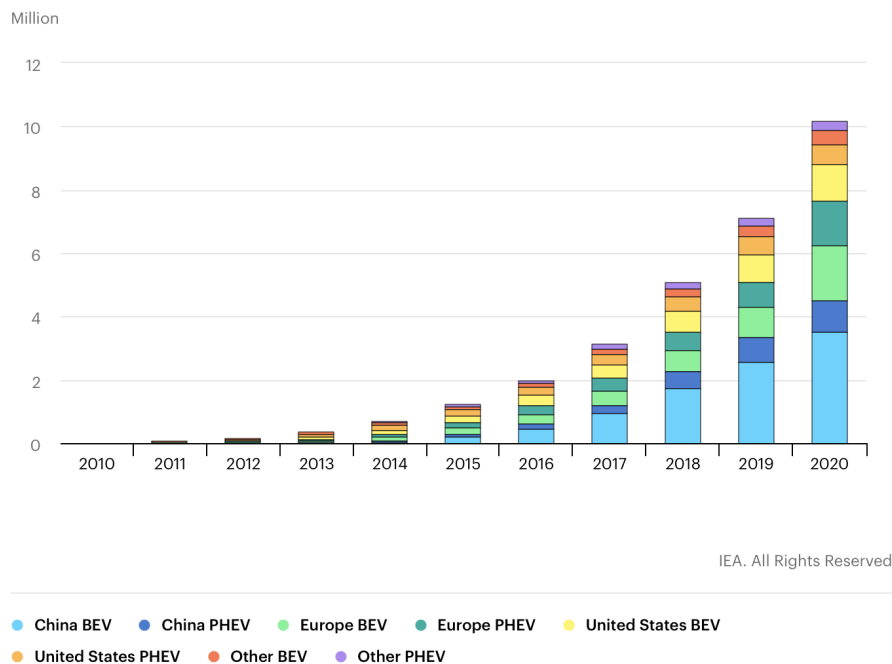


Figura 2.2: Cantidad de vehículos eléctricos de pasajeros en el mundo, 2010-2020

Fuente: IEA.

2.1.1 Metodología EMEP/EEA para modo caminero

Debido a su relevancia en el sector transporte, la EEA define la metodología para el modo terrestre de manera más detallada que para los otros modos y entrega una herramienta para el cálculo de los factores de emisión: el software Computer Programme to calculate Emissions from Road Transport (COPERT), el cual entrega factores de emisión para más de 45 tipos de vehículos.

La metodología incluye las siguientes categorías:

- Autos pasajeros
- Vehículos comerciales livianos ($< 3,5\text{ton}$)
- Vehículos pesados y buses ($> 3,5\text{ton}$)
- Motocicletas

Los contaminantes estimados se definen según grupos, como muestra la tabla 2.2.

Cuadro 2.2: Grupos de contaminantes Metodología EMEP/EEA para modo caminero

Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3	Grupo 4
CO	CO ₂	PAH	Alcanos
NO _x	SO _x	POP	Alquenos
NMVOOC	Metales	PCB	Alquinos
CH ₄	pesados	HCB	Aldehídos
N ₂ O		PCDD	Cetonas
NH ₃		PCDF	Cicloalcanos
PM			Compuestos aromáticos

La metodología describe tres niveles de precisión, desde el Tier 1 al 3. El Tier 1 considera las cuatro categorías anteriormente descritas e incluye los combustibles gasolina, diésel, LPG y gas natural. Utiliza la siguiente ecuación:

$$E_i = \sum_j \left(\sum_m (FC_{j,m} \times EF_{i,j,m}) \right) \quad (2.1)$$

Donde:

E_i : emisiones del contaminante i, [g].

$FC_{j,m}$: consumo de combustible m de la categoría de vehículo j, [kg].

$EF_{i,j,m}$: factor de emisión para el contaminante i, categoría de vehículo j y combustible m, [g/kg] (se encuentran tabulados).

El enfoque de Tier 2 considera el combustible utilizado por diferentes categorías vehiculares, por lo que las cuatro categorías principales se subdividen en diferentes tecnologías (k). Por lo

tanto, el Tier 2 utiliza el número de vehículos y kilometraje por tecnología. El algoritmo utilizado es:

$$E_{i,j} = \sum_k (N_{j,k} \times M_{j,k} \times EF_{i,j,k}) \quad (2.2)$$

Donde:

- $N_{j,k}$: número de vehículos en la flota nacional de la categoría j y tecnología k.
- $M_{j,k}$: distancia anual promedio recorrida por vehículos de la categoría j y tecnología k, [km/veh].
- $EF_{e,j,k}$: factor de emisión para el contaminante i, categoría j y tecnología k, [g/veh-km] (se encuentran tabulados).

El Tier 3 se encuentra implementado en el software COPERT, cuya última actualización disponible es COPERT 5 (2021). Debido a la diferencia en rendimiento en dos condiciones de temperatura del motor - caliente o frío, las emisiones de escape se calculan como la suma entre las emisiones calientes; es decir, cuando el motor está a la temperatura de operación normal, y en arranque frío; es decir, en funcionamiento térmico transitorio del motor. Además, se considera una distinción entre condiciones de manejo: urbano, rural o en autopista (denominado clase), y tecnologías de vehículos. Los factores de emisión son calculados sobre la base de la velocidad (v) y coeficientes que dependen del combustible, clase y tecnología del motor según la ecuación 2.3. Estos coeficientes se entregan tabulados en la base de datos de COPERT para CO, NO_x, VOC, N₂O, PM y consumo energético (EC).

$$FE = \frac{\alpha v^2 + \beta v + \gamma + \delta/v}{\epsilon v^2 + z v + \nu} \times (1 - RF) \quad (2.3)$$

En la tabla 2.3 se presentan algunos coeficientes para el cálculo de los factores de emisión a modo de ejemplo.

Cuadro 2.3: Ejemplo de coeficientes COPERT para vehículos de pasajeros a gasolina Euro 5 y 6

Category	Fuel	Segment	Euro Standard	Technology	Pollutant	Mode	Alpha	Beta	Gamma	Delta	Epsilon	Zita	Hta	Reduction Factor
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 5	GDI	CO		0,0	-0,1	6,9	10,4	0,0	-0,4	30,3	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 5	GDI	NOx		0,0	0,1	0,2	-0,3	0,0	2,0	1,3	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 5	GDI	VOC		0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	6,2	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 5	GDI	PM Exhaust		0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	-0,1	6,0	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 5	GDI	EC		0,0	0,0	2,6	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 5	GDI	CH4	Urban Peak	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	1.000,0	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 5	GDI	CH4	Urban Off Peak	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	1.000,0	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 5	GDI	CH4	Rural	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	1.000,0	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 5	GDI	CH4	Highway	0,0	0,0	5,1	0,0	0,0	0,0	1.000,0	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 6 d	GDI	CO		0,0	-0,2	11,3	16,9	0,0	-0,7	50,8	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 6 d	GDI	NOx		0,0	0,1	0,2	-0,3	0,0	2,0	1,3	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 6 d	GDI	VOC		0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	6,2	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 6 d	GDI	PM Exhaust		0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	3,5	50,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 6 d	GDI	EC		0,0	0,0	2,6	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 6 d	GDI	CH4	Urban Peak	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	1.000,0	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 6 d	GDI	CH4	Urban Off Peak	0,0	0,0	2,9	0,0	0,0	0,0	1.000,0	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 6 d	GDI	CH4	Rural	0,0	0,0	2,7	0,0	0,0	0,0	1.000,0	0,0
Passenger Cars	Petrol	Medium	Euro 6 d	GDI	CH4	Highway	0,0	0,0	5,1	0,0	0,0	0,0	1.000,0	0,0

La velocidad del vehículo tiene gran influencia en las emisiones de escape y la metodología declara dos formas de cálculo para ésta: utilizar una velocidad promedio representativa de la categoría - por ejemplo, 20[km/hr] urbano, 60[km/hr] rural y 100[km/hr] en carretera, o definir curvas de distribución de la velocidad promedio. Además, el modelo entrega correcciones a los FE por edad del vehículo (degradación), combustibles mejorados y pendiente de la carretera y carga del vehículo (para vehículos pesados).

Las categorías específicas que considera la metodología se encuentran en la tabla 2.4.

Cuadro 2.4: Categorías consideradas por el modelo COPERT para el modo caminero

Petrol Passenger Cars	Petrol Light Commercial Vehicles
Diesel Passenger Cars	Diesel Light Commercial Vehicles
LPG/CNG Bi-fuel Passenger Cars	Petrol Heavy Duty Vehicles
Two-stroke Passenger Cars	Diesel Heavy Duty Vehicles and Buses
Hybrid Passenger Cars	Hybrid Electric Urban Buses
Rechargeable Vehicles (PHEVs)	Natural Gas Buses
Motorcycles > 50cm ³	Mini-cars and All-Terrain Vehicles
Two-stroke and Four-stroke Mopeds < 50cm ³	

2.1.2 Perspectivas para el modo caminero

Electromovilidad

En cuanto a la electromovilidad en Chile, la Ruta Energética 2018-2022 y la Estrategia Nacional de Electromovilidad del 2017 [3] determinaron las siguientes metas:

- 2019: 150 electrolinerías públicas.
- 2022: 10 veces más vehículos eléctricos en comparación con el año 2017 (equivalente a un total de 2.430 EV).
- 2040: 100 % del transporte público eléctrico.
- 2050: 40 % de vehículos eléctricos de uso particular.

Los valores de los avances a noviembre del 2021 son más de 300 electrolinerías y casi 2.500 EVs. Esta última cifra incluye: 1.568 vehículos livianos y medianos, 826 buses urbanos, 35 buses interurbanos y 17 camiones (Plataforma de Electromovilidad, 2021). La distribución tecnológica de estos vehículos reportada por la Asociación Nacional Automotriz de Chile A.G. (ANAC) en

su informe Cero y Bajas Emisiones de Noviembre 2021 se encuentra en la figura 2.3.

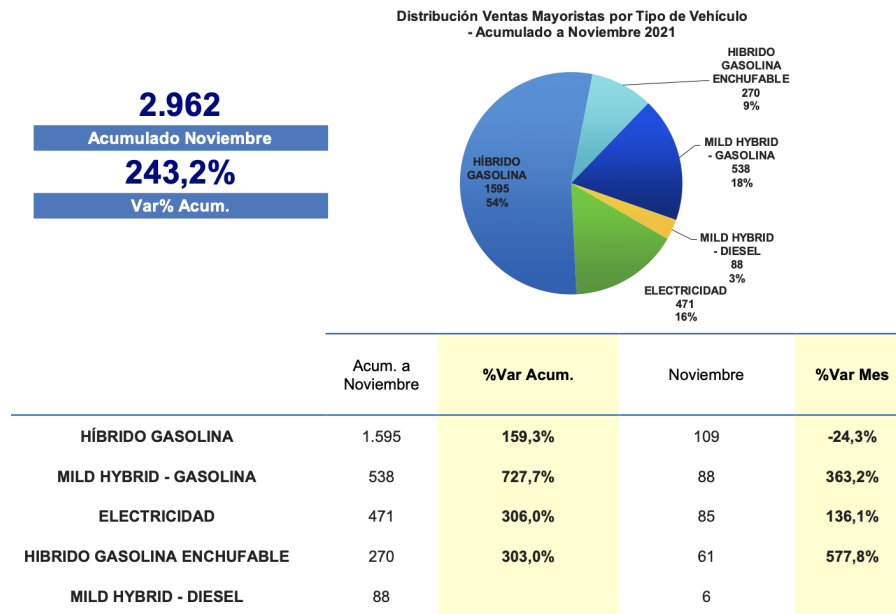


Figura 2.3: Distribución tecnológica de los vehículos cero y bajas emisiones en Chile (11/2021)

Fuente: ANAC.

La Estrategia Nacional de Electromovilidad fue actualizada en octubre de 2021 y las nuevas metas anunciadas para la incorporación o ventas de vehículos cero emisiones son:

- 100 % de nuevas incorporaciones del transporte público urbano al 2035.
- 100 % de ventas en la categoría vehículos livianos y medianos al 2035.
- 100 % de ventas de transporte de carga y buses interurbano al 2045.
- 100 % de ventas de maquinaria (minera, forestal, construcción y agrícola) de más de 560 kW de potencia al 2035 y de más de 19 kW a partir de 2040 [4].

En contraste, el reporte de la IEA de Mayo 2021 para alcanzar la carbono neutralidad al 2050 propone que para el 2030 el 60 % de las ventas de autos deberán corresponder a eléctricos y que para el 2035 ya no se deben vender autos con MCI, coincidiendo con la estrategia presentada.

Por otro lado, la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde del 2020 propone en su primera etapa (2020-2025) anticipar el despliegue del hidrógeno verde en seis aplicaciones prioritarias en Chile con el objetivo de construir un mercado local. De estas aplicaciones, dos corresponden al sector transporte caminero: camiones pesados de ruta y buses de larga autonomía, con un

mercado total potencial de 2,0 BUSD y 0,8 BUSD al 2050, respectivamente, en comparación con un mercado total potencial de 5,4 BUSD para las seis aplicaciones [5]. Además, se proyecta un mercado total potencial al 2050 de 0,5 BUSD para el amoniaco doméstico, un combustible sintético que podrá ser utilizado en los modos aéreos y marítimo. Esto transforma al transporte en una aplicación central en el eje de desarrollo del mercado local del hidrógeno verde que se pronostica se desarrollará en la segunda mitad de la década del 2020 considerando la aceleración de la adopción de estas tecnologías mediante la estrategia propuesta.

Por último, las medidas consideradas para el sector transporte en las NDC de Chile, actualizadas en abril 2020, se encuentran en la tabla 2.5 [6].

Cuadro 2.5: NDC de Chile relacionadas con el sector transporte

Categoría	Escenario de referencia	Escenario de Carbono Neutralidad
Taxis 100 % eléctricos	21 % taxis colectivos al 2050.	100 % taxis colectivos al 2050.
Transporte público (RM)	20 % buses al 2050.	100 % buses al 2040.
Transporte público (Regiones)	0 % buses a 2050.	100 % buses a 2040.
Vehículos particulares	21 % vehículos particulares al 2050.	58 % vehículos particulares al 2050.
Vehículos comerciales	21 % vehículos comerciales a 2050.	58 % vehículos comerciales a 2050.
Cambio modal transporte	Sin medidas asociadas.	Disminución de transporte privado motorizado por cambio a buses y bicicletas.
Transporte de carga	Sin medidas asociadas.	71 % hidrógeno en transporte de carga a 2050.

Fuente: NDC Gobierno de Chile, 2020.

Normativas de emisión vehicular

El objetivo de la legislación sobre emisiones contaminantes es aportar un beneficio medioambiental ayudando a reducir la concentración de contaminantes en niveles peligrosamente altos con detrimento de la salud humana por parte del transporte caminero, en lo que compete a su responsabilidad social y ambiental.

Las normas de emisiones para vehículos y motores en Chile son adoptadas por el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones (MTT) en cooperación con el Ministerio de Medio Ambiente

(MMA). Desde los inicios de la década del 90 han existido en el país estándares de emisión para vehículos del modo caminero, tanto livianos como pesados, y las normas en uso están basadas en regulaciones de la Unión Europea o Estados Unidos. Lo anterior se encuentra resumido en la tabla 2.6 y la tabla 2.7.

Al comienzo de la implementación de normas de emisiones de vehículos livianos, ésta estaba centrada en la Región Metropolitana (RM), diferenciada por tipo de combustible - diésel o gasolina - y por región. Los estándares para la RM fueron en comienzo más estrictos que para el resto del país debido a los graves problemas de polución del aire ahí presentes.

Cuadro 2.6: Normas de emisión para vehículos livianos

Norma	Fecha Inicio			
	Diésel		Gasolina	
	RM	País	RM	País
EPA 83	09/1992		09/1992	
EPA 91	09/1998		09/1998	
Euro 3 o Tier 2 Bin 8			01/2005	
Euro 4 o Tier 2 Bin 8	03/2006	03/2013	04/2011	03/2013
Euro 5 o Tier 2 Bin 5	09/2011		09/2014	
Euro 6 o Tier 3 Bin 125 Nuevos modelos			09/2022	
Euro 6 o Tier 3 Bin 125 Todos los modelos			03/2023	
Euro 6c o Tier 3 Bin 70			09/2024	

Fuente: ANAC, 2021.

Cuadro 2.7: Normas de emisión para vehículos pesados

Norma	Fecha Inicio	
	Buses	Camiones
EURO I o EPA 91	09/1993	09/1994
EURO II o EPA 94	09/1996	09/1998
EURO III o EPA 98	09/2006	09/2006
EURO IV o EPA 04	09/2013	05/2012
EURO V o EPA 07 Nuevos modelos		10/2014
EURO V o EPA 07 Todos los modelos	09 /2015	10/2015
EURO VI o EPA 10		2022

Fuente: ANAC, 2021.

Como se observa en las tablas, la última norma disponible es la Euro 6/VI, la cual debería

entrar en vigencia completamente durante el 2022 (DS41 del MMA, 30/09/2020); sin embargo, durante el 2020, un 14,5 % de los vehículos livianos y medianos vendidos en Chile correspondieron a aquellos con norma Euro 6, tanto diésel como gasolina. Esto ejemplifica una implementación gradual antes de que la norma entre en vigencia [7].

El crecimiento del parque vehicular chileno mantendrá una tendencia al alza a medida que las condiciones económicas mejoren, promoviendo la renovación del parque vehicular y tecnologías más limpias. Esto se estima dado que los vehículos antiguos contaminan más que los nuevos debido a las nuevas normas de emisiones más exigentes y a la Ley de Eficiencia Energética. Por esta razón es que se genera un período de adaptación entre tecnologías de vehículos eléctricos y convencionales.

En términos de reducción de emisiones de vehículos convencionales se observan dos aristas. Por un lado, la implementación de normas de emisión y, por otro, la mejora de la calidad del combustible.

Euro 7/VII

El último nivel de la normativa sobre emisiones para autos y furgonetas (Euro 6d-temp y 6d), así como para autobuses y camiones (Euro VI) tenía como objetivo, en parte, solucionar los errores normativos que permitieron un mal rendimiento de las emisiones en la carretera y el escándalo del “dieselgate”. La principal mejora en el rigor de la normativa fue la introducción de las pruebas de emisiones en conducción real (RDE, por sus siglas en inglés). Por primera vez en Europa se exigió a los fabricantes que demostraran que los vehículos respetaban los límites de emisiones en la carretera y no sólo en condiciones estrechas y fijas de laboratorio.

En la actualidad, la UE va camino de quedarse atrás con respecto a China en 2023 y a EE.UU. en 2025, ya que ambos países han acordado una normativa de emisiones de vehículos mucho más estricta. China, que cuenta con un procedimiento de pruebas de emisiones en conducción real (RDE) más ambicioso que el de la UE, reducirá los límites de NO_x a 35mg/km tanto para los vehículos diésel como para los de gasolina (los límites de la UE siguen siendo de 80mg/km y 60mg/km, respectivamente) [8].

La Comisión Europea ha iniciado el proceso de regulación para aumentar el rigor de las normas de emisiones para los LDV (Light Duty Vehicles) y HDV (Heavy Duty Vehicles), también informalmente conocida como Euro 7/VII, para alinearse con los objetivos del “Green Deal”

Europeo (2019). Tal y como se indica en el acuerdo, la Comisión Europea pretende acelerar el cambio hacia una movilidad sostenible e inteligente, garantizando que el transporte sea significativamente menos contaminante, especialmente en los entornos urbanos. Específicamente, debe trazarse “*vía clara a partir de 2025 hacia la movilidad de emisiones cero*”. También en el marco del “Green Deal” europeo, el plan de acción “Contaminación Cero” (Zero Pollution) pretende reducir las muertes por contaminación atmosférica en un 55 % para 2030, y reducir las muertes por contaminación atmosférica a niveles que ya no se consideren perjudiciales para la salud humana para 2050 [9]. Por lo que la norma se centrará en las emisiones de gases nocivos como los óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono, hidrocarburos no quemados y material particulado.

Se espera que la UE publique la norma post Euro 6/VI, también llamada Euro 7/VII, en 4Q2021 o a principios del 2022. La propuesta en dos escenarios (A y B) para los límites considerados en Euro 7/VII fue publicada en un estudio de Consortium for ultra Low Vehicle Emissions (CLOVE) durante el 2Q2021, los cuales se encuentran en la tabla 2.9 para vehículos livianos y medianos. Se proponen nuevos límites para NH_3 , HCHO, CH_4 y N_2O , de los cuales los dos últimos podrían también ser considerados como una suma de los límites individuales propuestos. Los límites son propuestos para autos/vans en condiciones normales de operación (también redefinidas) y hasta 160.000 km (se necesitan factores de deterioración adicionales por sobre los 240.000km). Para vehículos pesados, la propuesta de límites se encuentra en la tabla 2.8 para una vida útil de 700.000 km o 300.000 km, dependiendo del vehículo. La nueva Euro 7/VII podría ser implementada en 2025 o 2027 en Europa.

Cuadro 2.8: Propuesta A y B para Euro 7 y comparación con Euro 6

Contaminante	CO	NMOG	NO_x	PM	PN_{10}	NH_3	CH_4	N_2O	HCOH
Unidad	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	#/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
Euro 6	1000/500 (PI/CI)	-	60/80 (PI/CI)	-	6×10^{11} (SPN_{23})	-	-	-	-
Euro 7 (A)	400	45	30	2	1×10^{11}	10	20	20	5
Euro 7 (B)	400	25	20	2	1×10^{11}	10	10	10	5

Fuente: CLOVE, 2021.

Cuadro 2.9: Propuesta para Euro VII

Límite percentil 100	NO_x	SPN_{10}	PM	CO	NMOG	NH_3	N_2O	CH_4
Unidad	mg/km	#/km	#/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km
HD 2 (opt. +cc SCR Diesel)	350	5×10^{11}	12	3500	200	65	160	100
HD 3 (HD 2 + pre-heat)	175	5×10^{11}	12	1500	75	65	160	85
HL 2 (LNG as HD2)	350	5×10^{11}	12	7500	150	50	225	500
HC 2 (opt. CNG SI)	350	5×10^{11}	12	6500	150	70	300	450
Límite percentil 90	NO_x	SPN_{10}	PM	CO	NMOG	NH_3	N_2O	CH_4
HD 2 (opt. +cc SCR Diesel)	90	1×10^{11}	8	200	50	65	60	50
HD 3 (HD 2 + pre-heat)	90	1×10^{11}	8	200	50	65	60	50
HL 2 (LNG as HD2)	90	1×10^{11}	8	300	50	50	60	350
HC 2 (opt. CNG SI)	90	1×10^{11}	8	300	50	70	35	300

Fuente: CLOVE, 2021.

2.2 Modo aéreo

A nivel mundial, la aviación es responsable del 2,5 % de las emisiones relacionadas con el sector energético y del 11 % de las emisiones provenientes del transporte [2], hechos definidos por su dependencia de combustibles de alta densidad energética, debida a las limitaciones de masa y volumen de las aeronaves y al rápido crecimiento de la demanda - de pasajeros y carga - del sector.

En general, existen dos tipos de motores de aeronaves: motores recíprocos (pistón) y turbinas a gas. Un motor recíproco utiliza mecanismos de pistón y manivela para extraer la energía del combustible quemado en una cámara de combustión, que impulsa las hélices para desplazar el avión. Un motor a reacción o turbina a gas comprime el aire antes de quemar el combustible en una cámara de combustión, calentándolo. La mayor parte de la energía así producida se utiliza para propulsar la aeronave, mientras que una parte menor se utiliza para impulsar la turbina, que acciona el compresor. Los motores a turbina, además, se subclasifican en turborreactores, turbohélice y turboeje.

Dependiendo del motor de la aeronave, éstas pueden utilizar - por lo general - uno de dos combustibles: gasolina de aviación para motores de combustión interna de cuatro tiempos o motores pistón o queroseno de aviación para motores a reacción.

El vuelo de una aeronave comprende las siguientes etapas: taxi-out, despegue, ascenso (climb y climb-out), crucero, descenso, aproximación final, aterrizaje y rodaje. Las etapas que se realizan por debajo de los 3000 pies de altura se agrupan bajo el término LTO (*Landing and Take-Off*) y corresponden a las maniobras de llegada y salida en aeropuertos mientras que las operaciones CCD (*Climb/Cruise/Descent*) incluyen todas las etapas de vuelo sobre los 3000 pies de altura.

Las normas internacionales que rigen a la aviación civil son propuestas por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), entidad que emite Normas y Métodos Recomendados (SARPs) de forma referencial para la aviación; por lo tanto, cada Estado es soberano en la decisión de adoptar estos anexos dentro de su sistema aeronáutico. Actualmente, existen normas con respecto al impacto medioambiental de la aviación para: NO_x , CO, HCs no quemados y humo de motor. Además, se pronostica que entren en funcionamiento nuevas normas para CO_2 y PM (no volátil).

Además, OACI propone un esquema de reducción de emisiones internacionales denominado Carbon Offsetting and Reduction Scheme for Internacional Aviation (CORSIA), un plan de im-

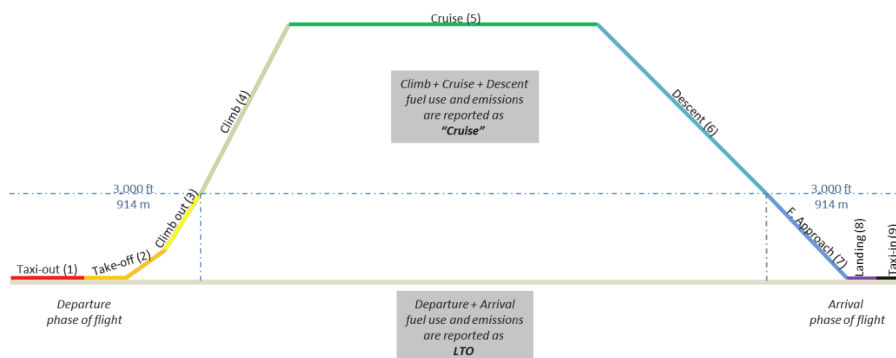


Figura 2.4: Etapas de un vuelo y agrupación en categorías para inventarios.

Fuente: EUROCONTROL.

plementación para abatir las emisiones de CO₂ en relación al Acuerdo de París y a la CMNUCC, solo en vuelos internacionales desde del 2020 en adelante para todos los Estados que voluntariamente quieran implementar este programa en su inicio, donde además se exigirá a los operadores compensar sus emisiones. Según la Resolución 970 Exenta promulgada el 13 de diciembre de 2017, Chile forma parte de la estrategia CORSIA y declara a la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) como la autoridad técnica en materias de implementación del Esquema [10].

Las variables relevantes en las emisiones provenientes del modo aéreo son:

1. Tipo de aeronave
2. Tipo de motor
3. Modo o fase de operación y altitud
4. Tipo de combustible
5. Actividad (número de vuelos y distancia recorrida)

2.2.1 Metodología EMEP/EAA para el modo aéreo

El modo aéreo se describe en el capítulo 1.A.3.a y fue actualizada en el 2019. Esta metodología incluye en el modo aéreo al uso civil comercial, chárter de pasajeros y carga y rodaje aéreo, específicamente, vuelos IFR (Instrument Flight Rules), vuelos VFR en general (Visual Flight Rules) y helicópteros civiles; mientras que las operaciones militares se consideran como otras emisiones bajo la sección NFR 1.A.5. Además, se dividen las operaciones aéreas principalmente en rango internacional/nacional y por modo de operación. Por lo tanto, las principales categorías en las que se reportan las emisiones son:

- Tráfico aéreo internacional aeropuertos (LTO < 3000 pies)

- Tráfico aéreo internacional crucero (≥ 3000 pies)
- Tráfico aéreo doméstico aeropuertos (LTO < 3000 pies)
- Tráfico aéreo doméstico crucero (≥ 3000 pies)

Los principales contaminantes que se asocian al modo aéreo son CO_2 , H_2O vapor, CH_4 , NO_x , CO , SO_x , NMVOCs y PM. De estos dos últimos se tiene menos información.

Los factores considerados en la estimación de emisiones por la metodología son tipo de aeronave catalogado según su respectivo código OACI, tipo de motor, altitud y modo de operación y tipo de combustible (gasolina de aviación o kerosene).

La metodología EMEP/EEA distingue cuatro niveles de estimación según la información disponible, desde el Tier 1 que tiene una menor precisión hasta el Tier 3A y 3B que tienen la precisión más alta. El detalle de los niveles se encuentra en la tabla 2.10.

Cuadro 2.10: Niveles de la metodología EMEP/EEA para el modo aéreo

Tier	Actividad	Data y herramientas utilizadas
Tier 1	Ventas de combustible subdividido en uso doméstico e internacional. Ciclos LTO total para doméstico e internacional.	Uso de proporción de flota promedio y factores promedio para LTO y CCD.
Tier 2	Ventas de combustible subdividido en uso doméstico e internacional. Ciclos LTO total para doméstico e internacional, por tipo de aeronave.	Uso de LTO específicos por tipo de aeronave y FEs promedio para CCD.
Tier 3	Data para cada vuelo incluyendo tipo de aeronave y distancia de vuelo, subdividido en doméstico e internacional.	Tier 3A: Uso de data específica para tipo de aeronave y hoja de cálculo incluida en la metodología. Tier 3B: Uso del EUROCONTROL Advanced Emission Model (AEM), US/Federal Aviation Administration (FAA), Aviation Environmental Design Tool (AEDT) u otras herramientas similares con tiempos específicos de rodaje de aeropuertos.

El Tier 1 basado en combustible utiliza la siguiente ecuación aplicada a nivel nacional:

$$E_{\text{contaminante}} = A_{\text{consumo combustible}} \times FE_{\text{contaminante}} \quad (2.4)$$

Donde

E : emisiones

A : actividad (consumo de combustible) para fase y tipo de vuelo.

FE : factor de emisión

El Tier 2 utiliza el mismo algoritmo que el Tier 1, pero, además, considera información disponible de LTOs por tipo de aeronave y desagrega los cálculos incluyendo esta variable. Ambas metodologías son *top-down*, utilizando las ventas de combustible como variable principal de actividad.

En contraste, el Tier 3 es una metodología *bottom-up* y está basada en los datos reales de los movimientos de los vuelos, tanto para Tier 3A con datos Origen-Destino (OD), como para Tier 3B con información de las trayectorias completas.

En el Tier 3A, los inventarios se modelan utilizando datos sobre el consumo medio de combustible y las emisiones para la fase LTO y las distintas longitudes de la fase CCD, para una serie de categorías de aeronaves representativas. La metodología de Tier 3B se distingue de la metodología de Tier 3A por el cálculo del combustible quemado y las emisiones a lo largo de toda la trayectoria de cada segmento de vuelo utilizando información sobre el rendimiento aerodinámico específico de la aeronave y del motor. Para utilizar el nivel 3B, se necesitan sofisticados modelos para abordar todas las variables de equipamiento, rendimiento y trayectoria y los cálculos para todos los vuelos de un año determinado.

Tal como para las emisiones Tier 2, los valores para CO_2 , SO_2 y metales pesados están basados en el combustible consumido. Las emisiones de NO_x , HC, CO y humo y el combustible utilizado se calculan vuelo a vuelo. Los valores se encuentran disponibles en las planillas de calculo anexas a la guía.

Es importante destacar que las emisiones en ciclo LTO para el Tier 3 son calculadas a partir de factores de emisión provenientes de la metodología Tier 2. Estos resultados se relacionan a cada tipo de aeronave y se adicionan a los resultados obtenidos para la fase CCD. La diferencia metodológica con el nivel 2 corresponde a la forma en la que es calculada la fase CCD, siendo una aproximación en función del consumo de combustible vendido en el país y no sometida a estimaciones propias del ciclo.

2.2.2 Perspectivas para el modo aéreo

Las emisiones de CO₂ procedentes de la aviación han aumentado rápidamente en las dos últimas décadas, alcanzando casi 1 [Gt] en 2019. Desde el año 2000, la actividad de los vuelos comerciales de pasajeros se ha multiplicado aproximadamente por un factor de 2,5 (5 % anual), mientras que las emisiones de CO₂ aumentaron en un 50 % (2 % anual). Esta diferencia en incremento se da gracias a las medidas de mejoras de eficiencia operativa y técnica adoptadas por las aerolíneas comerciales, incluidas las compras de nuevos aviones [11].

En el 37vo. periodo de sesiones llevado a cabo en 2010, la asamblea de la OACI adoptó la resolución A37-19 denominada “Declaración consolidada de las políticas y prácticas permanentes de la OACI relativas a la protección del medio ambiente - Cambio climático”, en la cual los Estados Miembros resolvieron que:

- los “Estados y organizaciones pertinentes trabajarán por intermedio de la OACI para lograr una mejora media anual mundial de 2 % en el rendimiento de combustible a mediano plazo hasta 2020 y una tasa anual de mejoras en el rendimiento de combustible del 2 % a largo plazo de 2021 hasta 2050, como meta a la que se aspira mundialmente, calculada basándose en el volumen de combustible consumido por tonelada-kilómetro de pago efectuada”, y que
- “la OACI y sus Estados Miembros y las organizaciones pertinentes trabajen juntos para tratar de lograr [...] que las emisiones mundiales netas de carbono de la aviación civil internacional desde 2020 se mantengan al mismo nivel”, permitiendo así un crecimiento carbono neutral a través de la estrategia CORSIA [10].

Por su parte, la Asociación Internacional de Transporte Aéreo (IATA) - que representa a las aerolíneas - ha fijado dos objetivos, uno a corto plazo y otro a largo plazo. Los objetivos de la IATA son de una mejora anual del 1,5 % para 2009-2020 para los vuelos internacionales y nacionales combinados. El objetivo a largo plazo - reducir las emisiones netas de CO₂ a la mitad para 2050 en relación con 2005 - no se ha incluido en ninguno de los objetivos de la OACI. Estos objetivos se encuentran resumidos en la figura 2.5.

La aviación, en conjunto con el transporte marítimo y caminero de carga pesada, son los sectores del transporte más difíciles de descarbonizar. En particular, la aviación tiene tres características que hacen que la reducción de las emisiones sea especialmente difícil:

- **Alto crecimiento de la demanda:** el crecimiento de la actividad de los pasajeros alcanzó una media del 6,2 % anual en la última década, y en 2019 se preveía que seguiría creciendo

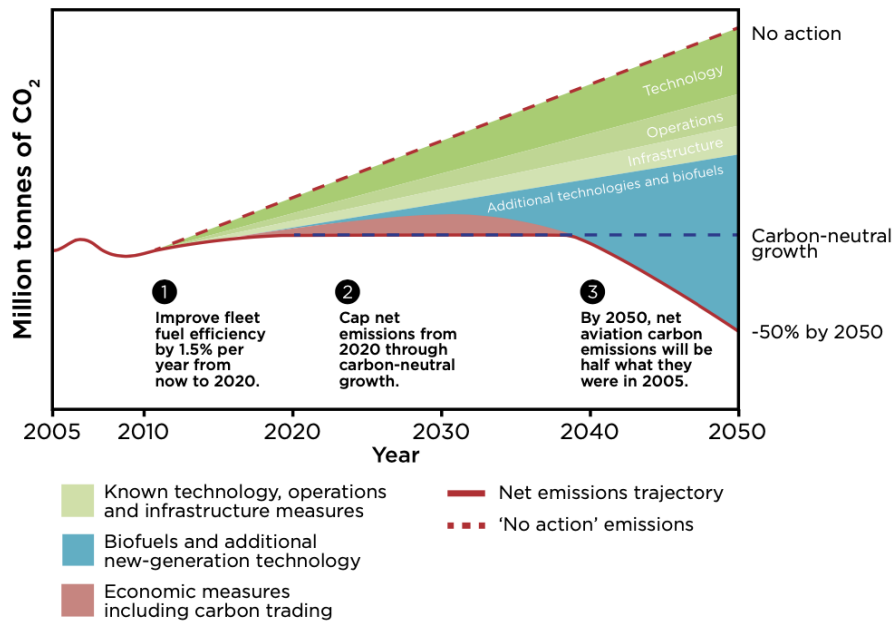


Figura 2.5: Emisiones del modo aéreo sin acciones y metas de reducción de emisiones de la industria

un 4,3% o un 4,6% en las próximas dos décadas. Aunque la crisis de Covid-19 frenó sustancialmente el crecimiento de la demanda a corto plazo, la aviación ha sido notablemente resistente a crisis anteriores y, aun con una reducción estructural de la demanda, es probable que siga siendo relativamente fuerte en las próximas décadas [11]. Este crecimiento es el más alto de los modos de transporte y ha sido más rápido en economías emergentes, sobre todo en Asia y el Pacífico. En Chile, según cifras de la JAC, el 2018 se registró un incremento del 9,9% con respecto al año anterior (DGAC, 2019).

- **Estructura del sector:** las aerolíneas operan en un mercado muy competitivo y con márgenes relativamente estrechos, con unos beneficios medios del sector de alrededor del 6-8%. Mientras tanto, los fabricantes de aviones prefieren los ajustes de diseño incrementales a los diseños revolucionarios más arriesgados, como los que necesitan las nuevas tecnologías.
- **Física:** la aviación requiere una gran potencia y combustibles de alta densidad energética. Esto limita y hace más inciertas las perspectivas de que el reemplazo de combustible se convierta en un medio prometedor de descarbonización - por ejemplo, utilizando electricidad renovable para alimentar las baterías o producir hidrógeno.

Lo anterior tiene como consecuencia que las opciones con mayor potencial futuro para descarbonizar el sector de la aviación sean las siguientes:

1. E-fuels (combustibles derivados del hidrógeno)

2. Biocombustibles
3. Propulsión eléctrica con baterías o celdas de combustible (probablemente para aviones pequeños de distancias medias o cortas).

Los combustibles de aviación sustentables (o SAF, por sus siglas en inglés) serán necesarios en el medio a largo plazo para cumplir con las metas de reducción de emisiones en conjunto con las mejoras en eficiencias antes descritas, como ilustra la figura 2.5. En 2021, la norma D7566 de la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM) - el estándar de combustible requerido para los vuelos internacionales - había aprobado ocho vías de producción de combustibles biojet¹. La gran mayoría de los biocombustibles utilizados hoy en día proviene de la vía HEFA/HVO biojet. Todas las vías aprobadas, excepto las isoparafinas sintéticas a base de azúcar (SIP), son técnicamente combustibles “drop-in”; es decir, no requieren adaptar el sistema a estos nuevos combustibles, aunque la normativa actual los limita a un 10-50 % de mezcla con el queroseno de aviación de origen fósil. Otras vías de producción incluyen *alcohol-to-jet* y gasificación. Las principales barreras para aumentar la producción de estos combustibles son la accesibilidad a materias primas sostenibles (los aceites residuales son escasos y el cultivo de plantas oleaginosas requiere mucho terreno), la falta de inversión y los altos costos actuales de los biocombustibles [12].

Además de los altos costos de los biocombustibles y debido a la gran proporción internacional del sector, se dificulta la implementación de políticas públicas por parte de países para incentivar el uso de combustibles de bajas emisiones por lo que se requerirá un marco normativo de apoyo o bien una fijación significativa de los precios del carbono.

En los e-fuels existen alternativas como el *Synthetic paraffinic kerosene* (SPK) o *Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene* (FT-SPK), cuyo uso está aprobado para uso en mezclas de hasta 50 % por la ASTM. Estos combustibles necesitan CO₂ e hidrógeno como materia prima por lo que tanto los costos de captura de dióxido de carbono como de producción de hidrógeno a partir de renovables son críticos.

¹Los biocombustibles para aviones a reacción se conocen en la industria aeronáutica como combustibles “bio-jet”.

2.3 Modo marítimo

El transporte marítimo representa el 90 % del comercio mundial y es responsable del 10 % de las emisiones totales de transporte y del 2-3 % de las emisiones globales de CO₂ [13].

Por lo general, la propulsión de los buques la proporcionan los motores principales, mientras que la electricidad a bordo se genera a partir de los motores auxiliares. En términos de magnitud de las emisiones, los motores principales (ME) y auxiliares (AE) que utilizan petróleo o derivados dominan con diferencia, seguidos de las máquinas de turbina a vapor (ST) y turbinas a gas (GT). Las emisiones de las calderas, los motores diésel de emergencia y las incineradoras de residuos son relativamente muy pequeñas y pueden considerarse insignificantes (se excluyen en lo sucesivo). Más que por su tamaño, los motores ME y AE suelen subdividirse según su velocidad en: alta velocidad (HSD), media velocidad (MSD) y velocidad lenta (SSD). Los MSD y SSD son mucho más abundantes que los HSD para los motores principales. En el caso de los motores auxiliares, predominan los motores MSD y HSD [14].

En cuanto a los combustibles, mundialmente, el principal producto utilizado para la propulsión es el petróleo residual o petróleo negro (RO) - también denominado heavy fuel-oil (HFO), mientras que el petróleo diésel marino (MDO) y el gasóleo marino (MGO) - denominados colectivamente destilados marinos (MD) - se utilizan más comúnmente para la generación de energía auxiliar.

2.3.1 Metodología Entec UK (2010)

La metodología Entec UK está basada en un reporte realizado por la empresa del mismo nombre, a la cual se le encargó realizar el inventario de emisiones provenientes de los barcos para el Reino Unido en el año 2007, en asociación con el Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales (o Defra) del Reino Unido. El reporte tiene como principal objetivo desarrollar una base de datos detallada que pueda ser utilizada a futuro para estimar las emisiones provenientes del modo marítimo del sector transporte en el Reino Unido.

En la metodología se consideran como principales contaminantes: SO₂, NO_x, PM_{2,5}, PM₁₀, NMVOC y CO₂. El objetivo principal del inventario de emisiones fue la línea de base de 2007, aunque también se desarrollaron proyecciones de emisiones hasta 2020. Dentro de los resultados que desarrolla el informe se ofrece un análisis detallado de las emisiones de los buques resuelto en una cuadrícula de 5 km x 5 km, incluyendo las emisiones de los buques en el mar, en las

maniobras y en puerto.

El inventario de emisiones se basa en los datos sobre los movimientos y las características de los buques facilitados por la Lloyd's Marine Intelligence Unit (LMIU) para el año 2007. Para garantizar una cobertura más completa de los movimientos de los buques y de la hora de llegada y salida - especialmente en el caso de los buques de pasajeros, la LMIU ha proporcionado datos complementarios del Automatic Identification System (AIS)² que los buques transmiten a las estaciones costeras y que incluyen información sobre la posición y el rumbo del buque. Estos datos sobre los movimientos de los buques se han utilizado en el desarrollo de una red de rutas detallada basada en el Sistema de Información Geográfica (SIG) a través de la zona de estudio, que utilizó las distancias de las rutas de las Tablas de Distancia Marítima del UK. Además de los movimientos de los buques, se han asignado factores de emisión de los motores y factores de carga de los motores a cada buque, basándose en el tipo de motor del buque, la potencia instalada y el tipo de combustible. Cuando se combinan, los datos anteriores permiten calcular las emisiones de cada buque y su desagregación espacial en la zona de estudio.

El enfoque es coherente con la metodología para cuantificar las emisiones de los buques en la guía del inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos de EMEP/EEA (versión 2009) y se basa en la siguiente información, que dicta en gran medida las emisiones de un buque:

- Potencia de motor instalada
- Tipo de combustible consumido
- Velocidad del buque y distancia recorrida (o el tiempo de viaje en el mar)
- Tiempo de permanencia en el puerto
- Tecnologías de reducción de emisiones instaladas

Para cada movimiento de buques, las emisiones **en el mar** en una determinada celda de la cuadrícula se han calculado de la siguiente manera:

$$E_C(g) = \frac{D(km)}{v(km/h)} \times [ME(kW) \times LF_{ME}(\%) \times EF(g/kWh) + AE(kW) \times LF_{AE}(\%) \times EF(g/kWh)] \quad (2.5)$$

Para cada buque que hace escala en un puerto, las emisiones correspondientes a las actividades

²AIS proporciona los medios para que los barcos intercambien electrónicamente los datos del barco, incluyendo: identificación, posición, rumbo y velocidad, con otros barcos cercanos y con las estaciones de los Servicios de Tráfico Marítimo.

en puerto y de maniobra se han calculado como sigue:

$$E_{M,P}(g) = T(h) \times [ME(kW) \times LF_{ME}(\%) \times EF(g/kWh) + AE(kW) \times LF_{AE}(\%) \times EF(g/kWh)] \quad (2.6)$$

Donde:

- D : distancia que recorre un buque, estimada en función del puerto de salida/llegada y de la ruta supuesta.
- v : velocidad media del buque.
- T : tiempo medio de atraque o de maniobra por escala para una determinada categoría de buque.
- ME/AE : potencia instalada del motor principal/auxiliar.
- $LF_{ME/AE}$: factor de carga medio del motor principal/auxiliar en el mar o en maniobra/puerto.
- EF : factores de emisión asignados a cada buque para en función de cada tipo de combustible y operación del motor.

Como se mencionó anteriormente, los movimientos de los buques son obtenidos de la data LMIU. Esta base de datos fue separada por Entec UK en las siguientes categorías:

- Tránsitos (es decir, cualquier movimiento dentro del área de estudio, incluidos los buques de paso que no hacen escala en ningún puerto del Reino Unido o de cualquier otro país dentro del área de estudio) que se han utilizado para estimar las emisiones “en el mar”.
- Escalas portuarias (es decir, sólo los tránsitos que hacen escala en un puerto dentro de la zona de estudio) que se han utilizado para estimar las emisiones “en puerto” y “de maniobra”.

Las categorías de buques (doméstico e internacional) consideradas por la metodología son:

- Granelero
- Buques de contenedores
- Carga general
- Pasajeros
- Carga rodada
- Petrolero
- Pesca
- Otros

Estas categorías hacen posible distinguir diferentes velocidades de servicio, potencia y velocidad de los motores principal y auxiliar.

2.3.2 Metodología para obtención de Factores de Emisión de SMED

El estudio “Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors” de Swedish Methodology for Environmental Data (SMED) de 2004 trabajó en la derivación de factores de emisión para buques (> 100 GRT³) en Suecia.

El estudio se ha centrado en 28 contaminantes atmosféricos diferentes, cuyos factores de emisión se han propuesto en función del tipo de motor y de combustible. Para el año 2002, los factores abarcan tres modos de funcionamiento (“en el mar”, “maniobras” y “en puerto”) y, por tanto, tienen en cuenta las emisiones del motor principal y del motor auxiliar.

Con el fin de obtener factores de emisión representativos y actualizados para esta aplicación, se evaluaron los datos de emisión “internos” y también las bases de datos de factores de emisión publicadas en la literatura. Por lo tanto, los factores de emisión se obtuvieron a partir de una base de datos compuesta por mediciones de los gases de escape de unos 62 buques con unos 180 motores marinos. Los factores de emisión se han ponderado para tener en cuenta la proporción de la flota que utiliza medidas de limpieza de los gases de escape, los factores de edad para el consumo de combustible y el mayor uso de combustibles con bajo contenido de azufre.

2.3.3 Metodología EMEP/EEA para el modo marítimo

Esta metodología considera al modo marítimo como la categoría de fuentes que abarca todo el transporte acuático - desde las embarcaciones de recreación hasta los grandes buques de carga oceánicos que funcionan principalmente con motores diésel de alta, baja y media velocidad y, ocasionalmente, con turbinas de vapor o de gas. Incluye los aerodeslizadores y los hidroplanos. Las actividades consideradas incluyen:

- Navegación marítima internacional (búnker) y doméstica: incluye los aerodeslizadores y los hidrodeslizadores, pero excluyendo los barcos de pesca y buques de la armada. La división internacional/nacional debe determinarse sobre la base del puerto de salida y el puerto de llegada, y no por la nacionalidad del buque.
- Pesca: emisiones de los combustibles quemados para la pesca interior, costera y de ultramar. La pesca debe abarcar los buques de todas las nacionalidades que hayan recargado combustible en el país (incluye la pesca internacional).
- Móviles: todas las demás emisiones móviles transportadas por el agua procedentes de la combustión de combustibles que no se especifican en otra parte. Incluye las emisiones de

³Gross Register Tonnage: unidad internacional de volumen (obsoleta), equivalente a 100 pies cúbicos

la navegación marítima militar.

- Operaciones multilaterales: emisiones procedentes de los combustibles utilizados para la navegación marítima en operaciones multilaterales en virtud de las Naciones Unidas.

Los principales contaminantes considerados por la guía son CO, VOC, NO_x, PM (incluido el Carbono Negro) derivados del hollín, que tienen que ver principalmente con la tecnología del motor, y CO₂, SO_x, Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) y metales pesados y otros PM (principalmente derivadas del sulfato) que se originan en la especificación del combustible.

Al igual para los demás modos del transporte, se distinguen 3 niveles de estimación. El primer tier se rige por la siguiente ecuación:

$$E_i = \sum_m (FC_m \times EF_{i,m}) \quad (2.7)$$

Donde:

E_i : emisiones de un contaminante i, [kg]

FC_m : masa del tipo de combustible m vendido en el país, [ton].

$EF_{i,m}$: factor de emisión específico para el contaminante i y combustible m, [kg/ton].

Los factores de emisión del Tier 1 asumen una tecnología promedio para la flota.

El enfoque de Tier 1 se basa en la premisa de que las cantidades de combustible vendidas para las actividades de navegación están disponibles por tipo de combustible, a partir de datos recogidos a nivel nacional. Los datos sobre el combustible deben dividirse por código NFR: navegación nacional (normalmente estadísticas de navegación), internacional (búnker), pesca (normalmente disponible como estadísticas separadas) y militar.

El enfoque de Tier 2, al igual que el de nivel 1, utiliza el consumo de combustible por tipo de combustible, pero requiere datos específicos del país sobre la proporción de combustible utilizado por tipo de combustible y tipo de motor (motores de baja, media o alta velocidad). El algoritmo utilizado es:

$$E_i = \sum_m \left(\sum_j FC_{m,j} \times EF_{i,m,j} \right) \quad (2.8)$$

Donde:

E_i : emisiones anuales de un contaminante i , [kg].

$FC_{m,j}$: masa del tipo de combustible m usado por naves con tipo de motor j , [ton].

$EF_{i,m,j}$: factor de emisión promedio para el contaminante i por naves con tipo de motor j usando combustible tipo m , [kg/ton].

Cabe destacar que la metodología EMEP/EEA para el modo marítimo hace referencia a la metodología Entec en la sección sobre factores de emisión para los años que cubre el estudio (2000-2010).

El enfoque de Tier 3 utiliza como base la información de movimientos de buques para naves individuales. Para un solo viaje las emisiones se pueden expresar como la suma de las emisiones en los tres tipos de operación: en puerto, en maniobra o en el mar:

$$E_{Trip} = E_{Hotelling} + E_{Manouvering} + E_{Cruising} \quad (2.9)$$

El inventario total es la suma de todos los viajes de todas las naves durante el año.

Cuando se conoce el consumo de combustible de cada fase, las emisiones de un contaminante i se pueden calcular para un viaje como:

$$E_{Trip,i,j,m} = \sum_p (FC_{j,m,p} \times EF_{i,j,m,p}) \quad (2.10)$$

Donde m indica el tipo de combustible, es decir fuel oil búnker, diesel marino/gasóleo marino (MDO/MGO) o gasolina. Además, j indica el tipo de motor (diesel y de baja, media o alta velocidad, turbina de gas o turbina de vapor) y p indica la fase del viaje (crucero, en puerto o maniobra).

El Tier 3 se utiliza para el calculo de las emisiones provenientes de NO_x , NMVOC y PM. Emisiones de otros contaminantes se calculan utilizando el Tier 1.

Cuando no se conoce el consumo de combustible por fase, la metodología propone otro método basado en la potencia instalada y el tiempo de las diferentes fases de navegación, según la siguiente ecuación:

$$E_{Trip,i,j,m} = \sum_p [T_p \sum_e (P_e \times LF_e \times EF_{e,i,j,m,p})] \quad (2.11)$$

Donde:

P : potencia nominal del motor, [W].
T : tiempo, [hr].
e : categoría del motor (principal o auxiliar).
p : fase del viaje, crucero, en el puerto (hotelling) o en maniobra.
El tiempo de crucero, de no ser conocido, se calcula como:

$$Tiempo (Crucero)[hr] = \frac{Distancia[km]}{Velocidad\ crucero\ promedio[km/hr]} \quad (2.12)$$

Como se mencionó anteriormente, la metodología Tier 3 basada en la potencia instalada de EMEP/EEA es equivalente a la metodología Entec UK.

Para estimar las emisiones de las embarcaciones pequeñas, en las que no se recogen estadísticas nacionales de actividad por separado, es necesario derivar los datos de actividad a partir de los datos sobre la población de estas embarcaciones, por tipo de embarcación, tipo de combustible, tipo de motor, grado tecnológico, y datos de actividad para los factores de carga del motor y las horas de uso anuales estimadas. El consumo de combustible y las emisiones por tipo de combustible se estiman como sigue:

$$E_{i,m} = \sum_b \sum_e \sum_z (N_{b,e,z} \times T_{b,e,z} \times P_{b,e,z} \times LF_{b,e,z} \times EF_{b,e,z}) \quad (2.13)$$

Donde:

N : número de naves.
T : duración promedio de operación de cada nave por año, [hr/nave].
P : potencia nominal del motor, [kW].
LF : factor de carga del motor, [%].
EF : factor de emisión, [g/kWh].
b : tipo de nave (yate, bote de cabina, bote a vela, etc.)
e : tipo de motor.
i : contaminante (NMVOC, NH_3 , NO_x , PM) o consumo de combustible.
m : tipo de combustible (diésel, gasolina).
z : grado de tecnología (convencional, 2003/44/EC).

Los datos de factores de carga, factores de emisión, potencia del motor principal, ratio de motor auxiliar/principal, supuestos de velocidades de crucero y duración promedio de actividades en puerto se encuentran tabuladas por las mismas categorías utilizadas por Entec UK.

2.3.4 Perspectivas del modo marítimo

Con alrededor de 95.000 buques actualmente en funcionamiento, la OMI estima que las emisiones serán un 50 % más altas en 2050 que en 2018 si no se adoptan políticas de mitigación. Los combustibles utilizados se caracterizan por ser poco refinados y baratos, mientras que al mismo tiempo representan entre el 24 y el 41 % de los costos totales del transporte marítimo, lo cual supone una gran barrera en la adopción de combustibles alternativos más limpios y convierte al transporte marítimo en uno de los sectores más complejos de descarbonizar, como se mencionó anteriormente, considerando que los precios actuales de los combustibles bajos en carbono son entre 2 a 5 veces mayores que los convencionales [13].

En el corto plazo, se espera que la normativa más estricta sobre la reducción de los óxidos de azufre sea el principal factor que influya en la reducción de las emisiones. La última regulación de límites de SO_x de la OMI entró en vigor en el 2020 definida por MARPOL Anexo 6 regulación 14: “para el 31 de diciembre de 2019, todo el transporte marítimo de fuel-oil que opere fuera de las Zonas de Control de Emisiones deberá limitarse al 3,50 % en masa por masa (m/m). A partir de enero de 2020, este requisito se hará más estricto - hasta el 0,50 % del “fuel-oil utilizado a bordo”, término que incluye las emisiones de los motores principales y auxiliares, así como de las calderas”. Actualmente, existen soluciones transitorias como como la incorporación de depuradores de gases de escape y el cambio a gas natural licuado (GNL) de origen fósil; sin embargo, la OMI declaró como objetivo la reducción del 50 % de las emisiones del transporte marítimo internacional para el 2050 en comparación con los niveles del 2008, por lo que se requieren soluciones adicionales.

Específicamente, la OMI declaró tres objetivos a lograr:

1. La intensidad de las emisiones de carbono de los buques se reducirá mediante la aplicación de nuevas fases del índice de diseño de eficiencia energética (EEDI) para los buques nuevos.
2. Disminución de la intensidad del carbono en el transporte marítimo internacional. La reducción de las emisiones de CO_2 en al menos un 40 % para 2030, en comparación con 2008 y como media del transporte marítimo internacional. Se deben realizar esfuerzos para que esta reducción llegue a un 70 % en 2050.
3. Las emisiones de GEI del transporte marítimo internacional alcanzarán su punto máximo y disminuirán. Alcanzar el máximo de emisiones de GEI del transporte marítimo internacional lo antes posible y reducir el total de emisiones anuales de GEI del sector en al menos un 50 % para 2050, en comparación con 2008. Al mismo tiempo, esforzarse por eliminar por completo las emisiones de GEI, como se pide en la visión, como punto en una vía de

reducción de las emisiones de CO₂, coherente con los objetivos de temperatura del Acuerdo de París [15].

Para reducir la huella de carbono del sector marítimo se distinguen tres rutas principales: mejoras en el diseño de los buques para reducir su sfc (*specific fuel consumption*), cambiar los combustibles fósiles por otros combustibles y medios de propulsión alternativos, y mejorar las prácticas durante los periodos de atraque asegurando el *cold-ironing*. [16] *Cold-ironing* se refiere al apagado de los motores auxiliares de los buques durante las operaciones en tierra en la zona portuaria, conectando los buques a una fuente de electricidad ofrecida por la autoridad portuaria para así reducir las emisiones a la atmósfera durante los períodos de atraque. Práctica actualmente parcialmente realizada sólo por buques de guerra en algunos puertos en Chile. Con respecto a las alternativas a combustibles fósiles, existen tres categorías principales: biocombustibles, hidrógeno y combustibles derivados producidos con energías renovables.

Los biocombustibles son una opción actual para el sector como mezclas o como combustibles “drop-in”. Sin embargo, su potencial se ve principalmente limitado por incertidumbres relacionadas factores como disponibilidad, sustentabilidad y costos. Se consideran cuatro biocombustibles como alternativas principales para el sector: el biodiésel, el diésel renovable, el aceite de bio-fuel oil y el biogás licuado (LBG) (biometano).

El uso de hidrógeno y *e-fuels* (combustibles sintéticos) como metanol y amoníaco producidos a partir de energías renovables se pronostican como una medida necesarias para la descarbonización del sector, pero su inclusión implica grandes inversiones en adaptaciones de la infraestructura en los buques y puertos. El metanol, por ejemplo, está siendo considerado por empresas como Maersk - la empresa de transporte marítimo más grande del mundo privado, la cual anunció que en 2023 tendrá su primera nave carbono neutral utilizando este combustible (Maersk, 2021). Esto dentro del plan de la empresa para alcanzar la carbono neutralidad en 2050.

En conclusión, el amoníaco, el hidrógeno, el metanol y el biometano - producidos a partir de energías renovables o biomasa - se presentan como las principales alternativas bajas en carbono en términos de viabilidad para el sector. Además, se podría implementar la electrificación vía baterías o celdas de combustible para naves que recorren distancias cortas.

2.4 Modo ferroviario

Las locomotoras ferroviarias se distinguen generalmente de tres tipos:

- diésel;
- eléctricas; o
- a vapor.

Por un lado, los ferrocarriles diésel o que utilizan combustible fósil se subdividen adicionalmente en tres categorías según el tipo de unidad de propulsión que tienen. Las **locomotoras de maniobra** (o *shunting locomotives*) están equipadas con motores diésel de entre 200 y 2000 [kW] de potencia instalada. Las locomotoras de vagones o **automotores** (*rail cars*) se utilizan principalmente para la tracción ferroviaria de corta distancia; por ejemplo, en tráfico urbano. Están equipadas con motores de entre 150 y 1000 [kW]. Por último, las **locomotoras de transporte de línea** (o *line haul locomotives*) se utilizan para la tracción ferroviaria de larga distancia, tanto de mercancías como de pasajeros. Están equipadas con motores de entre 400 y 4000 [kW]. Los combustibles más utilizados por las locomotoras en general son del tipo diésel convencional - similar al utilizado por el modo caminero, el cual se caracteriza por tener una baja densidad y contenido de azufre, y el gasoil - un destilado de petróleo medio con alta densidad y contenido de azufre. Otros combustibles utilizados, pero en una proporción no significativa para impactar las emisiones, son el biodiésel y el gas natural.

Por otro lado, las locomotoras eléctricas utilizan electricidad producida en plantas generadoras estacionarias y las locomotoras a vapor se utilizan solo en operaciones localizadas como atracciones turísticas y no contribuyen de manera significativa a las emisiones actualmente, si bien estas últimas si fueron utilizadas ampliamente hasta la década de 1990 [17].

En cuanto a tecnologías de control de emisiones para ferrocarriles impulsados por combustibles fósiles, éstas se pueden diferenciar en control de la tecnología de combustión y tratamiento de gases de escape, o control de la calidad del combustible. Algunas tecnologías empleadas para el control de las emisiones de NO_x son: EGR (*Exhaust Gas Recirculation*) y SCR (*Selective Catalytic Reduction*). En cuanto a las emisiones de PM: DPF (*Diesel Particulate Filters*).

2.4.1 EIB Project Carbon Footprint Methodologies

Esta metodología fue desarrollada para calcular la huella de carbono de los proyectos de inversión financiados por el Banco Europeo de Inversiones (BEI).

El EIB llevó a cabo una fase piloto de tres años - de 2009 a 2011 - para medir el impacto en las emisiones de GEI de los proyectos de inversión que financia, y estableció metodologías que se aplican para tal efecto. Las metodologías permiten estimar dos medidas de los GEI procedentes de los proyectos de inversión financiados por el EIB:

- las emisiones absolutas de GEI, y
- la variación de las emisiones del proyecto; es decir, las emisiones relativas de GEI del proyecto - que es la diferencia de emisiones entre los escenarios “con” y “sin” proyecto. Las emisiones relativas pueden ser positivas o negativas, en función de si hay un aumento o una disminución de las emisiones.

En el caso de emisiones del sector transporte, resultan relevantes solo las emisiones denominadas como “absolutas”.

Las metodologías se basan en las Directrices del IPCC, reconocidas internacionalmente, el Protocolo de GEI del WRI, y el Enfoque Armonizado de la Contabilidad de GEI del IFI. En ausencia de factores específicos de los proyectos, las metodologías adoptan un factor del IPCC aplicable a nivel global o transnacional (denominado nivel 1 en el IPCC).

Los gases de efecto invernadero incluidos en la metodología incluyen los siete gases enumerados en el Protocolo de Kioto: dióxido de carbono (CO_2); metano (CH_4); óxido nitroso (N_2O); hidrofluorocarbonos (HFC); perfluorocarbonos (PFC); hexafluoruro de azufre (SF_6); y trifluoruro de nitrógeno (NF_3). El proceso de cuantificación de las emisiones de GEI convierte todas las emisiones de GEI en toneladas de dióxido de carbono denominadas CO_2eq utilizando los potenciales de calentamiento global (GWP).

Esta metodología divide las emisiones en alcances o *scopes*. El scope 1 corresponde a las emisiones directas de GEI que se producen físicamente a partir de fuentes que son operadas por el proyecto. El alcance 2 contabiliza las emisiones indirectas de GEI asociadas al consumo de energía consumida pero no producida por el proyecto. Las emisiones de alcance 3 son todas las demás emisiones indirectas que pueden considerarse consecuencia de las actividades del proyecto.

Las emisiones se pueden calcular como el producto entre un factor de actividad y un factor de emisión, se entregan factores de emisión promedio para distintas actividades, incluyendo el modo ferroviario de transporte. Específicamente, para las emisiones de CO_2 del modo ferroviario además se puede utilizar el modelo RAILMOD. Este modelo toma los datos de entrada del

proyecto sobre las longitudes y usos de las líneas ferroviarias y calcula las emisiones.

Finalmente, la metodología entrega factores de emisión de electricidad por país: margen combinado para generación de electricidad intermitente, margen combinado para generación de electricidad firme y factor de emisión de consumo eléctrico para redes de alto, medio y bajo voltaje. Estos últimos factores resultan relevantes para el análisis y específicamente para Chile consiste en:

- Consumo de electricidad (Pérdidas en la red de AT +2 %): 346 [gCO₂/kWh]
- Consumo de electricidad (Pérdidas en la red de MT +4 %): 353 [gCO₂/kWh]
- Consumo de electricidad (Pérdidas en la red de BT +7 %): 363 [gCO₂/kWh]

2.4.2 Metodología UIC - ESRS

Para el análisis de los factores de emisión del modo ferroviario se analiza el documento desarrollado por la Union Internationale des Chemins de fer o Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC), titulado “Environment Strategy Reporting System” (ESRS). Este documento - además del seguimiento de los objetivos medioambientales - tiene como objetivos: recoger, analizar y verificar la coherencia de los datos clave sobre el comportamiento medioambiental de todos los operadores europeos; proporcionar información correcta sobre el comportamiento medioambiental de los ferrocarriles, interna y externamente, a todas las partes interesadas, como instituciones, clientes, medios de comunicación, etc; comprender la tendencia del sector para su comprensión, mejora y evaluación comparativa; y proporcionar datos a las calculadoras medioambientales en línea Ecopassenger y EcoTransIT World.

El documento entrega una metodología que se estructura en cinco ejes principales de recolección de datos para la EPD (Base de Datos de Rendimiento Medioambiental) dentro del ESRS:

- Consumo energético
- Producción comercial (desempeño operacional)
- Emisiones GEI
- PM y NO_x
- Motores para la mejora de la eficiencia energética

Los datos de consumo de energía recogidos son el consumo de electricidad y diésel desagregado en los trenes de carga y de pasajeros y además dividido por tipos de servicio de pasajeros

(local/regional, interurbano o alta velocidad). Estos datos se refieren al consumo de energía final y no tiene en cuenta los siguientes factores: la electricidad y el diésel utilizados por los talleres de mantenimiento, las estaciones, las oficinas ferroviarias y los edificios (energía no relacionada con la tracción) ni la energía consumida en la "pre-cadena" (exploración, extracción, transformación, transporte, etc.) para llevar la electricidad a la subestación, o el combustible a la estación de servicio (energía primaria).

En la EPD, el consumo de electricidad se indica en gigavatios-hora (GWh) y se calcula en la subestación, mientras que el consumo de diésel se indica en toneladas y puede medirse utilizando los registros de los depósitos de combustible.

El ESRS recoge los principales datos de producción comercial de las EF (empresas de ferrocarriles) participantes. La recogida de datos de producción es funcional a la generación de determinados indicadores, como el consumo específico de energía y las emisiones de GEI, que se miden por unidades de transporte (pasajeros-km y toneladas-km).

Los datos de producción recogidos son:

- Tren-km para trenes de pasajeros y de carga, tanto de tracción eléctrica como diésel.
- Toneladas-kilómetro brutas para trenes de pasajeros y de carga, tanto de tracción eléctrica como tracción diésel.
- Pasajeros-kilómetro (tracción eléctrica y diésel) para el total de servicios de transporte de pasajeros, y para los diferentes tipos de servicio (local y regional, interurbano y de alta velocidad).
- Factor de carga de los servicios de transporte de pasajeros (total, local/regional, interurbano y de alta velocidad), que puede calcularse dividiendo los pasajeros-km por los asientos-km.
- Toneladas-kilómetro netas de los servicios de transporte de carga, tanto de tracción eléctrica como diésel.

Las emisiones de GEI, tanto eléctricas como de diésel, son el producto de la multiplicación de dos factores: el consumo de combustible y el factor de emisión. El factor de emisión representa la cantidad de CO₂eq expresada en gramos liberados por cada kWh de electricidad o kg de diésel utilizado para la tracción. Para la tracción diésel, el factor de emisión utilizado viene dado por la mezcla de diésel y biodiésel utilizada por el ferrocarril. Para la tracción eléctrica, esta metodología utiliza - siguiendo el Proyecto Cero Carbono de la UIC llevado a cabo en 2013-2014 - un doble enfoque (basado en el mercado y en la localización).

El factor de emisión equivalente de CO₂ por defecto para el diésel se calcula con la siguiente fórmula:

$$EFD_{Total} = EFD_{Standard} \times [(1 - Sh)_B] + EFD_{Biodiesel} \times Sh_B$$

Donde:

EFD_{Total} : Factor de emisión de CO₂eq para la mezcla de diésel utilizada por el ferrocarril.

$EFD_{Standard}$: Factor de emisión de CO₂eq para diésel estándar (3.900 gCO₂eq/kgDiesel).

Sh_B : Proporción de biodiesel usado por el ferrocarril.

$EFD_{Biodiesel}$: Factor de emisión de CO₂eq para biodiésel (2.160 gCO₂eq/kgDiesel).

Las emisiones eléctricas de CO₂eq según el método basado en la localización del GHG Protocol Scope 2 Guidance se calculan a partir del consumo de energía y el factor de emisión eléctrica basado en la localización, como sigue:

$$Em_{Electric(Location)} = C_{Electric} \times EF_{Electric(Location)} \quad (2.14)$$

Donde:

$Em_{Electric(Location)}$: Emisiones totales de CO₂ de la tracción eléctrica en función de la ubicación.

$C_{Electric}$: Consumo de electricidad.

$EF_{Electric(Location)}$: Factor de emisión de CO₂ de la tracción eléctrica basado en la ubicación.

El factor de emisión de CO₂ de la electricidad es calculado por la UIC basándose en el mix de producción nacional de electricidad del país de operación de la EF (Empresa de Ferrocarriles), la eficiencia nacional de las plantas, los factores de emisión de CO₂eq para la combustión estacionaria en las industrias energéticas y el cálculo del factor de sobrecarga *Well-to-wheel*. El cálculo del factor de emisión de CO₂eq basado en la ubicación se realiza como sigue:

$$EF_{E(LOC)} = \left(\sum_{i=1}^4 (\%_i \times M_i) \right) \times (1 + F_{well-to-wheel}) \quad (2.15)$$

Donde:

- i : índice de fuentes primarias (1=carbón, antracita; 2=petróleo crudo; 3=gas natural; 4: otros no renovables).
- F_{wtw} : factor de sobrecarga well-to-wheel.
- $\%_i$: porcentaje de la i -ésima fuente primaria en el mix nacional de producción de electricidad.
- M_i : multiplicador de la i -ésima fuente primaria obtenido de la siguiente manera.

$$M_i = \frac{StechEF_i}{EFF_i}$$

$StEF_i$: factor de emisión estequiométrica de CO₂ de la i -ésima fuente primaria.

EFF_i : eficiencia de las centrales que utilizan la i -ésima fuente primaria, expresada en porcentaje.

El valor de las emisiones de CO₂ eléctricas en función de la ubicación se suma al valor de las emisiones de CO₂ del diésel para dar lugar al valor de las emisiones totales de CO₂ en función de la ubicación:

$$Em_{Total(Ub)} = Em_{Diesel} + Em_{Electrico(Ub)} \quad (2.16)$$

Las emisiones específicas de CO₂ se calculan dividiendo las emisiones totales de CO₂ de un tipo de servicio por la producción de ese servicio. Por ejemplo, las emisiones específicas de CO₂ para el transporte de mercancías se calculan de la siguiente manera:

$$Spec EM_{carga} = \frac{EM_{carga}}{Net - tkm} \quad (2.17)$$

El cálculo del factor de emisión de CO₂ electricidad basado en la ubicación sigue exactamente el mismo método descrito anteriormente, pero utilizando los factores de emisión estequiométricos de CO₂ en lugar del factor de emisión estequiométrico de CO₂eq.

Para el cálculo de emisiones de PM y NO_x se describen tres niveles, dependiendo de la información disponible:

- Nivel 1 (experto): ferrocarriles u operadores pueden indicar sus emisiones de PM y NO_x anualmente de forma directa.
- Nivel 2 (intermedio): ferrocarriles pueden entregar información sobre la composición y consumo de combustible.
- Nivel 3 (básico): ferrocarriles no pueden entregar el tipo de información anteriormente

señalada.

El nivel 2 entrega las emisiones como la suma de las emisiones de las distintas clases de vehículos, donde las emisiones para cada clase se calculan como:

$$E_{class} = C_{D,EC} \times EF_{D,EC} \quad (2.18)$$

y a su vez, el factor de emisión se calcula como:

$$EF_D = EF_{kWh} \times EC_D \times CF_{ME} \quad (2.19)$$

Donde:

$C_{D,EC}$: consumo total de combustible, [ton].

$EF_{D,CE}$: factor de emisión para un contaminante y tipo de ferrocarril, [g/ton].

EF_{kWh} : factor de emisión, [g/kWh].

EC_D : factor de conversión energético en [kWh/kg], para el diésel tiene un valor de 11,93.

CF_{ME} : factor de conversión de la eficiencia de la transmisión engine-to-wheel, estimado como 0,36.

La metodología entrega valores para estos factores de emisión y consumos de diésel promedio según tipo de ferrocarril y clase de emisión (basado en normas UIC).

2.4.3 Metodología EMEP/EEA para modo ferroviario

La metodología entregada por la guía europea es la base de la metodología entregada por el IPCC, por lo que ambas metodologías son equivalentes, difiriendo solamente en los contaminantes que analizan. La guía del IPCC se centra en CO₂, CH₄ y N₂O (GEI directos), mientras que la guía de EMEP/EEA considera además NO_x, CO, NMVOCs, PM, NH₃ y TSP.

Se consideran tres niveles de estimación de emisiones. El Tier 1 asume una tecnología promedio y calcula las emisiones de los distintos contaminantes según:

$$E_i = \sum_m FC_m \times EF_{i,m} \quad (2.20)$$

Donde:

FC_m : consumo de combustible m en [ton].

$EF_{i,m}$: factor de emisión para contaminante i y combustible m en [kg/ton].

Cabe destacar que en Tier 1 solo hay distinción por combustible para SO_x , cuyas emisiones pueden ser calculadas según la siguiente ecuación:

$$E_{SO_x} = 2 \times \sum_m k_{s,m} \times FC_m \quad (2.21)$$

Donde $K_{s,m}$ representa el contenido de azufre por masa del combustible, el cual se puede asumir como 0,1 % para gasoil y 0,005 % para diésel.

Para Tier 2, se incluye la distinción según tecnología (j) además de la distinción por combustible (m) y se utiliza la ecuación:

$$E_i = \sum_m \sum_j (FC_{j,m} \times EF_{i,j,m}) \quad (2.22)$$

Los factores de emisión fueron derivados del “Rail Diesel Study” (2005) de la UIC y para los contaminantes no incluidos en tal estudio se adoptaron los factores de emisión de camiones pesados.

El método Tier 2 requiere que las estadísticas de venta de combustible estén separadas por tipo de tecnología. En caso de que esta información no se encuentre disponible, la metodología indica que se puede utilizar el uso en horas de cada tecnología y aplicar el factor de consumo de combustible: 219 [kg/h] para transporte de línea, 90 [kg/h] para maniobras y 53,6 [kg/h] para vagones.

Finalmente, el Tier 3 es adoptado de Agencia de Protección Medioambiental de Estados Unidos (USEPA) y utiliza la siguiente ecuación:

$$E_i = \sum_j (N_j \times H_j \times P_j \times LF_j \times EF_j) \quad (2.23)$$

Donde:

N_j : número de locomotoras del tipo j .

H_j : uso anual promedio por tipo j en [hr] (o distancia recorrida convertida a tiempo).

P_j : potencia promedio instalada en por tipo j [kW].

LF_j : factor de carga por tipo j .

EF_j : factor de emisión por tipo j en [kg/kWh].

El tipo de tecnología j además se puede desagregar por tipo de viaje: carga, urbano o regional.

2.4.4 Perspectivas del modo ferroviario

El ferrocarril es uno de los modos de transporte más eficientes desde el punto de vista energético, ya que - a nivel global - es responsable del 9% del movimiento global de pasajeros motorizados y del 7% de carga, pero sólo del 3% del uso de energía en el transporte [11].

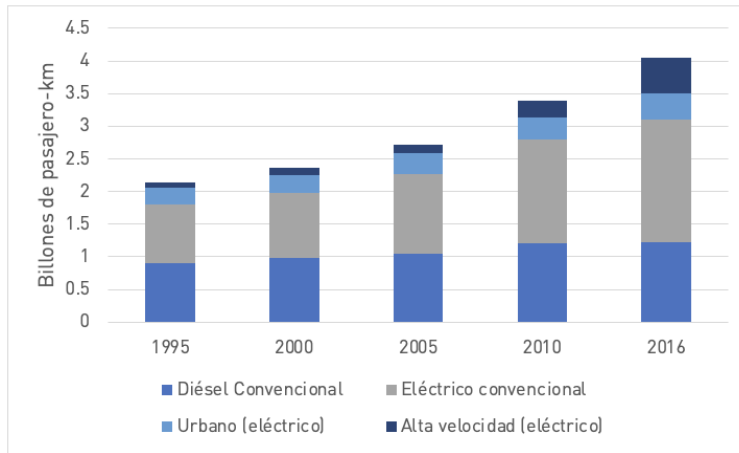
El modo ferroviario es también el sector más electrificado del transporte, con tres cuartos del transporte de pasajeros y la mitad de carga dependientes de la electricidad a nivel mundial. Se pronostica que esta tendencia se mantenga en el futuro y que para 2050 estas proporciones crezcan a 97% y dos tercios para el transporte de pasajeros y carga, respectivamente. Tal dependencia en términos de consumo de electricidad significa además que, actualmente, el sector ferroviario es el más diverso en términos de fuentes energéticas [18].

En términos de infraestructura, en el ámbito ferroviario se describen tres tipos: convencional, de alta velocidad y urbano (metro y trenes livianos). El ferrocarril convencional cubre los trayectos de media y larga distancia con una velocidad máxima inferior a 250 [km/h]. El ferrocarril de alta velocidad se define como el transporte via servicios ferroviarios de larga distancia entre estaciones, que funcionan a una velocidad máxima superior a 250 [km/h]. El metro se refiere al transporte via servicios ferroviarios urbanos de alta frecuencia y gran capacidad totalmente separados del tráfico, y el ferrocarril ligero consiste en servicios de tranvías y otros sistemas de transporte urbano de menor capacidad y velocidad.

Las redes ferroviarias convencionales componen el 95% de los kilómetros de vías férreas a nivel mundial, pero su longitud ha crecido muy poco en los últimos años. En comparación, redes urbanas y de alta velocidad han crecido significativamente (figura 2.6).

Desde el inicio del sistema de transporte metropolitano chileno, Transantiago, donde Metro de Santiago pasó de 331 millones de viajes anuales a más de 600 millones, se observa cómo este modo de transporte ha tomado un rol protagónico esencial en la movilización de personas en la RM, llegando a transportar a más de 2.200.000 pasajeros diarios (Memoria Anual 2020, Metro de Santiago). Este caso se replica a lo largo de grandes ciudades en el mundo, donde este medio de transporte aporta una alternativa de movilización rápida, fiable y relativamente barata al compararlo con vehículos particulares, y que además, reduce tanto la congestión como la circulación de contaminantes locales y emisiones de GEI al ser propulsado por electricidad.

Dentro de las opciones a futuro, se destacan los trenes de alta velocidad y los trenes urbanos



Fuente: IEA, 2020

Figura 2.6: Actividad ferroviaria de pasajeros por tipo de motorización, 1995-2016

Fuente: IEA, 2020.

eléctricos como aquéllas que tienen un alto potencial de incrementar la eficiencia en el transporte con bajas emisiones.

En Chile, las principales operaciones ferroviarias corresponden a trenes urbanos como Metro de Santiago, Merval, Metrotren Rancagua y Biotren, trenes de pasajeros en la zona centro-sur del país y trenes de carga a lo largo del país con infraestructura muy antigua. En 2019, se anunció el programa del gobierno de Sebastián Piñera denominado “Chile sobre rieles”, el cual implica una inversión de más de 4.500 millones de dólares, que sería destinada a iniciativas de pasajeros (73%), carga (5%) y mejoramiento de infraestructura (22%). De estos proyectos, un 51% se localizará en regiones (MTT, 2019).

Entre los proyectos de Empresa de los Ferrocarriles del Estado (EFE) que se encuentran actualmente en ejecución, destacan la renovación de ocho trenes del Metrotren Rancagua, la adquisición de nueve trenes para el Biotren, otros tres para el Corto Laja, tres para el servicio Victoria-Temuco y tres nuevos buscarriles para el ramal Talca-Constitución.

2.5 Inventarios nacionales de emisiones en Chile

Los inventarios nacionales de GEI consisten en un listado numérico exhaustivo de la contabilización de cada uno de los GEI antropógenos liberados o absorbidos desde la atmósfera en un área y en un período específico, generalmente correspondientes a un año calendario.

2.5.1 Proyecto STEP

Como se mencionó anteriormente, el presente trabajo se enmarca bajo el proyecto: “Actualización Metodológica del Modelo de Consumo Energético y Emisiones para el Sector Transporte (STEP), Etapa II” del Programa de Vialidad y Transporte Urbano: SECTRA, del MTT o STEP 3.0. Este consiste en la actualización metodológica del modelo obsoleto y la actualización de la herramienta computacional STEP (SECTRA: Transporte, Energía y Proyección) - una aplicación que permite realizar evaluaciones de escenarios de consumos de combustibles y de emisiones, a mediano y largo plazo, a nivel nacional y regional.

El modelo original se desarrolló en el 2010 para el estudio “Análisis y Desarrollo de una Metodología de Estimación de Consumos Energéticos para el Transporte”, posteriormente actualizado el 2014. El primer modelo STEP 1.0 fue desarrollado con un enfoque top-down para proyectar el consumo energético desagregado para los distintos modos de transporte y estimar las emisiones contaminantes locales y globales asociadas hasta el año 2025.

Mientras que el modelo STEP 1.0 determinó el consumo energético histórico y lo proyectó, el modelo STEP 2.0 determina la demanda histórica en pasajero-kilómetros (PKM) y tonelada-kilometros (TKM) y proyecta estas demandas para luego obtener el consumo energético y las emisiones asociadas. Además, el modelo considera la distinción según ámbito: urbano o interurbano e incorpora el módulo búnker. En la figura 2.7 se encuentra el diagrama de la estructura del modelo. Adicionalmente, los modelos tienen un módulo de evaluación de escenarios con tres opciones:

1. Nuevas tecnologías: opción enfocada al modo caminero y que considera la entrada de nuevas tecnologías, distintas a las convencionales (híbrido, eléctrico, plug-in, uso de biocombustible).
2. Conducción eficiente: opción enfocada al modo caminero y que considera mejoras en el rendimiento vehicular por capacitación a conductores (modifica los parámetros de factor de consumo, según la subcategoría vehicular y con un ahorro entre 5 y 20 %).

3. Intermodalidad: opción particularmente enfocada al traspaso de carga desde el modo caminero hacia el modo ferroviario.

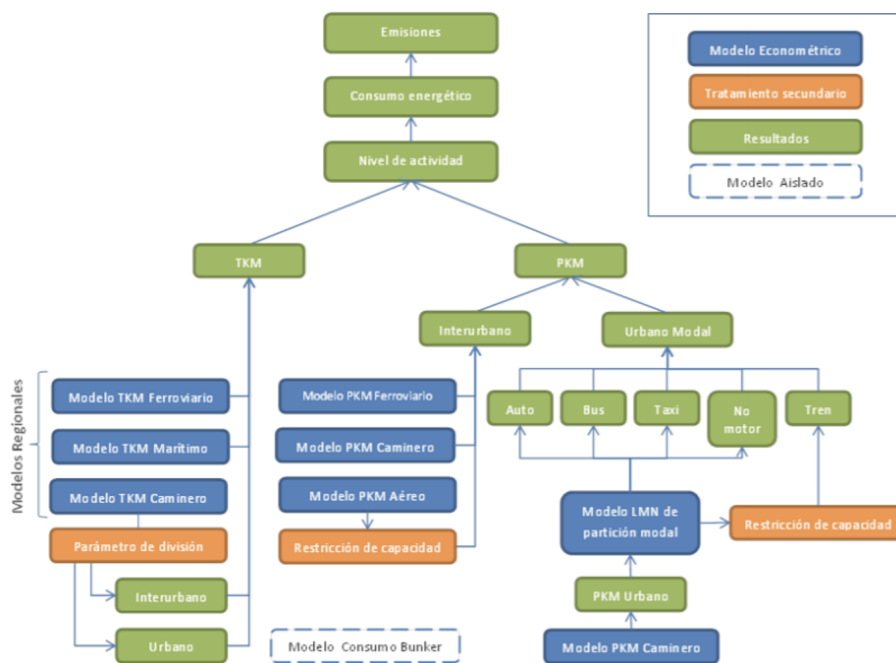


Figura 2.7: Estructura general del modelo STEP 2.0

Fuente: STEP.

El enfoque metodológico del estudio STEP 3.0 está, por lo tanto, enfocado en la actualización de los métodos contenidos en el modelo STEP 2.0, para la cuantificación y proyecciones nacionales del consumo energético y de las emisiones de contaminantes atmosféricos del sector transporte (emisiones globales y locales) - siguiendo las Directrices del IPCC, así como también para la programación de la nueva aplicación computacional. Además, propone una flexibilización en la creación de escenarios de evaluación en el sistema computacional.

La categorización de la composición de las flotas de transporte en cada uno de los modos de análisis se describe a continuación, para los cuales se desarrollarán factores de emisión como se estipula en la figura 2.8.

- Transporte vial interzonal e intrazonal: vehículos livianos (VL), buses (BUS), camiones de dos ejes (C2E), camiones de más de dos ejes (CM2).
- Transporte aéreo: desplazamientos sobre 3000 pies de altura (CCD); maniobras bajo 3000 pies y en tierra (LTO); ambos para movilidad de pasajeros.

- Transporte marítimo: desplazamientos en océano, maniobras en puerto y cabotaje, ambas para movilidad de carga.
- Transporte ferroviario: movilidad de pasajeros y movilidad de carga.

Modo	Categoría	Unidad	CO2	MP2.5	NOx	CO	SOx	CN	HC	CH4
Vial	VL	g/vkm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	BUS		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	C2E		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	CM2		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Aéreo	CCD	g/pkm	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
	LTO	g/pax	✓	✓	✓	✓		✓	✓	
Marítimo	Océano	g/tkm	✓	✓	✓	✓	✓			
	Puertos	g/ton	✓	✓	✓	✓	✓			
Ferroviario	Pasajeros	g/pkm	✓	✓	✓			✓	✓	
	Carga	g/tkm	✓	✓	✓			✓	✓	

Figura 2.8: Categorización de los modos para factores de emisión STEP 3.0

Fuente: STEP.

2.5.2 Proyecto MAPS

El proyecto MAPS-Chile, “Opciones de mitigación para enfrentar el cambio climático”, es un proyecto de gobierno en el que participan activamente siete ministerios (Ministerio de Relaciones Exteriores, de Hacienda, Transporte y Telecomunicaciones, Agricultura, Energía, Medio Ambiente y Minería) y cuya secretaría ejecutiva reside en la Oficina de Cambio Climático del MMA. Su objeto es entregar evidencias, proyecciones y opciones para mitigar el cambio climático y avanzar hacia un desarrollo bajo en carbono en Chile. Su origen de deriva del acrónimo en inglés - “*Mitigation Action Plans and Scenarios*” y nace de la iniciativa nacida en Sudáfrica LTMS (Long Term Mitigation Scenarios) [19] [20].

El proyecto se divide en tres fases. La primera, completada en 2012, contempla la proyección del escenario Línea Base 2007-2030; es decir, una proyección de la economía chilena situada en el año 2006 sin considerar esfuerzos para reducir emisiones de gases de efecto invernadero, pero incluyendo la evolución tecnológica natural de los sectores económicos. La Fase II incluye la Línea Base de emisiones de gases de efecto invernadero 2013-2030, las medidas y escenarios de mitigación junto a un análisis de los efectos macroeconómicos asociados a los distintos escenarios. Por último, la Fase III contempla una revisión y refinamiento de los resultados de la segunda fase, un estudio del impacto que pueden llegar a tener las medidas de mitigación propuestas y medidas de mitigación enfocadas a largo plazo (2030-2050). La Fase III terminó en Diciembre de 2015, antes de la COP21.

Para cada uno de los sectores considerados - incluido el sector transporte - se desarrolló un modelo que representa las condiciones potenciales de operación de cada sector en el periodo 2007-2030 y que entrega como resultado las emisiones de gases de efecto invernadero en base anual. Para estos efectos, cada modelo proyecta las variables determinantes de las emisiones de GEI en el horizonte de tiempo del proyecto.

La proyección para los años 2013-2050 de la tasa de crecimiento del PIB se construyó en base a una serie de criterios que dan origen a 3 escenarios: Bajo, Medio y Alto. Para el sector transporte se estima un total de emisiones de 30,5 millones tCO₂eq el año 2020 y 43,0 millones tCO₂eq el año 2030, en la proyección de PIB medio.

La metodología utilizada por la Fase II del proyecto en la estimación de emisiones provenientes del sector transporte se divide según subsector y se basa en la quema de combustible utilizado para el transporte de pasajeros y carga. Para el subsector de transporte caminero de pasajeros, las emisiones se calculan a partir de la proyección de la variable PKM (pasajero-kilómetro) per cápita, cuya proyección utiliza un modelo econométrico que relaciona la variable con el PIB per cápita por región. El consumo total de energía por modo se calcula como:

$$Consumo\ energetico = \frac{PKM_{regional} \times Poblacion_{regional} \times \% \text{particion modal}}{Tasa\ de\ ocupacion \times rendimiento} \quad (2.24)$$

Para el subsector transporte interurbano de pasajeros en modo ferroviario, la demanda eléctrica se calcula de manera indirecta a partir de la proyección de la variable PKM asociada al transporte de pasajeros interurbanos. El consumo energético (CE) se calcula según la siguiente ecuación:

$$CE = PKM \times IE \quad (2.25)$$

Donde IE representa la intensidad energética con un valor igual 0,0304 [Mcal/PKM] para el subsector. Cabe destacar que las emisiones de esta categoría se contabilizan en el sector generación eléctrico debido a que están asociadas a una demanda eléctrica.

La proyección de la variable TKM (toneladas-kilómetro) específica para cada subsector se utiliza indirectamente para calcular las emisiones de los subsectores de carga caminero, ferroviario y marítimo. Para proyectar esta variable se utiliza un modelo econométrico que relaciona los TKM con el PIB nacional.

El CE del subsector transporte de carga caminero se calcula como:

$$\text{Consumo por modo} = \frac{TKM}{\text{Tasa de carga} \times \text{Rendimiento}} \quad (2.26)$$

El consumo de energía (diésel) del subsector transporte ferroviario de carga se calcula de la siguiente forma:

$$\text{Consumo} = \frac{TKM}{\text{tasa de carga} \times \text{FdC}} \quad (2.27)$$

El factor de consumo (FdC) supuesto fue de 2.625 [t/convoy] y la tasa de carga considerada fue de 0,09 [km convoy/lt].

Se calcula el consumo energético del subsector transporte marítimo nacional según la ecuación 2.25 considerando un valor para la IE igual 0,139 [Mcal/TKM] el cual fue estimado a partir de los datos históricos de consumo de energía y TKM marítimo. La composición del tipo de combustible se supuso constante: petróleo combustible IFO180 (56 %) y diésel (44 %).

Por último, las emisiones del subsector transporte aéreo nacional se calculan de manera indirecta a partir de la proyección de la variable PKM. En este caso la variable PKM representa la demanda media anual por transporte aéreo de una persona, medida en kilómetros. La proyección se realiza utilizando un modelo econométrico que relaciona esta variable con el PIB per cápita. Se supone que los PKM aéreos a nivel nacional están mayoritariamente relacionados con el transporte de pasajeros (y no de carga). Se calcula el consumo energético (kerosene de aviación) según la ecuación 2.25, considerando un valor para la IE igual 0,84 [Mcal/pkm] el cual fue estimado a partir de los datos históricos de consumo de energía y PKM aéreos.

Las emisiones de GEI se obtienen como estipulan las directrices del IPCC, utilizando los factores de emisión ahí descritos como:

$$\text{Emisiones} = \text{Consumo energetico} \times \text{Factor emision} \quad (2.28)$$

Los resultados según escenario en MM CO₂eq se encuentran en la tabla 2.11.

2.5.3 INGEI del Ministerio de Medio Ambiente

El Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) es un informe bienal presentado por Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

Cuadro 2.11: Emisiones (MMtCO₂eq) sector transporte Proyecto MAPS-Chile

Escenarios	INGEI			
	2006	2013	2020	2030
PIB Medio	17,1	24,1	30,5	43,0
PIB Bajo	17,1	24,1	29,4	38,8
PIB Alto	17,1	24,2	31,4	47,1

(CMNUCC). Con la finalidad de informar de los avances en la implementación de los objetivos de la CMNUCC, en la COP16 de 2010 se definió que “los países en desarrollo deberán presentar a la Convención informes bienales de actualización, que contengan información actualizada sobre los inventarios” (Decisión 1, párrafo 60(c) del Informe de la Conferencia de las Partes sobre su 16o período de sesiones, 2011).

El INGEI de Chile fue elaborado siguiendo las Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Abarca todo el territorio nacional e incluye las emisiones y absorciones de CO₂ y las emisiones de CH₄, N₂O, HFC, PFC y SF₆ en una serie de tiempo que va desde 1990 a 2018.

Específicamente para el sector transporte, los métodos de nivel aplicados se encuentran en la tabla 2.12⁴.

Cuadro 2.12: Métodos de Nivel aplicados en el INGEI de Chile 1990-2018

Contaminante	Método aplicado	Factor de emisión
CO ₂	T1, IE, NE	D, IE, NE
CH ₄	T1, T2, IE	D, IE
N ₂ O	T1, T2, IE	D, IE

Las principales fuentes de información utilizadas en el sector Energía fueron datos de actividad y paramétricos provenientes, mayoritariamente, de los Balances Nacionales de Energía (BNE), estadísticas de parque vehicular para el transporte terrestre y factores de emisión por defecto. Adicionalmente para la desagregación de transporte terrestre y de transporte marítimo y aéreo se utiliza información del Instituto Nacional de Estadísticas (INE) y del Servicio Nacional de Aduana.

⁴T1: Nivel 1; T2: Nivel 2; IE: Incluida en otro lugar; NE: No estimada; D: Por defecto

Las emisiones de GEI totales estuvieron encabezadas por el CO₂, que representó el 78 %, seguido del CH₄ con el 13 % y del N₂O con el 6 %. Los gases fluorados contabilizan colectivamente el 3 % de las emisiones de GEI totales del país al 2018.

El sector Energía es el principal emisor nacional de GEI alcanzando un 77 % del total nacional e incrementando en 159 % en comparación con 1990 y de 1 % con 2016. El principal causante de la tendencia es el aumento sostenido en el consumo energético del país, incluyendo el consumo de carbón mineral y gas natural para la generación eléctrica y el consumo de combustibles líquidos para transporte terrestre - mayormente diésel y gasolina. Las principales subcategorías del sector Energía son las industrias de la energía con el 39 % de participación, seguida de un 33 % por la industria del Transporte, 18 % por las industrias manufactureras y de la construcción y por 9 % de otros sectores.

Cuadro 2.13: Emisiones [ktCO₂eq] del sector transporte, INGEI 2020

Año	Aviación civil	Transporte terrestre	Ferrocarriles	Navegación marítima	Otros	Total
1990	567,8	7.150,9	64,2	880,5	436,2	9.099,6
2000	682,7	14.218,3	63,8	1.079,0	1.150,7	17.194,6
2010	740,1	18.049,0	152,6	434,9	1.136,6	20.153,1
2013	998,5	21.174,2	151,0	889,2	1.139,8	24.352,7
2016	1.312,0	22.965,7	153,4	745,1	1.223,1	26.399,2
2017	1.420,7	23.716,6	148,4	817,2	1.230,8	27.333,6
2018	1.901,7	24.600,4	149,3	778,8	1.184,5	28.614,7

En 2018, las emisiones de GEI de la subcategoría transporte contabilizaron 28.614,7 ktCO₂eq, incrementándose en un 214,5 % desde 1990 y en un 8,4 % desde 2016. La principal causante del incremento sostenido en el tiempo es el crecimiento del parque automotor inducido por la expansión de la población, el mayor poder adquisitivo y el mejoramiento de la infraestructura vial en el país. Los principales subcomponentes corresponden a los automóviles y camiones para servicio pesado, quienes en conjunto superan el 70 % de las emisiones de esta componente a lo largo de la serie.

2.5.4 Estudio sobre mitigación de BC de CR2

En el contexto del Acuerdo de París, Chile ha revisado su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC). Bajo ese marco, el CR2, apoyó a la Oficina de Cambio Climático del Ministerio de Medio Ambiente (MMA) en el diseño, evaluación y justificación – mediante la implementación

de un enfoque metodológico — de una meta de reducción cuantificada de Carbono Negro (BC), integrable y consistente con la meta de reducción de gases de efecto invernadero.

El estudio “Mitigación de Carbono Negro en la actualización de la contribución nacionalmente determinada de Chile” tiene como objetivo evaluar la mitigación de gases de efecto invernadero para el periodo 2016-2050 utilizando *Long-Range Energy Alternatives Planning System - Integrated Benefits Calculator* (LEAP-IBC) mediante:

- Evaluación de medidas de mitigación de LLGG en términos de reducción de BC durante el periodo 2016-2050.
- Evaluación de medidas específicas de planes de descontaminación del aire con propuesta de un escenario transformacional.
- Esbozo de un sistema de monitoreo, reporte y verificación basado en iniciativas existentes.

El estudio define a las ciudades como escenario clave donde deben ocurrir la acción climática y los cambios transformacionales. En Chile, la fracción de población urbana es del 90 % y existen importantes problemas de calidad del aire en varias ciudades.

Los sectores para los cuales se realizaron las estimaciones de BC son:

1. Comercial, público y residencial
2. Consumo propio
3. Industria
4. Maquinaria fuera de ruta (MFR) con potencia < 560kW.
5. Minería
6. Transporte (terrestre)
7. Generación de electricidad

Además se realizan estimaciones para el sector marítimo, aéreo y para la maquinaria fuera de ruta con potencia mayor a 560kW, pero no se incluyen en las proyecciones porque no se contemplan en escenarios para mitigación de GEI.

Las emisiones de BC en el 2016 para los sectores 1 al 7 son de 10kton/a. El transporte, a través del consumo energético por tecnología vehicular considerando PKM y TKM, corresponde a 1,0 kton/a lo que representa un 28 % de de 75 Mton de CO₂eq y 10 % de 10kton/a de BC. Además, considerando la demanda energética según NDC 2019 de Chile las emisiones del sector aéreo y marítimo en el 2016 fueron de 0,1 y 0,9 kton/a, respectivamente.

LEAP-IBC es la herramienta de proyección de escenarios y evaluación de impactos utilizada por el estudio. LEAP permite calcular diferentes consumos o demandas energéticas y estimar emisiones en base a estos consumos o demandas, mientras que IBC es el complemento que incluye a los sectores no energéticos.

Los escenarios de mitigación determinados son:

1. Políticas actuales (considera políticas en implementación o fase de planificación)
2. Carbono neutralidad (proyección de emisiones GEI resultantes de medidas contempladas en NDC 2019)
3. Carbono neutralidad+ (agrega calefacción distrital y la aplicación de una norma de emisión más exigente que la actual para MFR).

Específicamente, las medidas contempladas en cada escenario se encuentran en la tabla 2.14. Las medidas consideradas en el tercer escenario enfatizan la heterogeneidad espacial y temporal de las emisiones de carbono negro y de sus impactos, y permiten abordar la pobreza energética y la inequidad ambiental. También llaman a la necesaria coordinación e integración de las políticas climáticas y de calidad de aire.

Cuadro 2.14: Medidas de mitigación de BC consideradas en cada escenario

Medida	Políticas actuales	Carbono neutralidad	Carbono neutralidad+
Estrategia de electromovilidad	X	X	X
Estándares viviendas nuevas	X	X	X
Electrificación en calefacción residencial		X	X
Sistemas solares térmicos en industrias y minería		X	X
Electrificación en usos motrices en industrias y minería		X	X
Calefacción distrital			X
Normativa maquinaria fuera de ruta			X

Al año 2030, los porcentajes de reducción con respecto al escenario de políticas actuales para los escenarios carbono neutralidad y carbono neutralidad + son, en el caso de carbono negro, de 13 % y 37 %, respectivamente. Al 2050, las reducciones alcanzan 49 % y 75 %, respectivamente. La tabla 2.15 muestra las emisiones anuales de carbono negro para los escenarios definidos por el estudio. Entre paréntesis, y con números en azul (verde) según la nomenclatura de la figura anterior, se muestran los porcentajes de reducción respecto del escenario de políticas actuales (del año 2016).

Cuadro 2.15: Emisiones anuales de BC en kton/a

Escenario	Año		
	2016	2030	2050
Políticas actuales	10,1	9,9 (-2 %)	13,0 (29 %)
Carbono neutralidad	10,1	8,7 (-12 %) (-14 %)	6,3 (-52 %) (-38 %)
Carbono neutralidad+	10,1	6,3 (-36 %) (-36 %)	3,2(-75 %) (-68 %)

El impacto del tercer escenario radica en que los sectores residencial y maquinaria fuera de ruta son predominantes para las emisiones de carbono negro.

El estudio define como recomendación que para evaluar los impactos sobre la salud de la población, se requiere - entre otros elementos - de un inventario nacional de alta resolución ($\approx 1[km^2]$), la realización y publicación de mediciones in situ y remotas, el uso herramientas de modelación de la dispersión de material particulado, incluyendo carbono negro y precursores, así como estudios epidemiológicos que permitan contextualizar los supuestos de las herramientas de evaluación de impactos. La combinación de estas herramientas permitirá un seguimiento más acucioso de la eficacia y eficiencia de las medidas de mitigación, así como también ponderar mejor los escenarios y estrategias.

En este capítulo, en primer lugar, se realizó un estudio de las diferentes metodologías de estimación de emisiones para los cuatro modos del transporte, acompañado de un análisis del comportamiento y factores relevantes que afectan la operación de cada categoría, con el fin de cumplir el objetivo general del trabajo en cuanto a analizar los factores de emisión en un nivel de detalle Tier 3. Por lo tanto, sobre la base de dicho estudio, se considerarán las siguientes metodologías por modo:

- Modo caminero: metodología EMEP/EEA Tier 3 con factores de emisión del software COPERT.
- Modo aéreo: metodología EMEP/EEA Tier 3A.
- Modo marítimo: metodología Entec UK, la cual coincide con la metodología tier 3 de EMEP/EEA basado en la potencia instalada, y factores de emisión SMED.
- Modo ferroviario: metodologías UIC (ESRS) y EIB.

Mediante los diferentes factores de emisión desagregados por tipo de combustible, tecnología y categorías descritas pertinentes a cada modo, se busca obtener factores de emisión y consumo energético representativos para cada modo y contaminante. Adicionalmente, sobre la base de este

estudio se generaran diferentes escenarios de proyección de emisiones para lo cual se realizarán las proyecciones de flota de cada modo según las perspectivas descritas y las normativas declaradas por el gobierno.

Se también estudiaron los proyectos en Chile que comparten el objetivo de contabilizar las emisiones de contaminantes. El proyecto STEP entrega la motivación para este trabajo y el marco bajo el cual se deberá generar la metodología, mientras que los demás estudios entregan una comparación en términos tanto de metodologías usadas - incluyendo medidas incluidas en las proyecciones - como en resultados.

Capítulo 3

Factores de Emisión y Consumo Energético

Las metodologías para la obtención de los factores de emisión y consumo energético varían según modo, como se describió en el capítulo 2. Sin embargo, los factores son utilizados en unidades de masa o energía por PKM y TKM en categorías definidas, según corresponda, debido a cómo se realizan las proyecciones econométricas de actividad. Por lo tanto, los factores para cada tipo de tecnología antes descritos se agrupan en las siguientes categorías:

1. Modo caminero:
 - (a) VLP: Vehículos Livianos Pasajeros
 - (b) VLC: Vehículos Livianos Comerciales
 - (c) TAX: Taxis
 - (d) BUS: Buses rígidos, articulados e interprovinciales
 - (e) CAM: Camiones livianos, medianos y pesados
 - (f) MOT: Motos
2. Modo aéreo:
 - (a) LTO: Fase Landing and Take-Off
 - (b) CCD: Fase Climb/Cruise/Descent
3. Modo marítimo:
 - (a) C: Crucero u océano
 - (b) M+P: Maniobras y en Puerto
4. Modo Ferroviario:
 - (a) Carga

(b) Pasajeros

Los contaminantes considerados para cada uno de los modos están en la figura 3.1. Los factores de consumo energético para los vehículos o naves cero emisiones en desarrollo o nuevos que aún no se encuentran en las metodologías seleccionadas fueron considerados como nulo por la falta de información disponible a la fecha para realizar la estimación.

Cuadro 3.1: Contaminantes considerados por modo

Modo	Categoría	Unidad	CO2	PM	NOx	CO	SOx	BC	NMVOC	CH4	N2O
Caminero		g/vkm	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	CCD	g/pkm	✓	✓	✓	✓		✓	✓		
Aéreo	LTO	g/pax	✓	✓	✓	✓		✓	✓		
	C	g/tkm	✓	✓	✓	✓	✓				
Marítimo	M+P	g/ton	✓	✓	✓	✓	✓				
	P	g/pkm	✓	✓	✓				✓		
Ferroviario	C	g/tkm	✓	✓	✓				✓		

A continuación se presenta la metodología llevada a cabo para la obtención de estos factores según modo:

3.1 Modo Caminero

Para la estimación de vehículos terrestres se utilizan los factores de emisión provistos por el programa COPERT 5.4 (versión mayo 2021) de la guía de inventario de emisiones de contaminantes atmosféricos EMEP/EEA 2019 sección 1.A.3.b.i-vi. De este programa se extraen las variables mediante las cuales se calculan los FE según la ecuación de COPERT (3.1) para cada combinación de segmento, norma, tecnología y ámbito. Además, se utilizan las velocidades (V) promedio por región y ámbito de la tabla 3.2.

$$FE[g/veh - km] = \frac{\alpha V^2 + \beta V + \gamma + \delta/V}{\epsilon V^2 + zV + \eta} * (1 - RF) \quad (3.1)$$

Las categorías utilizadas en este trabajo se establecen según las características de cada uno de los vehículos, basados en los respectivos decretos:

- DTO-55 16-ABR-1994 – “Normas de Emisión Aplicables a Vehículos Motorizados Pesados” (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2020)
- DTO-211 11-DIC-1991 – “Normas Sobre Emisiones de Vehículos Motorizados Livianos” (Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, 2020)

Cuadro 3.2: Velocidades para FE modo caminero

Región	Ámbito	Categoría	Velocidad [km/hr]
R1	Urbano	-	20
R2	Urbano	-	36
R3	Urbano	-	34
R4	Urbano	-	31
R5	Urbano	-	39
R6	Urbano	-	36
R7	Urbano	-	29
R8	Urbano	-	28
R9	Urbano	-	34
R10	Urbano	-	30
R11	Urbano	-	30
R12	Urbano	-	32
RM	Urbano	-	25
R14	Urbano	-	33
R15	Urbano	-	33
R16	Urbano	-	23
-	Interurbano	VL	100
-	Interurbano	BUS, CAM L/M	90
-	Interurbano	CAM PES	80

Con la descripción de cada una como:

- Vehículos livianos de pasajeros (VLP): Son todos los vehículos motorizados livianos diseñados principalmente para el transporte de personas. Se incluyen en esta definición, las camionetas livianas o furgones con un peso bruto menor a 2700 kg.
- Vehículos comerciales livianos (VLC): Son los vehículos motorizados livianos con un peso bruto menor a 2700 kg. diseñados para el transporte de carga o derivados de éstos.
- Taxi (TAX): Son todos los vehículos motorizados livianos diseñados principalmente para el transporte de personas con un peso bruto menor a 2700 kg. La diferencia con los VLP es que se consideran transporte público por lo que la tecnología aplicada es diferente.
- Camión Liviano (CAM LIV): Son los vehículos motorizados pesados con un peso bruto entre 3860 y 4536 kg.
- Camión Mediano (CAM MED): Son los vehículos motorizados pesados con un peso bruto entre 4537 y 6350 kg.
- Camión Pesado (CAM PES): Son los vehículos motorizados pesados con un peso bruto sobre 6350 kg.

- Bus Articulado (BUS ART): Autobús de dos o más secciones tipo módulo, en Chile utilizado en el transporte público.
- Bus Rígido (BUS RIG): Autobús de una sección, utilizado en el transporte público y privado.
- Bus Interurbano Provincial (BUS INT PROV): Autobús rígido que se desplaza solamente en recorridos interurbanos provinciales, solamente como servicio privado.

La norma chilena se rige principalmente por la norma europea, siendo las normas instauradas en Chile las siguientes:

- Pre-Euro (no catalítico o convencional) (1990-2030)
- Euro 1/I (1994-2030)
- Euro 2/II (1997-2040)
- Euro 3/III (2006-2050+)
- Euro 4/IV (2012-2050+)
- Euro 5/V (2014-2050+)
- Euro 6/VI (2022-2050+)
- Eléctrico

Las fechas presentadas en cada norma representan una estimación de la prevalencia en el parque vehicular de Chile. Además se agregaron las siguientes tecnologías de motorización:

- Híbrido gasolina o diésel (HYB G / HYB D)
- Híbrido gasolina o diésel plug-in (HYB PI G / HYB PI D)
- Gas licuado de petróleo (GLP)
- Gas natural comprimido (GNC)

La figura 3.1 muestra las categorías y características de cada una para las cuales fueron estimados los factores de emisión; considerando las diferentes categorías de motorización, ámbito y regiones, se calcularon 3400 factores por contaminante. El resumen de la correspondencia entre las categorías consideradas y el modelo COPERT se encuentra en la tabla 3.2.

De acuerdo a lo presentado en la guía EMEP/EEA, se consideraron los factores de degradación para los contaminantes VOC, CO y NO_x en las categorías VLP, VLC y TAX con normas E1 a E4 y motorización gasolina. Se aplicó el factor de degradación de forma gradual desde la introducción de la norma hasta que los vehículos tuviesen un kilometraje de aproximadamente 120.000 [km] para E1 y E2 y 160.000 [km] para E3 y E4 por lo que existe una distinción entre la

Modo Caminero				
VLP	VLC	TAX	BUS	CAM
No cat E1 E2 Diesel E3 E4 E5 E6 HYB PI D E6	No cat E1 E2 Diesel E3 E4 E5 E6 Gasolina E3 E4 E5 E6 Eléctrico -	No cat E1 E2 Gasolina E3 E4 E5 E6 HYB G E4 E5 E6 HYB PI G E6 Eléctrico -	BUS RIG No cat E1 Diesel E2 E3 E4 E5 E6 Eléctrico -	CAM LIV No cat E1 Diesel E2 E3 E4 E5 E6 Eléctrico -
No cat E1 E2 Gasolina E3 E4 E5 E6 HYB G E4 E5 E6 HYB PI G E6 Eléctrico -	MOT	No cat E1 E2 GLP E3 E4 E5 E6 GNC E4 E5 E6	BUS ART No cat E1 Diesel E2 E3 E4 E5 E6 Eléctrico -	CAM MED No cat E1 Diesel E2 E3 E4 E5 E6 Eléctrico -
	No cat E1 E2 Gasolina E3 E4 E5 E6 Eléctrico -		BUS INT PROV No cat E1 Diesel E2 E3 E4 E5 E6 Eléctrico -	CAM PES No cat E1 Diesel E2 E3 E4 E5 E6 Eléctrico -

VLP: Vehículos Livianos Particulares
 VLC: Vehículos Livianos Comerciales
 TAX: Taxis
 MOT: Motos
 BUS RIG: Bus Rígido
 BUS ART: Bus Articulado
 BUS INT PROV: Bus Interprovincial
 CAM LIV: Camión Liviano
 CAM MED: Camión Mediano
 CAM PES: Camión Pesado

Figura 3.1: Resumen de factores de emisión modo caminero

Región Metropolitana y el resto de las regiones según la fecha de introducción de las normas. Se presentan gráficos para NO_x y CO en la RM.

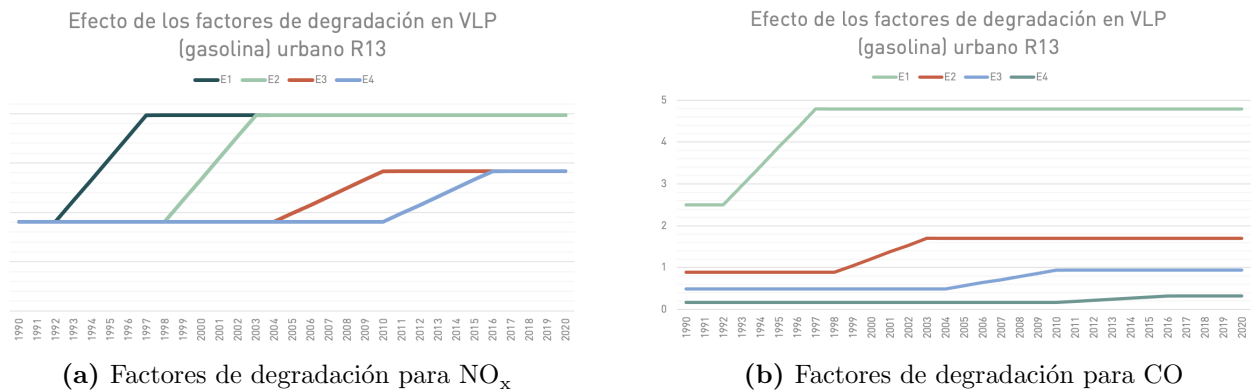


Figura 3.3: Factores de degradación para VLP urbano en la RM

Categoría			Segmento	Motorización	
Categoría	Código	COPERT	COPERT	Programa	COPERT
Vehículo Liviano Pasajeros / Taxi	VLP / TAX	Passenger cars	Medium	Gasolina	Petrol
			Medium	HYB- Gasolina	Petrol Hybrid
			Medium	HYB plug-in G	Petrol PHEV ~ Petrol
			Medium	Diesel	Diesel
			Medium	HYB - Diesel	-
			Large-SUV-Executive	HYB plug-in D	Diesel PHEV ~ Diesel
			Medium	Eléctrico	Petrol PHEV ~ Electricity
			Medium	GLP	LPG Bifuel ~ LPG
Vehículo Comercial Liviano	VLC	Light Commercial Vehicle	N1-II	Gasolina	Petrol
				Diesel	Diesel
Buses	BUS RIG	Buses	Urban Buses Standard 15 - 18 t	Diesel	Diesel
	BUS ART		Urban Buses Standard 15 - 18 t	GNC	CNG
	BUS INT PROV		Urban Buses Articulated >18 t	Diesel	Diesel
			Coaches Standard <=18 t	Diesel	Diesel
Camiones	CAM LIV		Rigid <=7,5 t	Diesel	Diesel
	CAM MED		Rigid 12 - 14 t	Diesel	Diesel
	CAM PES		Rigid 20 - 26 t	Diesel	Diesel
Motos	MOT	L-Category	Motorcycles 2-stroke >50 cm ³	Gasolina	Petrol

Figura 3.2: Correspondencia de categorías COPERT

3.1.1 Resultados modo caminero

En el modo caminero, los factores dependen de la velocidad promedio considerada para cada región, como se mencionó anteriormente. En las figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9¹ se presentan los resultados para dos regiones representativas (la Región Metropolitana y la Región de Valparaíso) y el ámbito interurbano. Las demás regiones se encuentran en el anexo adjunto. Cabe destacar que los valores obtenidos para la Región de Valparaíso son los menores dentro de los resultados del ámbito urbano debido a que la velocidad es la mayor entre los promedios considerados para las regiones (tabla 3.2) y la velocidad que implica una mayor eficiencia en el uso de combustible y, por lo tanto, menos emisiones de CO₂ por kilómetro recorrido se encuentra entre 70 y 90[km/hr] dependiendo del tipo de vehículo, encontrándose la V región así más cerca del punto óptimo que las demás regiones en el ámbito urbano. Por lo mismo, en el ámbito interurbano - para el que se utiliza una velocidad de 100[km/hr] para vehículos livianos - la eficiencia por kilómetro recorrido es aún mayor.

¹La norma Norm. 1 se refiere a una posible introducción de la norma Euro 7/VII, la que se estimó inicialmente como igual a Euro 6/VI.

		FE: VLP y TAX Urbano RM									
Motorización	Norma	CO2 [g/km]	CO [g/km]	CH4 [g/km]	SOx [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]	BC [g/km]	VOC [g/km]	EC [MJ/km]	
Diesel	No cat	238.15	0.85	0.0280	0.0075	0.6311	0.2713	0.0814	0.2259	3.21	
Diesel	E1	186.12	0.59	0.0110	0.0059	0.7603	0.0697	0.0209	0.0744	2.51	
Diesel	E2	198.84	0.52	0.0070	0.0063	0.8380	0.0577	0.0173	0.0502	2.68	
Diesel	E3	184.13	0.15	0.0030	0.0058	0.8298	0.0346	0.0104	0.0260	2.48	
Diesel	E4	184.13	0.15	0.0011	0.0058	0.6967	0.0337	0.0101	0.0194	2.48	
Diesel	E5	184.13	0.06	0.0001	0.0058	0.7260	0.0031	0.0009	0.0013	2.48	
Diesel	E6	184.13	0.02	0.0001	0.0058	0.0581	0.0023	0.0007	0.0013	2.48	
Diesel	Norm. 1	184.13	0.02	0.0001	0.0058	0.0581	0.0023	0.0007	0.0013	2.48	
HYB PI D	E6	196.92	0.02	0.0001	0.0062	0.2219	0.0023	0.0007	0.0013	2.65	
Gasolina	No cat	331.73	36.98	0.1310	0.0108	1.8775	0.0032	0.0010	3.2602	4.58	
Gasolina	E1	227.99	4.79	0.0260	0.0074	0.7331	0.0032	0.0010	0.5047	3.15	
Gasolina	E2	226.25	1.70	0.0170	0.0073	0.4374	0.0032	0.0010	0.2125	3.12	
Gasolina	E3	231.80	0.93	0.0030	0.0075	0.1304	0.0013	0.0004	0.0289	3.20	
Gasolina	E4	233.36	0.32	0.0029	0.0076	0.1119	0.0013	0.0004	0.0165	3.22	
Gasolina	E5	233.36	0.25	0.0029	0.0076	0.0359	0.0017	0.0005	0.0073	3.22	
Gasolina	E6	233.36	0.23	0.0029	0.0076	0.0359	0.0010	0.0003	0.0073	3.22	
Gasolina	Norm. 1	233.36	0.23	0.0029	0.0076	0.0359	0.0010	0.0003	0.0073	3.22	
HYB G	E4	102.99	0.08	0.0029	0.0033	0.0040	0.0013	0.0004	0.0013	1.42	
HYB G	E5	102.99	0.08	0.0029	0.0033	0.0040	0.0017	0.0005	0.0013	1.42	
HYB G	E6	102.99	0.08	0.0029	0.0033	0.0040	0.0010	0.0003	0.0013	1.42	
HYB PI G	E6	172.85	0.08	0.0029	0.0056	0.0040	0.0010	0.0003	0.0013	2.39	
GLP	No cat	178.39	4.51	0.0800	0.0064	1.9270	0.0032	0.0010	1.6246	2.75	
GLP	E1	169.32	1.98	0.0800	0.0061	0.3953	0.0032	0.0010	0.3966	2.61	
GLP	E2	169.32	1.35	0.0192	0.0061	0.1423	0.0032	0.0010	0.0937	2.61	
GLP	E3	169.32	0.49	0.0030	0.0061	0.0831	0.0013	0.0004	0.0201	2.61	
GLP	E4	169.32	0.17	0.0020	0.0061	0.0713	0.0013	0.0004	0.0115	2.61	
GLP	E5	169.32	0.17	0.0020	0.0061	0.0534	0.0013	0.0004	0.0115	2.61	
GLP	E6	169.32	0.17	0.0020	0.0061	0.0534	0.0013	0.0004	0.0115	2.61	
GLP	Norm. 1	169.32	0.17	0.0020	0.0061	0.0534	0.0013	0.0004	0.0115	2.61	
GNC	E4	184.20	0.17	0.0573	0.0076	0.0713	0.0013	0.0004	0.0466	3.22	
GNC	E5	184.20	0.17	0.0573	0.0076	0.0534	0.0013	0.0004	0.0466	3.22	
GNC	E6	184.20	0.17	0.0573	0.0076	0.0534	0.0013	0.0004	0.0466	3.22	
GNC	Norm. 1	184.20	0.17	0.0573	0.0076	0.0534	0.0013	0.0004	0.0466	3.22	
Eléctrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.63	

(a) Región Metropolitana

		FE: VLP y TAX Urbano R05									
Motorización	Norma	CO2 [g/km]	CO [g/km]	CH4 [g/km]	SOx [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]	BC [g/km]	VOC [g/km]	EC [MJ/km]	
Diesel	No cat	185.44	0.66	0.0280	0.0059	0.5256	0.2028	0.0608	0.1489	2.50	
Diesel	E1	153.05	0.43	0.0110	0.0048	0.6090	0.0573	0.0172	0.0539	2.06	
Diesel	E2	161.63	0.35	0.0070	0.0051	0.6587	0.0473	0.0142	0.0352	2.18	
Diesel	E3	156.30	0.10	0.0030	0.0049	0.7203	0.0295	0.0089	0.0184	2.11	
Diesel	E4	156.30	0.09	0.0011	0.0049	0.5475	0.0293	0.0088	0.0113	2.11	
Diesel	E5	156.30	0.05	0.0001	0.0049	0.6001	0.0024	0.0007	0.0010	2.11	
Diesel	E6	156.30	0.02	0.0001	0.0049	0.0480	0.0017	0.0005	0.0010	2.11	
Diesel	Norm. 1	156.30	0.02	0.0001	0.0049	0.0480	0.0017	0.0005	0.0010	2.11	
HYB PI D	E6	157.93	0.02	0.0001	0.0050	0.1834	0.0017	0.0005	0.0010	2.13	
Gasolina	No cat	253.86	28.15	0.1310	0.0082	2.1455	0.0032	0.0010	2.3956	3.51	
Gasolina	E1	184.43	3.45	0.0260	0.0060	0.6096	0.0032	0.0010	0.3596	2.55	
Gasolina	E2	180.53	1.28	0.0170	0.0059	0.3411	0.0032	0.0010	0.1435	2.49	
Gasolina	E3	186.61	0.99	0.0030	0.0061	0.1202	0.0013	0.0004	0.0214	2.58	
Gasolina	E4	193.56	0.37	0.0029	0.0063	0.0871	0.0013	0.0004	0.0170	2.67	
Gasolina	E5	193.56	0.24	0.0029	0.0063	0.0287	0.0015	0.0004	0.0062	2.67	
Gasolina	E6	193.56	0.22	0.0029	0.0063	0.0287	0.0009	0.0003	0.0062	2.67	
Gasolina	Norm. 1	193.56	0.22	0.0029	0.0063	0.0287	0.0009	0.0003	0.0062	2.67	
HYB G	E4	98.39	0.05	0.0029	0.0032	0.0098	0.0013	0.0004	0.0009	1.36	
HYB G	E5	98.39	0.05	0.0029	0.0032	0.0098	0.0015	0.0004	0.0009	1.36	
HYB G	E6	98.39	0.05	0.0029	0.0032	0.0098	0.0009	0.0003	0.0009	1.36	
HYB PI G	E6	138.69	0.05	0.0029	0.0045	0.0098	0.0009	0.0003	0.0009	1.92	
GLP	No cat	178.39	2.15	0.0800	0.0064	2.1876	0.0032	0.0010	1.1058	2.75	
GLP	E1	149.67	1.34	0.0800	0.0054	0.3429	0.0032	0.0010	0.2478	2.30	
GLP	E2	149.67	0.91	0.0192	0.0054	0.1235	0.0032	0.0010	0.0595	2.30	
GLP	E3	149.67	0.52	0.0030	0.0054	0.0766	0.0013	0.0004	0.0149	2.30	
GLP	E4	149.67	0.19	0.0020	0.0054	0.0555	0.0013	0.0004	0.0118	2.30	
GLP	E5	149.67	0.19	0.0020	0.0054	0.0416	0.0013	0.0004	0.0118	2.30	
GLP	E6	149.67	0.19	0.0020	0.0054	0.0416	0.0013	0.0004	0.0118	2.30	
GLP	Norm. 1	149.67	0.19	0.0020	0.0054	0.0416	0.0013	0.0004	0.0118	2.30	
GNC	E4	152.79	0.19	0.0573	0.0063	0.0555	0.0013	0.0004	0.0479	2.67	
GNC	E5	152.79	0.19	0.0573	0.0063	0.0416	0.0013	0.0004	0.0479	2.67	
GNC	E6	152.79	0.19	0.0573	0.0063	0.0416	0.0013	0.0004	0.0479	2.67	
GNC	Norm. 1	152.79	0.19	0.0573	0.0063	0.0416	0.0013	0.0004	0.0479	2.67	
Eléctrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.57	

(b) Región de Valparaíso

Figura 3.4: Factores de emisión para vehículos de pasajeros livianos y taxis

		FE: VLC Urbano RM									
Motorización	Norma	CO2 [g/km]	CO [g/km]	CH4 [g/km]	SOx [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]	BC [g/km]	VOC [g/km]	EC [MJ/km]	
Diesel	No cat	303.85	1.31	0.0280	0.0096	2.6609	0.2814	0.0844	0.1561	4.09	
Diesel	E1	276.20	0.57	0.0110	0.0087	1.3801	0.0992	0.0298	0.1561	3.72	
Diesel	E2	276.20	0.57	0.0070	0.0087	1.3801	0.0992	0.0298	0.1561	3.72	
Diesel	E3	276.20	0.46	0.0030	0.0087	1.1593	0.0665	0.0199	0.0968	3.72	
Diesel	E4	276.20	0.37	0.0011	0.0087	0.9385	0.0347	0.0104	0.0359	3.72	
Diesel	E5	254.06	0.00	0.0000	0.0080	1.2408	0.0016	0.0005	0.0002	3.42	
Diesel	E6	254.06	0.00	0.0000	0.0080	0.0931	0.0016	0.0005	0.0002	3.42	
Diesel	Norm. 1	254.06	0.00	0.0000	0.0080	0.0931	0.0016	0.0005	0.0002	3.42	
Gasolina	No cat	335.09	26.86	0.1310	0.0109	2.4022	0.0032	0.0010	2.9715	4.63	
Gasolina	E1	392.34	16.13	0.0260	0.0127	1.0740	0.0032	0.0010	0.6378	5.42	
Gasolina	E2	392.34	9.84	0.0170	0.0127	0.3652	0.0032	0.0010	0.1531	5.42	
Gasolina	E3	392.34	6.03	0.0030	0.0127	0.1610	0.0013	0.0004	0.0449	5.42	
Gasolina	E4	392.34	3.25	0.0020	0.0127	0.0766	0.0013	0.0004	0.0192	5.42	
Gasolina	E5	223.21	0.47	0.0020	0.0072	0.0235	0.0008	0.0002	0.0072	3.08	
Gasolina	E6	223.21	0.47	0.0020	0.0072	0.0235	0.0004	0.0001	0.0072	3.08	
Gasolina	Norm. 1	223.21	0.47	0.0020	0.0072	0.0235	0.0004	0.0001	0.0072	3.08	
Eléctrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	

(a) Región Metropolitana

		FE: VLC Urbano R05									
Motorización	Norma	CO2 [g/km]	CO [g/km]	CH4 [g/km]	SOx [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]	BC [g/km]	VOC [g/km]	EC [MJ/km]	
Diesel	No cat	246.26	1.13	0.0280	0.0078	1.7274	0.2845	0.0854	0.1321	3.32	
Diesel	E1	221.24	0.40	0.0110	0.0070	1.1507	0.0711	0.0213	0.1321	2.98	
Diesel	E2	221.24	0.40	0.0070	0.0070	1.1507	0.0711	0.0213	0.1321	2.98	
Diesel	E3	221.24	0.33	0.0030	0.0070	0.9666	0.0477	0.0143	0.0819	2.98	
Diesel	E4	221.24	0.26	0.0011	0.0070	0.7825	0.0249	0.0075	0.0304	2.98	
Diesel	E5	216.02	0.00	0.0000	0.0068	1.1460	0.0012	0.0004	0.0002	2.91	
Diesel	E6	216.02	0.00	0.0000	0.0068	0.0860	0.0012	0.0004	0.0002	2.91	
Diesel	Norm. 1	216.02	0.00	0.0000	0.0068	0.0860	0.0012	0.0004	0.0002	2.91	
Gasolina	No cat	264.97	15.57	0.1310	0.0086	2.6528	0.0032	0.0010	1.9401	3.66	
Gasolina	E1	310.61	4.42	0.0260	0.0101	0.4298	0.0032	0.0010	0.2256	4.29	
Gasolina	E2	310.61	5.17	0.0170	0.0101	0.3215	0.0032	0.0010	0.1078	4.29	
Gasolina	E3	310.61	3.17	0.0030	0.0101	0.1417	0.0013	0.0004	0.0316	4.29	
Gasolina	E4	310.61	1.71	0.0020	0.0101	0.0675	0.0013	0.0004	0.0135	4.29	
Gasolina	E5	175.33	0.41	0.0020	0.0057	0.0195	0.0011	0.0003	0.0062	2.42	
Gasolina	E6	175.33	0.41	0.0020	0.0057	0.0195	0.0005	0.0002	0.0062	2.42	
Gasolina	Norm. 1	175.33	0.41	0.0020	0.00						

		FE: MOT Urbano RM										
Motorización	Norma	CO2	CO	CH4	SOx	NOx	PM	BC	VOC	N2O	EC	
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[MJ/km]
Gasolina	No cat	109.04	17.24	0.1500	0.0035	0.0237	0.2000	0.0400	12.1600	0.0020	1.51	
Gasolina	E1	100.63	11.37	0.0990	0.0033	0.0388	0.0800	0.0240	3.8429	0.0020	1.39	
Gasolina	E2	100.63	9.00	0.0300	0.0033	0.0424	0.0400	0.0120	2.0426	0.0020	1.39	
Gasolina	E3	58.33	2.78	0.0120	0.0019	0.0560	0.0120	0.0036	0.8075	0.0020	0.81	
Gasolina	E4	57.91	2.14	0.0120	0.0019	0.0522	0.0120	0.0036	0.7324	0.0020	0.80	
Gasolina	E5	57.91	1.81	0.0120	0.0019	0.0343	0.0120	0.0036	0.4309	0.0020	0.80	
Gasolina	E5	57.91	1.81	0.0120	0.0019	0.0343	0.0120	0.0036	0.4309	0.0020	0.80	
Eléctrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	

(a) Región Metropolitana

		FE: MOT Urbano R05										
Motorización	Norma	CO2	CO	CH4	SOx	NOx	PM	BC	VOC	N2O	EC	
		[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[MJ/km]
Gasolina	No cat	86.42	15.58	0.1500	0.0028	0.0268	0.2000	0.0600	8.5554	0.0020	1.19	
Gasolina	E1	79.76	10.28	0.0990	0.0026	0.0402	0.0800	0.0240	2.6435	0.0020	1.10	
Gasolina	E2	79.76	8.13	0.0300	0.0026	0.0468	0.0400	0.0120	1.4042	0.0020	1.10	
Gasolina	E3	48.00	2.04	0.0120	0.0016	0.0450	0.0120	0.0036	0.6564	0.0020	0.66	
Gasolina	E4	47.43	1.87	0.0120	0.0015	0.0567	0.0120	0.0036	0.6872	0.0020	0.66	
Gasolina	E5	47.43	2.38	0.0120	0.0015	0.0374	0.0120	0.0036	0.4044	0.0020	0.66	
Gasolina	E5	47.43	2.38	0.0120	0.0015	0.0374	0.0120	0.0036	0.4044	0.0020	0.66	
Eléctrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00	

(b) Región de Valparaíso

Figura 3.6: Factores de emisión para motos

		FE: BUS Urbano RM										
Categoría	Motorización	Norma	CO2	CO	CH4	SOx	NOx	PM	BC	VOC	N2O	EC
			[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[MJ/km]
BUS RIG	Diesel	No cat	1188.70	5.45	0.1750	0.0376	16.4762	0.7669	0.2301	1.9265	0.0300	16.01
BUS RIG	Diesel	E1	1005.19	2.49	0.1750	0.0318	10.1437	0.4116	0.1235	0.7748	0.0120	13.54
BUS RIG	Diesel	E2	969.21	2.22	0.1138	0.0306	11.0006	0.1973	0.0592	0.5321	0.0120	13.06
BUS RIG	Diesel	E3	1016.76	2.47	0.1033	0.0322	9.5710	0.1949	0.0585	0.4949	0.0060	13.70
BUS RIG	Diesel	E4	947.16	1.20	0.0053	0.0300	6.0054	0.0486	0.0146	0.0681	0.0128	12.76
BUS RIG	Diesel	E5	909.57	2.41	0.0053	0.0288	6.9402	0.0561	0.0168	0.0314	0.0332	12.25
BUS RIG	Diesel	E4	938.46	0.25	0.0053	0.0297	0.4570	0.0056	0.0017	0.0415	0.0415	12.44
BUS RIG	Diesel	Norm. 1	938.46	0.25	0.0053	0.0297	0.4570	0.0056	0.0017	0.0415	0.0415	12.44
BUS RIG	Eléctrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	5.19
BUS ART	Diesel	No cat	1479.36	6.99	0.1750	0.0468	20.9208	0.9574	0.2872	2.0662	0.0300	19.93
BUS ART	Diesel	E1	1276.99	3.31	0.1750	0.0404	12.9000	0.5124	0.1537	0.8406	0.0120	17.20
BUS ART	Diesel	E2	1236.19	3.02	0.1138	0.0391	13.6601	0.2651	0.0795	0.5689	0.0120	16.65
BUS ART	Diesel	E3	1287.45	3.23	0.1033	0.0407	11.9141	0.2399	0.0720	0.5252	0.0060	17.34
BUS ART	Diesel	E4	1220.84	1.48	0.0053	0.0386	7.8385	0.0603	0.0181	0.0832	0.0128	16.45
BUS ART	Diesel	E5	1167.12	3.05	0.0053	0.0369	6.5750	0.0677	0.0203	0.0373	0.0332	15.72
BUS ART	Diesel	E6	1196.21	0.25	0.0053	0.0378	0.4112	0.0063	0.0019	0.0463	0.0415	16.11
BUS ART	Diesel	Norm. 1	1196.21	0.25	0.0053	0.0378	0.4112	0.0063	0.0019	0.0463	0.0415	16.11
BUS ART	Eléctrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	6.40

(a) Región Metropolitana

		FE: BUS Urbano R05										
Categoría	Motorización	Norma	CO2	CO	CH4	SOx	NOx	PM	BC	VOC	N2O	EC
			[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[MJ/km]
BUS RIG	Diesel	No cat	933.01	3.87	0.1750	0.0295	13.4326	0.5303	0.1591	1.2311	0.0300	12.57
BUS RIG	Diesel	E1	805.54	1.87	0.1750	0.0255	8.2373	0.2988	0.0896	0.5246	0.0120	10.85
BUS RIG	Diesel	E2	786.95	1.54	0.1138	0.0249	8.7688	0.1591	0.0477	0.3579	0.0120	10.60
BUS RIG	Diesel	E3	823.79	1.63	0.1033	0.0260	7.0779	0.1494	0.0449	0.3255	0.0060	11.10
BUS RIG	Diesel	E4	792.40	0.85	0.0053	0.0251	4.7527	0.0376	0.0113	0.0517	0.0128	10.67
BUS RIG	Diesel	E5	742.50	1.68	0.0053	0.0235	4.0899	0.0428	0.0128	0.0232	0.0332	10.00
BUS RIG	Diesel	E6	764.81	0.18	0.0053	0.0242	0.2841	0.0040	0.0012	0.0300	0.0415	10.30
BUS RIG	Diesel	Norm. 1	764.81	0.18	0.0053	0.0242	0.2841	0.0040	0.0012	0.0300	0.0415	10.30
BUS RIG	Eléctrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	3.48
BUS ART	Diesel	No cat	1178.88	5.12	0.1750	0.0373	17.2327	0.6870	0.2061	1.2816	0.0300	15.88
BUS ART	Diesel	E1	1035.28	2.45	0.1750	0.0327	10.4868	0.3839	0.1152	0.5777	0.0120	13.95
BUS ART	Diesel	E2	1018.47	2.03	0.1138	0.0322	10.9764	0.2138	0.0641	0.3996	0.0120	13.72
BUS ART	Diesel	E3	1053.20	2.11	0.1033	0.0333	8.9419	0.1728	0.0518	0.3534	0.0060	14.19
BUS ART	Diesel	E4	1040.65	1.05	0.0053	0.0329	6.2463	0.0454	0.0136	0.0636	0.0128	14.02
BUS ART	Diesel	E5	943.65	2.07	0.0053	0.0305	3.5380	0.0503	0.0151	0.0278	0.0332	12.98
BUS ART	Diesel	E6	985.58	0.16	0.0053	0.0312	0.2929	0.0044	0.0014	0.0336	0.0415	13.28
BUS ART	Diesel	Norm. 1	985.58	0.16	0.0053	0.0312	0.2929	0.0044	0.0014	0.0336	0.0415	13.28
BUS ART	Eléctrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00

(b) Región de Valparaíso

Figura 3.7: Factores de emisión para buses

		FE: CAM Urbano RM										
Categoría	Motorización	Norma	CO2	CO	CH4	SOx	NOx	PM	BC	VOC	N2O	EC
			[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[g/km]	[MJ/km]
CAM LIV	Diesel	No cat	456.98	2.57	0.0850	0.0145	4.6377	0.4004	0.1201	1.7004	0.0300	6.16
CAM LIV	Diesel	E1	377.15	0.88	0.0850	0.0119	3.2558	0.1573	0.0472	0.3218	0.0060	5.08
CAM LIV	Diesel	E2	353.35	0.66	0.0544	0.0112	3.6036	0.0692	0.0208	0.2186	0.0050	4.76
CAM LIV	Diesel	E3	379.07	0.87	0.0476	0.0120	2.9282	0.0823	0.0247	0.2075	0.0030	5.11
CAM LIV	Diesel	E4	353.90	0.43	0.0026	0.0112	1.9179	0.0169	0.0051	0.0270	0.0060	4.77
CAM LIV	Diesel	E5	333.69	0.72	0.0026	0.0106	2.8198	0.0208	0.0062	0.0130	0.0150	4.50
CAM LIV	Diesel	E6	343.62	0.09	0.0026	0.0109	0.3119	0.0023	0.0007	0.0170	0.0185	4.63
CAM LIV	Diesel	Norm. 1	343.62	0.09	0.0026	0.0109	0.3119	0.0023	0.0007	0.0170	0.0185	4.63
CAM LIV	Eléctrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
CAM MED	Diesel	No cat	759.41	3.24	0.0850	0.0240	10.2243	0.4522	0.1357	1.3456	0.0300	10.23
CAM MED	Diesel	E1	640.15	1.53	0.0850	0.0202	6.1679	0.2803	0.0841	0.5529	0.0110	8.62
CAM MED	Diesel	E2	608.27	1.23	0.0544	0.0192	6.7776	0.1278	0.0383	0.3479	0.0110	8.19
CAM MED	Diesel	E3	645.27	1.58	0.0476	0.0204	5.6578	0.1410	0.0423	0.3447	0.0050	8.49
CAM MED	Diesel	E4	597.03	0.76	0.0026	0.0189	3.6812	0.0295	0.0089	0.0432	0.0112	8.04
CAM MED	Diesel	E5	578.39	1.36	0.0026	0.0183	5.1561	0.0366	0.0110	0.0217	0.0298	7.79
CAM MED	Diesel	E6	591.72	0.14	0.0026	0.0187	0.3719	0.0040	0.0012	0.0295	0.0370	7.97
CAM MED	Diesel	Norm. 1	591.72	0.14	0.0026	0.0187	0.3719	0.0040	0.0012	0.0295	0.0370	7.97
CAM MED	Eléctrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
CAM PES	Diesel	No cat	1228.56	3.27	0.1750	0.0388	14.4707	0.6181	0.1854	1.1032	0.0300	16.55
CAM PES	Diesel	E1	1036.87	2.60	0.1750	0.0328	10.2739	0.5052	0.1516	0.9576	0.0110	13.97
CAM PES	Diesel	E2	993.44	2.11	0.1120	0.0314	11.2517	0.2213	0.0664			

FE: VLP Interurbano RM										
Motorización	Norma	CO2 [g/km]	CO [g/km]	CH4 [g/km]	SOx [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]	BC [g/km]	VOC [g/km]	EC [MJ/km]
Diesel	No cat	158.76	0.38	0.0080	0.0050	0.5280	0.1700	0.0510	0.0616	2.14
Diesel	E1	153.33	0.36	0.0030	0.0048	0.6638	0.1068	0.0320	0.0455	2.07
Diesel	E2	154.52	0.06	0.0020	0.0049	0.6643	0.0506	0.0152	0.0265	2.08
Diesel	E3	144.39	0.02	0.0000	0.0046	0.7481	0.0447	0.0134	0.0087	1.95
Diesel	E4	144.39	0.03	0.0000	0.0046	0.5760	0.0259	0.0078	0.0058	1.95
Diesel	E5	144.39	0.01	0.0000	0.0046	0.5422	0.0015	0.0005	0.0007	1.95
Diesel	E6	144.39	0.01	0.0000	0.0046	0.0434	0.0010	0.0003	0.0007	1.95
Diesel	Norm. 1	144.39	0.01	0.0000	0.0046	0.0434	0.0010	0.0003	0.0007	1.95
HYB P I D	E6	184.96	0.01	0.0000	0.0058	0.1657	0.0010	0.0003	0.0007	2.49
Gasolina	No cat	242.34	16.21	0.0410	0.0079	3.1300	0.0019	0.0006	1.2475	3.35
Gasolina	E1	163.44	1.77	0.0140	0.0053	0.8708	0.0019	0.0006	0.1104	2.26
Gasolina	E2	158.68	0.75	0.0110	0.0050	0.3392	0.0019	0.0006	0.0420	2.14
Gasolina	E3	164.10	1.15	0.0040	0.0054	0.0523	0.0012	0.0004	0.0255	2.32
Gasolina	E4	175.32	0.53	0.0051	0.0057	0.0193	0.0012	0.0004	0.0172	2.42
Gasolina	E5	175.32	0.44	0.0051	0.0057	0.0136	0.0013	0.0004	0.0067	2.42
Gasolina	E6	175.32	0.37	0.0051	0.0057	0.0136	0.0008	0.0002	0.0067	2.42
Gasolina	Norm. 1	175.32	0.37	0.0051	0.0057	0.0136	0.0008	0.0002	0.0067	2.42
HYB G	E4	121.71	0.02	0.0051	0.0039	0.0178	0.0012	0.0004	0.0008	1.68
HYB G	E5	121.71	0.02	0.0051	0.0039	0.0178	0.0013	0.0004	0.0008	1.68
HYB G	E6	121.71	0.02	0.0051	0.0039	0.0178	0.0008	0.0002	0.0008	1.68
HYB P I G	E6	160.88	0.02	0.0051	0.0052	0.0178	0.0008	0.0002	0.0008	2.22
GLP	No cat	178.39	9.72	0.0250	0.0064	2.8609	0.0019	0.0006	0.4897	2.75
GLP	E1	163.65	3.56	0.0250	0.0059	0.2978	0.0019	0.0006	0.0831	2.52
GLP	E2	163.65	2.42	0.0060	0.0059	0.1072	0.0019	0.0006	0.0199	2.52
GLP	E3	163.65	1.15	0.0040	0.0059	0.0523	0.0012	0.0004	0.0255	2.52
GLP	E4	163.65	0.53	0.0013	0.0059	0.0193	0.0012	0.0004	0.0172	2.52
GLP	E5	163.65	0.53	0.0013	0.0059	0.0145	0.0012	0.0004	0.0172	2.52
GLP	E6	163.65	0.53	0.0013	0.0059	0.0145	0.0012	0.0004	0.0172	2.52
GLP	Norm. 1	163.65	0.53	0.0013	0.0059	0.0145	0.0012	0.0004	0.0172	2.52
GNC	E4	138.38	0.53	0.0434	0.0057	0.0193	0.0012	0.0004	0.0697	2.42
GNC	E5	138.38	0.53	0.0434	0.0057	0.0145	0.0012	0.0004	0.0697	2.42
GNC	E6	138.38	0.53	0.0434	0.0057	0.0145	0.0012	0.0004	0.0697	2.42
GNC	Norm. 1	138.38	0.53	0.0434	0.0057	0.0145	0.0012	0.0004	0.0697	2.42
Electrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.87

(a) Vehículos Livianos Pasajeros

FE: CAM Interurbano												
Categoría	Motorización	Norma	CO2 [g/km]	CO [g/km]	CH4 [g/km]	SOx [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]	BC [g/km]	VOC [g/km]	N2O [g/km]	EC [MJ/km]
CAM LIV	Diesel	No cat	368.91	1.31	0.0200	0.0117	4.7675	0.2088	0.0627	0.4999	0.0300	4.97
CAM LIV	Diesel	E1	352.93	0.58	0.0200	0.0112	3.6025	0.0905	0.0271	0.1172	0.0030	4.75
CAM LIV	Diesel	E2	342.64	0.46	0.0186	0.0108	3.6495	0.0661	0.0198	0.0764	0.0030	4.62
CAM LIV	Diesel	E3	361.21	0.44	0.0182	0.0114	2.9758	0.0393	0.0118	0.0673	0.0020	4.87
CAM LIV	Diesel	E4	369.36	0.26	0.0012	0.0117	1.9262	0.0154	0.0046	0.0169	0.0058	4.98
CAM LIV	Diesel	E5	387.15	0.58	0.0012	0.0122	0.8982	0.0136	0.0041	-0.0080	0.0172	5.22
CAM LIV	Diesel	E6	388.41	0.02	0.0012	0.0123	0.0060	0.0016	0.0005	0.0076	0.0150	5.23
CAM LIV	Diesel	Norm. 1	388.41	0.02	0.0012	0.0123	0.0060	0.0016	0.0005	0.0076	0.0150	5.23
CAM LIV	Electrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
CAM MED	Diesel	No cat	510.53	1.65	0.0200	0.0161	7.9072	0.2330	0.0699	0.4623	0.0300	6.88
CAM MED	Diesel	E1	463.24	0.86	0.0200	0.0146	4.7332	0.1472	0.0442	0.2103	0.0070	6.24
CAM MED	Diesel	E2	451.49	0.80	0.0186	0.0143	4.9436	0.1140	0.0342	0.1370	0.0060	6.08
CAM MED	Diesel	E3	466.33	0.83	0.0182	0.0147	3.4905	0.0710	0.0213	0.1221	0.0040	6.28
CAM MED	Diesel	E4	463.75	0.40	0.0012	0.0147	2.5818	0.0206	0.0042	0.0243	0.0114	6.25
CAM MED	Diesel	E5	408.29	0.82	0.0012	0.0129	2.6353	0.0223	0.0047	0.0106	0.0336	5.50
CAM MED	Diesel	E6	418.07	0.27	0.0012	0.0132	0.0763	0.0018	0.0005	0.0134	0.0290	5.63
CAM MED	Diesel	Norm. 1	418.07	0.27	0.0012	0.0132	0.0763	0.0018	0.0005	0.0134	0.0290	5.63
CAM MED	Electrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00
CAM PES	Diesel	No cat	704.73	1.71	0.0700	0.0223	9.1138	0.3194	0.0958	0.4064	0.0300	9.49
CAM PES	Diesel	E1	620.67	1.44	0.0700	0.0196	6.4683	0.2308	0.0692	0.3802	0.0070	8.36
CAM PES	Diesel	E2	607.95	1.39	0.0651	0.0192	6.9466	0.1564	0.0469	0.2479	0.0060	8.19
CAM PES	Diesel	E3	620.24	1.40	0.0637	0.0196	5.5451	0.1131	0.0339	0.2250	0.0040	8.36
CAM PES	Diesel	E4	610.34	0.63	0.0042	0.0193	3.9674	0.0282	0.0085	0.0345	0.0114	8.22
CAM PES	Diesel	E5	577.50	1.26	0.0042	0.0183	1.5066	0.0347	0.0104	0.0170	0.0336	7.78
CAM PES	Diesel	E6	587.50	0.11	0.0042	0.0186	0.1220	0.0030	0.0009	0.0228	0.0290	7.91
CAM PES	Diesel	Norm. 1	587.50	0.11	0.0042	0.0186	0.1220	0.0030	0.0009	0.0228	0.0290	7.91
CAM PES	Electrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00

(b) Camiones

FE: VLC Interurbano										
Motorización	Norma	CO2 [g/km]	CO [g/km]	CH4 [g/km]	SOx [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]	BC [g/km]	VOC [g/km]	EC [MJ/km]
Diesel	No cat	301.77	1.27	0.0080	0.0095	1.3934	0.3553	0.1066	0.1072	4.06
Diesel	E1	268.84	1.25	0.0030	0.0085	1.2537	0.1547	0.0464	0.1897	3.62
Diesel	E2	268.84	1.25	0.0020	0.0085	1.2537	0.1547	0.0464	0.1897	3.62
Diesel	E3	268.84	0.58	0.0000	0.0085	1.0531	0.1036	0.0311	0.0665	3.62
Diesel	E4	268.84	0.46	0.0000	0.0085	0.8525	0.0541	0.0162	0.0247	3.62
Diesel	E5	226.55	0.00	0.0000	0.0072	1.7076	0.0008	0.0003	0.0001	3.05
Diesel	E6	226.55	0.00	0.0000	0.0072	1.1282	0.0008	0.0003	0.0001	3.05
Diesel	Norm. 1	226.55	0.00	0.0000	0.0072	1.1282	0.0008	0.0003	0.0001	3.05
Gasolina	No cat	201.61	16.87	0.0410	0.0065	3.7447	0.0019	0.0006	0.5434	2.78
Gasolina	E1	237.24	3.98	0.0140	0.0077	0.9847	0.0019	0.0006	0.0762	3.28
Gasolina	E2	237.24	2.43	0.0110	0.0077	0.3348	0.0019	0.0006	0.0183	3.28
Gasolina	E3	237.24	2.07	0.0040	0.0077	0.1094	0.0012	0.0004	0.0107	3.28
Gasolina	E4	237.24	1.11	0.0000	0.0077	0.0521	0.0012	0.0004	0.0046	3.28
Gasolina	E5	151.26	0.92	0.0000	0.0049	0.0121	0.0037	0.0011	0.0090	2.09
Gasolina	E6	151.26	0.92	0.0000	0.0049	0.0121	0.0018	0.0006	0.0090	2.09
Gasolina	Norm. 1	151.26	0.92	0.0000	0.0049	0.0121	0.0018	0.0006	0.0090	2.09
Electrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00

(c) Vehículos Livianos Comercial

FE: BUS INT PROV Interurbano											
Motorización	Norma	CO2 [g/km]	CO [g/km]	CH4 [g/km]	SOx [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]	BC [g/km]	VOC [g/km]	N2O [g/km]	EC [MJ/km]
Diesel	No cat	606.42	1.25	0.0700	0.0192	8.0168	0.2491	0.0747	0.3445	0.0300	8.17
Diesel	E1	561.60	1.09	0.0700	0.0178	6.0281	0.1905	0.0572	0.3561	0.0070	7.57
Diesel	E2	563.68	1.07	0.0455	0.0178	6.6645	0.1150	0.0345	0.2422	0.0600	7.59
Diesel	E3	600.69	1.24	0.0413	0.0190	5.2088	0.1054	0.0316	0.2446	0.0040	8.09
Diesel	E4	601.98	0.65	0.0021	0.0190	3.7416	0.0285	0.0086	0.0359	0.0114	8.11
Diesel	E5	594.37	1.13	0.0021	0.0188	1.7245	0.0342	0.0103	0.0184	0.0336	8.01
Diesel	E6	598.07	0.13	0.0021	0.0189	0.1214	0.0032	0.0010	0.0242	0.0290	8.06
Diesel	Norm. 1	598.07	0.13	0.0021	0.0189	0.1214	0.0032	0.0010	0.0242	0.0290	8.06
Electrico		0.00	0.00	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.00

(d) Buses

FE: MOT Interurbano											
Motorización	Norma	CO2 [g/km]	CO [g/km]	CH4 [g/km]	SOx [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]	BC [g/km]	VOC [g/km]	EC [MJ/km]	
Gasolina	No cat	124.86	28.80	0.1500	0.0040	0.0438	0.2000	0.0600	9.9249	0.0020	1.72
Gasolina	E1	115.23	19.00	0.0975	0.0037	0.0604	0.0800	0.0240	4.2285	0.0020	1.59
Gasolina	E2	115.23	15.03	0.0300	0.0037	0.0726	0.0400	0.0120	2.2437	0.0020	1.59
Gasolina	E3	65.71	13.71	0.0120	0.0021	0.0690	0.0120	0.0036	1.7722	0.0020	0.91
Gasolina	E4	66.59	12.48	0.0120	0.0022	0.0615	0.0120	0.0036	1.5124	0.0020	0.92
Gasolina	E5	66.59	10.42	0.0120	0.0022	0.0408					

3.2 Modo Aéreo

Las categorías de factores de emisión estimados para el modo aéreo se encuentran en la tabla 3.10. Se generan 24 factores de emisión para cada uno de los seis contaminantes considerados.

Aéreo		
Pasajeros		
Modelo	Combustible	Actividad
A320	Kerosene	CCD
		LTO
A320neo	Kerosene	CCD
		LTO
A321	Kerosene	CCD
		LTO
A321neo	Kerosene	CCD
		LTO
A319	Kerosene	CCD
		LTO
B763	Kerosene	CCD
		LTO
B788	Kerosene	CCD
		LTO
B789	Kerosene	CCD
		LTO
AZEROe	HYB Eléctrico H2	CCD
		LTO
Otros	Kerosene	CCD
		LTO

Figura 3.10: Resumen de factores de emisión modo aéreo

Como se mencionó en la sección 2.2, los factores de emisiones para el modo aéreo se encuentran diferenciados en Landing and Take-Off (LTO) y Climb/Cruise/Descent (CCD) para los diferentes modelos de aeronaves según motor utilizado en las planillas de cálculo anexas a la metodología EMEP/EEA. Esto hace referencia a la etapa del vuelo y la altitud de la aeronave. Los primeros factores se entregan en unidades de [kg] por vuelo y se consideró una etapa de *Landing and Take-Off* promedio determinada por la OACI de 32 minutos 54 segundos para todos los modelos incluidos. Los factores CCD varían según la distancia recorrida por el vuelo, por lo que son entregados en tablas con diferentes distancias sobre las cuales se debe interpolar para encontrar el factor en [kg] para cada vuelo. Se presentan como ejemplo los factores para el avión A320 en la tabla 3.3.

Para la determinación de los factores de emisión y consumo energético de cada modelo se utilizó la Bitácora de Actividades de la DGAC de 2015 como base. En esta se detallan los movimientos de cada tipo de aeronave para determinados aeropuerto, catalogado según su respectivo código OACI. La bitácora abarca 44 aeropuertos y aeródromos, 335 aeronaves y contiene un total de 444.721 movimientos, actividades que corresponden al periodo desde el 31 de diciembre del 2014 hasta el 31 de diciembre del 2015. Específicamente, la base de datos contiene la información mostrada en la tabla 3.4 a continuación:

Cuadro 3.3: Factores EMEP/EEA para A320 motor 3CM026

Modo	Distancia [nm]	Altura	Duración	Unidad	Combustible	CO	HC	NOx	CO2	PM non vol	PM vol (org+sul)	PM total	SOx	H2O
LTO	ICAO default	0	00:32:54	[kg]	816.17	8.25	1.64	11.28	2570.93	0.0067	0.0593	0.0661	0.69	1003.89
CCD	125	180	00:21:37	[kg]	931.92	3.02	0.62	17.53	2935.54	0.0126	0.0802	0.0928	0.78	1146.26
CCD	200	270	00:31:18	[kg]	1356.45	4.49	0.92	25.70	4272.81	0.0207	0.1265	0.1472	1.14	1668.43
CCD	250	280	00:37:44	[kg]	1647.38	5.00	1.03	30.11	5189.25	0.0233	0.1592	0.1825	1.38	2026.28
CCD	500	320	01:10:49	[kg]	2946.00	7.36	1.55	47.54	9279.91	0.0321	0.3192	0.3513	2.47	3623.58
CCD	750	360	01:45:05	[kg]	4124.49	9.79	2.08	62.11	12992.15	0.0407	0.4846	0.5253	3.46	5073.12
CCD	1000	380	02:18:37	[kg]	5273.37	12.33	2.64	76.68	16611.12	0.0532	0.6708	0.724	4.43	6486.25
CCD	1500	380	03:25:45	[kg]	7768.61	16.71	3.61	108.80	24471.13	0.0726	1.0199	1.0925	6.53	9555.39
CCD	2000	380	04:32:47	[kg]	10483.84	20.69	4.49	144.83	33024.10	0.0872	1.3407	1.4279	8.81	12895.09
CCD	2500	380	05:39:50	[kg]	12914.24	25.01	5.45	175.23	40679.86	0.1048	1.6856	1.7904	10.85	15884.44
CCD	3000	380	06:46:01	[kg]	15846.86	28.99	6.34	216.57	49917.60	0.1216	2.0047	2.1263	13.31	19491.56

Cuadro 3.4: Información registrada en la Bitácora de Actividades de la DGAC

Aeropuerto informante (código OACI)	Matrícula de la aeronave
Tipo de operación (aterriaje, despegue o sobrevuelo)	Tipo de aeronave
Fecha de operación	Aeropuerto de procedencia o destino
Empresa/aerolínea que efectúa la operación	Hora de la operación en horario UTC
Actividad realizada por la aeronave	Hora local de la operación
Número de vuelo	Fecha de la operación en horario UTC
Vuelo Nacional/Internacional	Modelo de aeronave
Vuelo Regular/No Regular	Empresa manufacturera de la aeronave

Para el análisis de los vuelos comerciales se consideraron solo las actividades de despegue de la base de datos (para evitar una doble cuenta), actividades de pasajeros y diferenciado por actividades nacionales e internacionales. Se calcularon las distancias geodésicas entre aeropuertos y se consideraron los modelos hasta con 0,1% de participación, es decir, A320, A321, A319, B732, B763, B733, B788 y B789 para vuelos nacionales. Así, para cada modelo de aeronave y contaminante se interpoló entre los factores con polinomios de Lagrange según la distancia y se promediaron los factores según el peso de cada distancia, considerando así las rutas comunes en Chile a fin de obtener un factor para cada aeronave y contaminante. En la tabla 3.5 se encuentran los factores de emisión y consumo calculados para un avión A320.

Cuadro 3.5: Factores EMEP/EEA para A320 motor 3CM026 vuelos nacionales en Chile

Modo	Unidad	Combustible	CO	HC	NOx	CO2	PM no volátil	PM volátil	PM total	SOx	H2O
LTO	[kg]	816.17	8.25	1.64	11.28	2570.93	0.01	0.06	0.07	0.69	1003.89
CCD	[kg]	2932.75	7.38	1.56	46.62	9238.15	0.03	0.33	0.36	2.46	3607.28

Finalmente, para la conversión de los factores a unidades de [g/pkm] o [g/pax] para CCD y LTO, respectivamente, se considera la capacidad de pasajeros (CP) de cada modelo y el factor de ocupación (FO) promedio de la flota aérea chilena, y para la fase CCD se considera además la distancia promedio recorrida por cada modelo, los cuales se relacionan con los factores obtenidos según la siguiente relación:

$$FE_{i,CCD}[g/pkm] = \frac{FE_{i,CCD}[g]/D_{i,CCD}}{CP_i[pax] \times FO[\%]} \quad (3.2)$$

Donde i representa el modelo del avión. Los valores considerados para cada modelo se encuentran en las tablas 3.6 y 3.7.

Cuadro 3.6: Características modelos modo aéreo

Modelo	Pasajeros	Distancia CCD [nm]
A319	144	460.02
A320	174	497.45
A320neo	180	497.45
A321	220	626.61
A321neo	234	626.61
AZEROe	180	497.45
B732	119	470.23
B733	149	542.51
B763	230	1864.11
B788	247	2028.88
B789	303	2028.92
Otros	190	497.45

Cuadro 3.7: Factor de ocupación para el modo aéreo

Año	Factor de ocupación [%]
2010	72.9
2011	70.9
2012	75.2
2013	76.2
2014	79.8
2015	82.6
2016	83.5
2017	81.0
2018	81.8
2019	80.2

Fuente: Anuario 2019, JAC.

3.2.1 Resultados modo aéreo

Los factores de emisión para el modo aéreo se encuentran en la tabla 3.11 para las categorías CCD y LTO y los tipos considerados en el periodo 2020-2050.

Modelo	Unidad	LTO_CCD	Combustible	CO	HC	NOx	CO2	PM no volátil	PM volátil	PM total	SOx
A319	[kg/km]	CCD	3.13	0.0112	0.0023	0.0478	9.87	0.0000	0.0003	0.0004	0.0026
A320	[kg/km]	CCD	3.19	0.0080	0.0017	0.0515	10.03	0.0000	0.0003	0.0004	0.0027
A320neo	[kg/km]	CCD	2.47	0.0065	0.0000	0.0296	7.79	0.0000	0.0002	0.0002	0.0021
A321	[kg/km]	CCD	3.81	0.0053	0.0003	0.0699	12.01	0.0008	0.0003	0.0011	0.0032
A321neo	[kg/km]	CCD	2.99	0.0044	0.0000	0.0412	9.43	0.0002	0.0002	0.0006	0.0025
AZEROe	[kg/km]	CCD	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B732	[kg/km]	CCD	3.39	0.0098	0.0021	0.0330	10.68	0.0006	0.0004	0.0010	0.0029
B733	[kg/km]	CCD	3.21	0.0123	0.0007	0.0389	10.11	0.0001	0.0003	0.0003	0.0027
B763	[kg/km]	CCD	5.43	0.0109	0.0021	0.0812	17.12	0.0001	0.0006	0.0007	0.0046
B788	[kg/km]	CCD	5.28	0.0075	0.0003	0.0555	16.62	0.0000	0.0006	0.0006	0.0044
B789	[kg/km]	CCD	5.64	0.0069	0.0000	0.1322	17.76	0.0002	0.0006	0.0008	0.0047
Otros	[kg/km]	CCD	4.23	0.0077	0.0010	0.0535	13.33	0.0000	0.0005	0.0005	0.0036
A319	[kg]	LTO	688.81	9.4900	1.9600	7.4600	2169.76	0.0035	0.0546	0.0581	0.5800
A320	[kg]	LTO	816.17	8.2500	1.6400	11.2800	2570.93	0.0067	0.0593	0.0661	0.6900
A320neo	[kg]	LTO	633.26	6.6941	0.0425	6.4899	1994.77	0.0013	0.0321	0.0334	0.5354
A321	[kg]	LTO	1034.57	4.4800	0.0700	17.2900	3258.89	0.1250	0.0531	0.1781	0.8700
A321neo	[kg]	LTO	749.10	6.0495	0.0300	9.7288	2359.67	0.0038	0.0379	0.0417	0.6299
AZEROe	[kg]	LTO	0	0	0	0	0	0	0	0	0
B732	[kg]	LTO	907.90	6.3500	0.9900	7.3000	2859.87	0.0943	0.0635	0.1578	0.7600
B733	[kg]	LTO	783.43	13.0400	0.8400	7.1900	2467.81	0.0103	0.0451	0.0554	0.6600
B763	[kg]	LTO	1729.93	29.6500	7.5600	26.6700	5449.29	0.0203	0.1371	0.1575	1.4500
B788	[kg]	LTO	1592.36	14.5100	0.5300	17.1500	5015.95	0.0110	0.0832	0.0942	1.3400
B789	[kg]	LTO	1726.66	6.8000	0.0400	34.5200	5438.97	0.0188	0.0848	0.1036	1.4500
Otros	[kg]	LTO	1204.27	11.3800	1.0850	14.2150	3793.44	0.0089	0.0713	0.0802	1.0150

Figura 3.11: Factores de emisión modo aéreo

3.3 Modo Marítimo

Para el cálculo de los factores de emisión se consideran las categorías de naves en la figura 3.12 en las actividades de crucero (C), maniobra (M) y en puerto (P) para cada uno de los cinco contaminantes relevantes para el modo, por lo que se calculan 51 FE para cada contaminante. En el diagrama de la figura 3.13 se observa el proceso de cálculo de emisiones de la metodología utilizada (Entec UK).

Marítimo					
Carga			Otros		
Tipo	Combustible	Actividad	Tipo	Combustible	Actividad
GRL	RO	C	PAS/PASC	MD	C
	RO	M		MD	M
	MD	P		MD	P
PTC	RO	C	PTR	MD	C
	RO	M		MD	M
	RO	P		MD	P
GRA	RO	C	PES	MD	C
	RO	M		MD	M
	MD	P		MD	P
PET	RO	C	WEL	MD	C
	RO	M		MD	M
	MD	P		MD	P
QUI	RO	C	Otros(b)	MD	C
	RO	M		MD	M
	MD	P		MD	P
TLE	RO	C	CIE	MD	C
	RO	M		MD	M
	MD	P		MD	P
FRI	RO	C			
	RO	M			
	MD	P			
GAS	RO	C			
	RO	M			
	MD	P			
ROF	RO	C			
	RO	M			
	RO	P			
TEC1	Metanol	C			
	Metanol	M			
	Metanol	P			
TEC2	H2	C			
	H2	M			
	H2	P			

Figura 3.12: Resumen de factores de emisión modo marítimo

Para desarrollar el programa de cálculo de emisiones del modo marítimo se realizó una correlación entre los tipos de naves descritos en la metodología y los tipos declarados por la DIREC-TEMAR en su Boletín de Estadísticas Portuarias [21]. A cada tipo de embarcación se le asignó su correspondiente potencia, tipo de motor (SSD, MSD, HSD, GT o ST), tipo de combustible utilizado (RO o MD), factores de carga para motor principal y auxiliar, velocidad crucero promedio para crucero y tiempo promedio en puerto o en maniobra (figura 3.14). Esta información se obtuvo de distintas fuentes, entre ellas la metodología EMEP/EEA para el modo marítimo (Sección 1.A.3.d), según indica la tabla 3.8. Con la información descrita, se busca la combinación de características para cada embarcación a fin de determinar el factor de emisión según el estudio de SMED para cada tipo de actividad: crucero, maniobra y en puerto. Cabe destacar que las

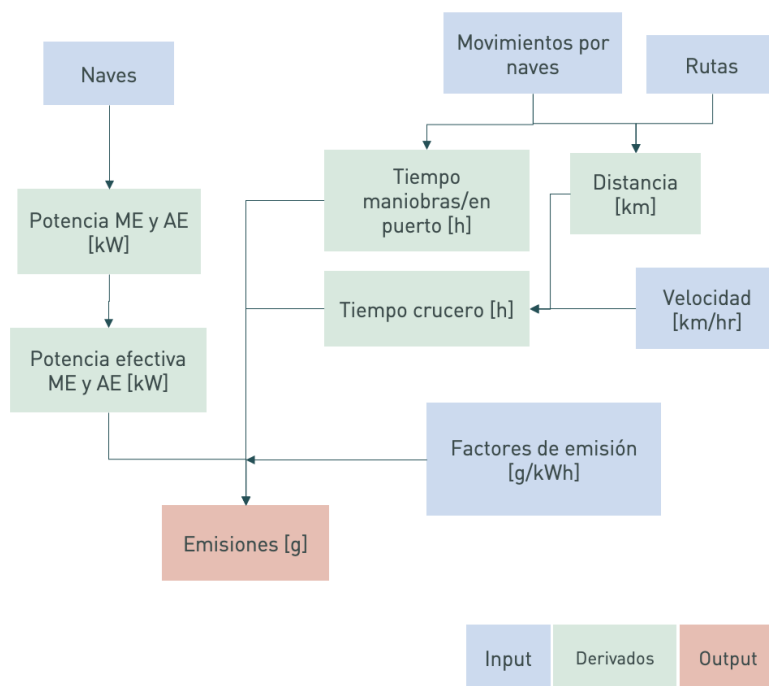


Figura 3.13: Metodología para cálculo de emisiones

combinaciones más comunes en embarcaciones son SSD/RO, MSD/RO y MSD/MD.

Para la potencia instalada, EMEP/EEA entrega valores promedio por tipo de nave para el año 1997 y el año 2010. Los valores antes y después de estos años se asumieron constantes y entre 1997 y 2010 se aplicó una distribución lineal.

Cuadro 3.8: Fuentes de información para supuestos modo marítimo

Variable	Fuente
Factor de emisión	SMED 2002
Tipo de motor	Entec UK 2010
Velocidad promedio	Entec UK 2010
Tiempo promedio	BD DIRECTEMAR 2015
Potencia instalada	EMEP/EEA 2020
Factores de carga	Entec UK 2010
Combustible	Entec UK 2010
Tipos de naves	DIRECTEMAR 2021

Al igual que en el modo aéreo, para la conversión de los factores a unidades de [g/tkm] o [g/ton] para crucero y maniobra/puerto, respectivamente, se considera la capacidad de carga

(CC) de cada modelo y el factor de ocupación (FO) promedio de cada tipo de nave en la misma relación descrita anteriormente. Los valores considerados se encuentran en las tablas 3.6 y 3.7.

Cuadro 3.9: Capacidad de carga y factor de ocupación para el modo marítimo

Tipo	Carga [ton]	FO
GRL	80000	30 %
PTC	10000	40 %
GRA	100000	50 %
PET	80000	50 %
QUI	25000	50 %
TLE	15000	50 %
PAS/PASC	5000	90 %
PES(a)	5000	80 %
FRI	50000	40 %
WEL	10000	90 %
GAS	100000	50 %
PTR	10000	90 %
Otros(b)	0	-
CIE	0	-
ROF	10000	90 %
TEC1	100000	50 %
TEC2	100000	50 %

En la actualización de los factores de emisión para el modo marítimo, las variables más relevantes son: efectos de nuevas normativas en la composición de combustibles y tecnologías de abatimiento, nuevos combustibles sustentables y medidas operacionales.

Los factores de emisión de SMED se encuentran separados según las exigencias en límites de emisiones del “NO_x Technical Code” de la OMI que aplica a todas las naves construidas después del año 2000. Para la distribución, se considera una renovación de flota el 4%; considerando una vida útil promedio de 25 años para las embarcaciones. También bajo el primer punto de la actualización de los FE, se incluyó el efecto de la normativa impuesta por la OMI determinada en el MARPOL anexo VI con respecto a las reducciones de contenido de sulfuro en los combustibles marítimos desde el año 2020 en adelante para zonas fuera de las “zonas de control de emisiones

de azufre” (SECA, por sus siglas en inglés), es decir, un límite de 0,5 % S para el HFO o RO.

Con respecto a nuevas tecnologías bajas en emisiones, se incluyeron como nuevos combustibles: metanol (TEC1) e hidrógeno (TEC2), por ser a los que la literatura y la industria indica como con mayor potencial en el corto y largo plazo, como se describió en la sección 2.3. En el caso del metanol, se considera una reducción de 99 % en emisiones de SO_x , 60 % de NO_x , 95 % de PM y 100 % de CO_2 con respecto a RO [16].

3.3.1 Resultados modo marítimo

Los factores de emisión correspondientes al modo marítimo se presentan en las figuras 3.15, 3.16 y 3.17. Estos consideran las normativas impuestas a partir del año 2020, es decir, las disminuciones en el contenido de sulfuro aceptado por la OMI y las nuevas condiciones de para buques nuevos impuestos en el “ NO_x Technical Code”.

Codigo	Categoría		Actividad	Motor	Tipo Motor	Combustible	P [kW]	Factor Actividad V [km/hr] / T [hr]
	DIRECTEMA	Entec UK						
GRL	Carga General	General Cargo	C	ME	MSD	RO	2555	24,45
			M	ME	MSD	RO	2555	1,00
			P	AE	MSD	MD	945,35	85,68
PTC	Porta-contenedor	Container Ship	C	ME	SSD	RO	14871	39,26
			M	ME	SSD	RO	14871	1,00
			P	AE	MSD	RO	4163,88	28,83
GRA	Granelero	Bulk Carrier	C	ME	SSD	RO	4397	26,11
			M	ME	SSD	RO	4397	1,00
			P	AE	MSD	MD	1011,31	113,57
PET	Petrolero	Tanker	C	ME	SSD	RO	6543	26,48
			M	ME	SSD	RO	6543	1,00
			P	AE	MSD	MD	2290,05	55,27
QUI	Tanque-Químico	Tanker	C	ME	SSD	RO	6543	26,48
			M	ME	SSD	RO	6543	1,00
			P	AE	MSD	MD	2290,05	51,65
TLE	Tanque-Líquido	Tanker	C	ME	SSD	RO	6543	26,48
			M	ME	SSD	RO	6543	1,00
			P	AE	MSD	MD	2290,05	59,15
PAS/PASC	Pasajeros	Passenger	C	ME	MSD	MD	10196	38,15
			M	ME	MSD	MD	10196	0,80
			P	AE	MSD	MD	4588,2	23,01
PES	Pesquero	Fishing	C	ME	MSD	MD	734	24,08
			M	ME	MSD	MD	734	0,70
			P	AE	MSD	MD	418,38	114,87
FRI	Frigorífico	General Cargo	C	ME	MSD	RO	2555	24,45
			M	ME	MSD	RO	2555	1,00
			P	AE	MSD	MD	945,35	73,21
WEL	Wellboat	Fishing	C	ME	MSD	MD	734	24,08
			M	ME	MSD	MD	734	0,70
			P	AE	MSD	MD	418,38	25,01
GAS	Gasero	Tanker	C	ME	SSD	RO	6543	26,48
			M	ME	SSD	RO	6543	1,00
			P	AE	MSD	MD	2290,05	55,76
PTR	Pasaje de Transbordo Rodado	Passenger	C	ME	MSD	MD	10196	38,15
			M	ME	MSD	MD	10196	0,80
			P	AE	MSD	MD	4588,2	8,06
Otros	Otros	Others	C	ME	MSD	MD	2469	23,71
			M	ME	MSD	MD	2469	1,00
			P	AE	MSD	MD	765,39	27,00
CIE	Científico	Others	C	ME	MSD	MD	2469	23,71
			M	ME	MSD	MD	2469	1,00
			P	AE	MSD	MD	765,39	82,34
ROF	Roll-on Roll-off	Ro-Ro Cargo	C	ME	SSD	RO	4194	33,34
			M	ME	SSD	RO	4194	1,00
			P	AE	MSD	RO	1425,96	21,81
TEC1	Carga General	-	C	ME	MSD	Metanol	2555	24,45
			M	ME	MSD	Metanol	2555	1,00
			P	AE	MSD	Metanol	945,35	85,68
TEC2	Carga General	-	C	ME	MSD	Hidrógeno	2555	24,45
			M	ME	MSD	Hidrógeno	2555	1,00
			P	AE	MSD	Hidrógeno	945,35	85,68

Figura 3.14: Supuestos asociados a cada tipo de embarcación

FE: Marítimo [en océano]									
Tipo	CO2 [g/km]	CO [g/km]	NOx [g/km]	SOx [g/km]	VOC [g/km]	PM [g/km]	sfc [g/km]	N2O [g/km]	NH3 [g/km]
GRL	54822.4	92.0	973.6	149.0	16.7	12.5	17257.4	2.59	0.50
PTC	180350.0	150.4	4670.0	490.9	90.1	118.2	56723.0	9.39	1.61
GRA	80176.9	66.8	2076.1	218.2	40.1	24.5	25216.9	4.18	0.72
PET	117639.4	98.1	3046.2	320.2	58.8	36.0	36999.5	6.13	1.05
QUI	117639.4	98.1	3046.2	320.2	58.8	36.0	36999.5	6.13	1.05
TLE	117639.4	98.1	3046.2	320.2	58.8	36.0	36999.5	6.13	1.05
PAS/PASC	133822.9	235.2	2506.1	61.6	42.8	6.0	42076.2	6.63	1.07
PES	15901.9	26.8	292.2	19.5	4.9	4.7	4999.8	0.76	0.12
FRI	57106.6	92.0	1029.5	413.9	16.7	40.1	17976.5	2.59	0.50
WEL	15265.8	26.8	276.4	7.0	4.9	1.5	4799.8	0.76	0.12
GAS	122541.0	98.1	3113.9	889.4	58.8	246.7	38541.1	6.13	1.05
PTR	133822.9	235.2	2506.1	61.6	42.8	6.0	42076.2	6.63	1.07
Otros	54326.0	91.7	998.4	66.7	16.7	16.0	17081.0	2.58	0.42
CIE	54326.0	91.7	998.4	66.7	16.7	16.0	17081.0	2.58	0.42
ROF	62401.7	49.9	1585.7	452.9	29.9	125.6	19626.3	3.12	0.54
TEC1	0	0	389.4	1.5	0	0.6	0	0	0
TEC2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3.15: Factores de emisión modo marítimo en océano

FE: Marítimo [en maniobras]									
Tipo	CO2 [g]	CO [g]	NOx [g]	SOx [g]	VOC [g]	PM [g]	sfc [g]	N2O [g]	NH3 [g]
GRL	368901.1	1124.2	5126.2	1002.6	204.4	153.3	116262.7	15.84	3.07
PTC	1947268.2	2951.6	38307.4	5300.0	1769.1	2319.9	613874.9	92.20	15.82
GRA	575760.8	872.7	11326.6	1567.1	523.1	685.9	181508.2	27.26	4.68
PET	856766.6	1298.7	16854.6	2331.9	778.4	1020.7	270095.0	40.57	6.96
QUI	856766.6	1298.7	16854.6	2331.9	778.4	1020.7	270095.0	40.57	6.96
TLE	856766.6	1298.7	16854.6	2331.9	778.4	1020.7	270095.0	40.57	6.96
PAS/PASC	1122897.7	3589.0	15985.0	528.6	652.5	195.8	353939.9	50.57	8.16
PES	73678.9	226.1	1071.2	92.5	41.1	39.5	23223.8	3.19	0.51
FRI	384272.0	1124.2	5453.4	2785.0	204.4	490.6	121107.0	15.84	3.07
WEL	70731.8	226.1	1006.9	33.3	41.1	12.3	22294.8	3.19	0.51
GAS	892465.2	1298.7	17930.5	6477.6	778.4	3266.3	281349.0	40.57	6.96
PTR	1122897.7	3589.0	15985.0	528.6	652.5	195.8	353939.9	50.57	8.16
Otros	354054.6	1086.4	5147.4	444.4	197.5	189.6	111598.8	15.31	2.47
CIE	354054.6	1086.4	5147.4	444.4	197.5	189.6	111598.8	15.31	2.47
ROF	572061.6	832.4	11493.3	4152.1	498.9	2093.6	180342.0	26.00	4.46
TEC1	0	0	2050.5	10.0	0	7.7	0	0	0
TEC2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3.16: Factores de emisión modo marítimo en maniobra

FE: Marítimo (en puerto)									
Tipo	CO2 [g]	CO [g]	NOx [g]	SOx [g]	VOC [g]	PM [g]	sfc [g]	N2O [g]	NH3 [g]
GRL	22356455	29160.6	377174.8	27540.6	6480.1	6220.9	7030943	1004.4	162.0
PTC	33285747	43220.8	553667.5	89899.2	9604.6	7203.5	10465186	1488.7	288.1
GRA	31700238	41348.1	534813.3	39051.0	9188.5	8820.9	9969495	1424.2	229.7
PET	34932596	45564.3	589346.3	43032.9	10125.4	9720.4	10986048	1569.4	253.1
QUI	32646632	42582.6	550779.9	40216.9	9462.8	9084.3	10267129	1466.7	236.6
TLE	37386894	48765.5	630752.7	46056.3	10836.8	10403.3	11757907	1679.7	270.9
PAS/PASC	29138557	38006.8	491595.3	35895.3	8446.0	8108.1	9163865	1309.1	211.1
PES	13264370	17301.4	223782.6	16340.2	3844.7	3691.0	4171548	595.9	96.1
FRI	19101041	24914.4	322252.8	23530.3	5536.5	5315.1	6007139	858.2	138.4
WEL	2887545	3766.4	48715.6	3557.1	837.0	803.5	908112	129.7	20.9
GAS	35243703	45970.0	594595.0	43416.2	10215.6	9806.9	11083889	1583.4	255.4
PTR	10200558	13305.1	172093.2	12565.9	2956.7	2838.4	3208002	458.3	73.9
Otros	5703686	7439.6	96226.6	7026.3	1653.2	1587.1	1793768	256.3	41.3
CIE	17393309	22686.9	293441.8	21426.5	5041.5	4839.9	5470070	781.4	126.0
ROF	8982116	11196.5	150426.8	64691.1	2488.1	5971.5	2824017	385.7	74.6
TEC1	0	0	150869.9	275.4	0	311.0	0	0	0
TEC2	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 3.17: Factores de emisión modo marítimo en puerto

3.4 Modo Ferroviario

Para la estimación de los factores relacionados al modo ferroviario se utiliza la metodología del Banco Europeo de Inversiones (BEI) y la estrategia ESRS desarrollada por la Union Internationale des Chemins de fer o Unión Internacional de Ferrocarriles (UIC) en conjunto con la información proporcionada por la documentación de EcoTransIT World y EcoPassenger, los cuales se rigen por la misma estrategia descrita en el capítulo 2.4.

El modo ferroviario se destaca, por un lado, por el dominio de dos formas de propulsión: diésel y eléctrico, por otro lado, también se destaca por su uso en el transporte tanto de carga como de pasajeros. Por lo tanto, los factores se entregan de manera diferenciada para estas dos formas de motorización y ámbitos y se estiman cuatro FE para cada contaminante (figura 3.18). En el caso del transporte de pasajeros, se entregan los factores de consumo energético en unidades de MJ por asientos-km o por pasajeros-km utilizando una tasa de ocupación promedio constante de 35 %. Los factores de emisiones se entregan indirectamente en [g/kg diésel] según diferentes fuentes como Rail Diesel Project, estudios de Deutsche Bahn y Ecopassenger (respaldados por la ESRS de UIC), los cuales son contrastados con el consumo de diésel por pkm reportado. En el presente trabajo se utilizan los factores de EcoPassenger 2010, por ser los más representativos de una flota antigua y, por lo tanto, más cercanos a la flota chilena de trenes (tabla 3.10).

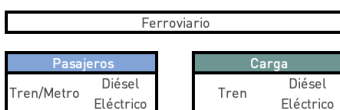


Figura 3.18: Resumen de factores de emisión modo ferroviario

Cuadro 3.10: Resumen de factores modo ferroviario de pasajeros

	Eléctrico	Diésel		
Consumo energético específico	[MJ/pkm]	[g/pkm]		
	0,31	25,2		
	CO ₂	NO _x	NMVOC	PM
Factores de emisión TTW diésel	[kg/kg]	[g/kg]	[g/kg]	[g/kg]
	3,18	52,3	2,6	1,1

El transporte de carga, contrario al de pasajeros, utiliza casi exclusivamente diésel. Por lo tanto, existen más especificaciones sobre los principales factores que influyen en las emisiones, a

saber:

- Tipo de ferrocarril: tamaño, capacidad de carga útil, motor, etc.
- Capacidad de utilización: factor de carga, viajes vacíos.
- Peso total de la carga
- Distancia

Cuadro 3.11: Resumen de factores modo ferroviario de carga

	Eléctrico	Diésel		
Consumo energético específico	[Wh/Gtkm]	[Wh/Gtkm]		
	16,6	44,8		
Factores de emisión TTW diésel	CO ₂	NO _x	NMVOC	PM
	[kg/kg]	[g/MJ]	[g/MJ]	[g/MJ]
	3,16	1,32	0,088	0,0036

Un ferrocarril promedio se define basado en la clase de vagones UIC 571-2 con una capacidad de carga útil o *payload capacity* (CP) de 61[ton], un peso vacío (EW) de 23[ton], un factor de carga (LF) de 60% y factor de tren vacío (ET) de 50% lo que entrega un factor de capacidad de utilización en relación neta y bruta de 51%. Se utilizan los factores promedio de trenes reportados por la metodología por falta de información adicional en las operaciones chilenas para incluir una mayor desagregación. Estos factores se relacionan según las ecuaciones:

$$CU_{NC} = \frac{LF}{1 + ET} \quad (3.3)$$

$$CU_{NG} = \frac{CU_{NC}}{CU_{NC} + EW/CP} \quad (3.4)$$

3.4.1 Resultados modo ferroviario

Finalmente, los resultados de factores para el modo ferroviario se encuentran en la figura 3.19.

Ámbito	Motorización	CO ₂	NO _x	NMVOC	PM	EC
		[g/tkm]	[g/tkm]	[g/tkm]	[g/tkm]	[MJ/tkm]
Carga	Diésel	22.971	0.415	0.028	0.011	0.313
Carga	Eléctrico	0	0	0	0	0.116
		[g/pkm]	[g/pkm]	[g/pkm]	[g/pkm]	[MJ/pkm]
Pasajeros	Diésel	80.136	1.318	0.066	0.028	1.09
Pasajeros	Eléctrico	0	0	0	0	0.31

Figura 3.19: Factores de emisión modo ferroviario

Capítulo 4

Proyección de escenarios

Los conjuntos de factores de emisión y consumo energético obtenidos para los años 2020-2050 en Chile para cada uno de los contaminantes seleccionados según lo descrito en el capítulo 3 son empleados en tres escenarios distintos de proyecciones generados a partir de las normativas y tendencias analizadas para el cálculo de emisiones correspondientes a cada modo del sector transporte. Estos se utilizan como valores constantes para el periodo seleccionado, por lo que no incluyen medidas operacionales de reducción de emisiones.

Para los modos aéreo, marítimo y ferroviario, las emisiones son calculadas mediante la siguiente ecuación:

$$Emisiones = Factor\ de\ Emision \times Actividad \quad (4.1)$$

En cambio, en el modo caminero se utiliza la proyección del parque vehicular y las emisiones se calculan como sigue:

$$Emisiones_{i,j} = \sum_R \sum_k (N_{j,k} \times M_{j,k} \times EF_{i,j,k}) \quad (4.2)$$

Donde:

$N_{j,k}$: número de vehículos en la flota nacional de la categoría j y tecnología k.

$M_{j,k}$: distancia anual promedio recorrida por vehículos de la categoría j y tecnología k, [km/veh].

$EF_{e,j,k}$: factor de emisión para el contaminante i, categoría j y tecnología k, [g/veh-km].

R : factor de desagregación por región.

En el modo caminero, el término vehículo eléctrico en las proyecciones engloba a los vehículos eléctricos a batería y vehículos a celda de combustible, es decir, de cero emisiones o ZEV. Esta segunda opción gana especial relevancia en los vehículos pesados de carga; sin embargo, se con-

sidera adicionalmente a los siguientes tipos de vehículos eléctricos en la categoría de vehículos livianos de pasajeros:

- EV (Vehículo Eléctrico): vehículos que solo funcionan con baterías y se recargan conectándolos a la red eléctrica.
- HYB o HEV (Vehículo Híbrido Convencional): vehículo que combina dos fuentes de potencia, con un motor principal a combustión y una batería y motor eléctrico que sirven de apoyo en diversas situaciones.
- HYB PI o PHEV (Vehículo Híbrido Enchufable): vehículo que combina un motor de combustión con un motor eléctrico y baterías de mayor capacidad, que se recargan conectando el vehículo a la red eléctrica.

4.1 Escenario base

Para determinar el escenario base de estimación de emisiones se consideró el parque vehicular histórico 1990-2018, al que se agregaron los EV, HEV, PHEV y nuevos vehículos Euro 6/VI que ingresaron al país en 2020 y 2021, según lo reportado por la ANAC. Se incluye la entrada de la norma Euro 6/VI en 2022 para los vehículos nuevos. Entre el 2006 y el 2016 el parque vehicular tuvo un crecimiento anual promedio de 6,5%. El crecimiento utilizado en la proyección se encuentra en la tabla 4.1.

Cuadro 4.1: Crecimiento del parque vehicular chileno

Periodo	Crecimiento anual promedio
2006-2016	6,5 %
2018-2030	2,3 %
2030-2040	1,8 %
2040-2050	1,6 %

En el escenario base se incluyen las metas definidas por la Estrategia de Electromovilidad para vehículos cero emisiones descritas en el capítulo 2.1:

- 100 % de nuevas incorporaciones del transporte público urbano al 2035.
- 100 % de ventas en la categoría vehículos livianos y medianos al 2035.
- 100 % de ventas de transporte de carga y buses interurbano al 2045. [4].
- 100 % del transporte público eléctrico al 2040.
- 40 % de vehículos eléctricos de uso particular al 2050 [3].

En el periodo 2022-2034, antes de la entrada en vigencia de las metas definidas, se definió un crecimiento anual de entre 50 % y 60 % para vehículos eléctricos y de 20 % para HYB e HYB PI en la categoría VLP. En el caso de los vehículos livianos comerciales se aplica el mismo crecimiento para vehículos eléctricos y en taxis se incluye el uso de GLP como combustible con normas Euro 5 y Euro 6 en el parque histórico y con un crecimiento de entre 5 % y 10 % en la proyección hasta 2035.

En las figuras 4.1 y 4.2 se muestra la proyección de las flotas de vehículos livianos de pasajeros y camiones medianos, respectivamente, representativos de vehículos livianos y pesados. Las demás categorías se pueden encontrar en el anexo. Con estos supuestos se alcanza un 11,5 % de participación de vehículos eléctricos en 2035, un 29,6 % en 2040 y un 57 % en 2050 en la categoría de VLP, y un 14,8 % en 2040 y 38,5 % en 2050 para camiones livianos, medianos y pesados.

El parque vehicular se desagrega por región como muestra la tabla 4.2, según la participación de cada una en la actividad vehicular nacional, la cual se asume constante en el tiempo.

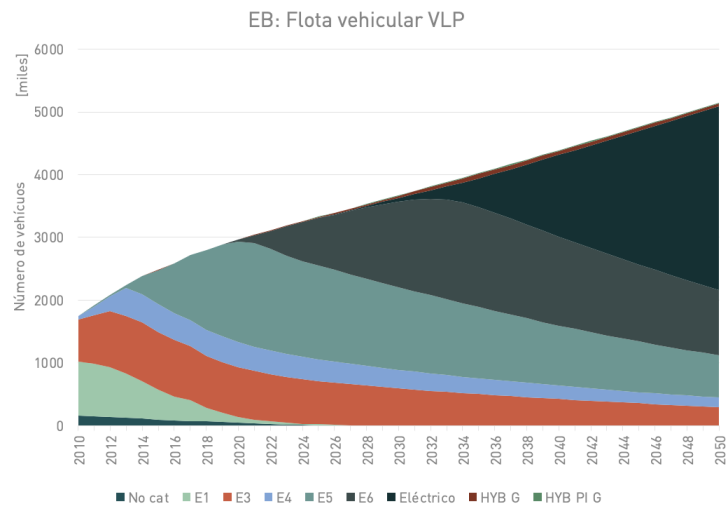


Figura 4.1: Escenario base: flota vehicular VLP

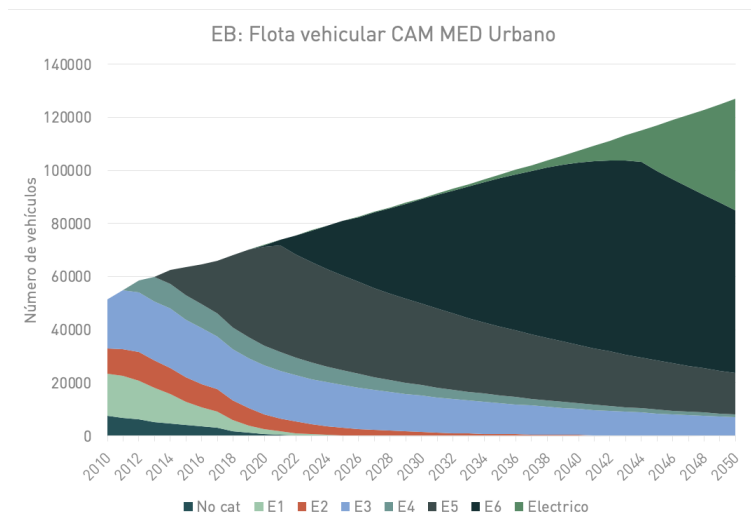


Figura 4.2: Escenario base: flota vehicular camiones medianos

Los biocombustibles no fueron considerados debido a que las metas planteadas por el gobierno se centran en la electromovilidad y el hidrógeno, son muy caros actualmente y requieren de un proceso de producción complejo que implica mucho terreno para cultivos y no siempre es bajo en emisiones; sin embargo, algunos biocarburantes avanzados “drop-in” tienen la ventaja que utilizan la misma infraestructura y motores existentes y podrían resultar especialmente relevantes en los camiones pesados de carga.

Los camiones puramente eléctricos tienen la desventaja que para alcanzar la potencia y autonomía necesaria requieren muchas baterías, lo que aumenta - además del precio - el peso del vehículo lo que, a su vez, implica que debe reducir la mercancía que es capaz de transportar. En cambio, los vehículos de medio tonelaje como los buses urbanos, son relativamente livianos, no realizan recorridos tan extensos y se estacionan todas las noches en el mismo sitio, por lo que las baterías eléctricas constituyen una opción viable. De hecho, como se mencionó en la sección 2.1, en Chile existen 826 buses urbanos eléctricos a noviembre 2021.

Cuadro 4.2: Participación por región modo caminero

Región	Participación
R01	0,9 %
R02	3,1 %
R03	1,3 %
R04	3,3 %
R05	8,5 %
R06	4,2 %
R07	4,0 %
R08	6,6 %
R09	3,7 %
R10	4,3 %
R11	0,5 %
R12	0,8 %
RM	55,3 %
R14	1,4 %
R15	0,4 %
R16	1,6 %

Para **modo aéreo**, como se describió en la sección 2.2, existen dos rutas principales para aeronaves bajas en emisiones: el uso de biocombustibles o Sustainable Aviation Fuel (SAF) o hidrógeno y e-fuels. El mercado de aeronaves se encuentra dominado principalmente por dos empresas manufactureras: Airbus y Boeing. Centrándose en la segunda vía de reducción de emisiones, Airbus tiene como meta para 2035 desarrollar el primer avión comercial cero emisiones en la forma de aviones híbridos de hidrógeno. Al 2021 presenta tres conceptos “ZEROe” los cuales están propulsados por combustión de hidrógeno mediante motores de turbina de gas modificados. El hidrógeno líquido se utiliza como combustible para la combustión con oxígeno y las celdas de combustible de hidrógeno crean energía eléctrica que complementa a la turbina de gas, lo que da lugar a un sistema de propulsión híbrido-eléctrico. En cambio, Boeing - la compañía rival - definió como objetivo diseñar y certificar sus aeronaves para que éstas vuelen con combustible 100 % sustentable para 2030, alineándose con la opción de utilización de SAFs.

Para la determinación de la flota de aeronaves se consideraron estos factores: la participación de cada una de las aerolíneas nacionales (informado por la JAC), flotas actuales de estas empresas, las órdenes de compra de aeronaves de Airbus y Boeing y planes a futuro tanto de empresas manufactureras como aerolíneas.

Según el Global Market Forecast 2019-2038 de Airbus, América Latina tiene una de las flotas más nuevas del mundo, con el promedio de edad de las aeronaves por debajo del promedio mundial. Además reporta que se espera un crecimiento de flota del 210 % para el 2038 en comparación con el 2019, del cual solo un 7,3 % es flota actual; por lo tanto, se pronostica una renovación de flota del 93 % [22]. Al 2021 las órdenes actuales de naves por parte de las aerolíneas chilenas, LATAM, Sky Airlines y Jetsmart, corresponden todas a naves de la familia neo de Airbus. Sky y Jetsmart cuentan incluso con casi toda su flota perteneciente a estos modelos; en consecuencia, se considera la flota actualizada al 2021 y la inclusión del modelo AZEROe en la proyección.

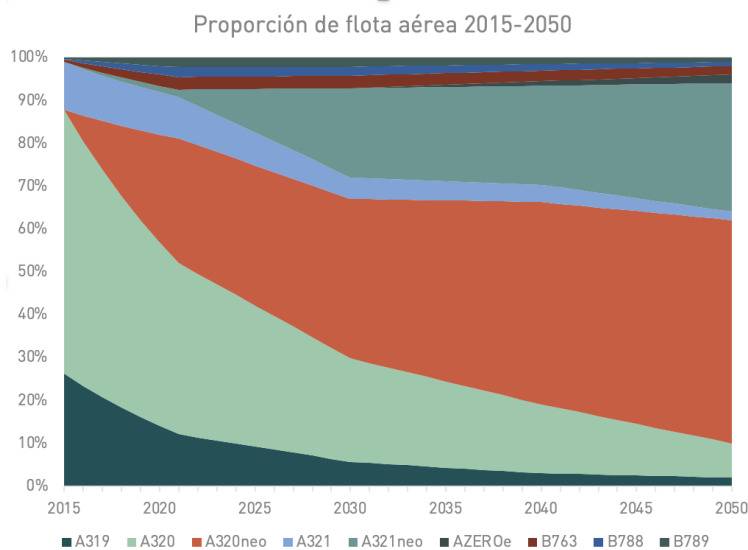


Figura 4.3: Escenario base: flota aérea

Cuadro 4.3: Proporción de flota modo aéreo

Modelo	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
A319	13 %	9 %	6 %	4 %	3 %	3 %	2 %
A320	41 %	33 %	24 %	20 %	16 %	12 %	8 %
A320neo	24 %	33 %	37 %	42 %	47 %	49 %	50 %
A321	10 %	8 %	5 %	5 %	4 %	3 %	2 %
A321neo	1 %	10 %	21 %	22 %	23 %	27 %	30 %
AZEROe	0 %	0 %	0 %	0 %	1 %	3 %	5 %
B763	3 %	3 %	3 %	3 %	3 %	2 %	1 %
B788	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	1 %	1 %
B789	2 %	2 %	2 %	2 %	2 %	1 %	1 %
Otros	1 %	1 %	1 %	1 %	1 %	0 %	0 %

La participación de los distintos tipos de nave del **modo marítimo** se proyectó sobre la base de los datos reportados por la DIRECTEMAR en los años 2015-2020 para las actividades de cabotaje en los Boletines de Estadísticas Portuarias [21]. Se incluye un crecimiento en la participación de los buques de carga general, los cuales a partir de 2026 también comienzan a operar con los nuevos combustibles descritos, tres años después de lo anunciado por las empresas navieras. La proporción de nuevos combustibles llega hasta a un 3 % de buques a metanol y 8 % de buques a hidrógeno en la flota 2050.

Con respecto a las otras categorías, se considera, por ejemplo, un ligero aumento en la participación de los buques gaseros basado en el aumento de los últimos cinco años, pero esta participación comienza a disminuir a partir de 2030 sobre la base de una baja en la demanda estimada de gas. Se estima que la disminución esperada en la demanda de combustibles fósiles debido al aumento de la electromovilidad y las energías renovables afectará también a los buques petroleros en su participación en la flota. A su vez, también se espera que el aumento de demanda de vehículos eléctricos también se espera que se traduzca en un ligero aumento de la participación de buques roll-on roll-off (utilizados para el transporte de vehículos). Para los demás tipos de buque se considera una participación relativamente constante (figura 4.4).

Actualmente, la **flota ferroviaria** chilena de pasajeros se compone de un 93 % de trenes eléctricos y solo un 7 % de trenes diésel, mientras que en la flota de carga se da el caso contrario y se compone de 95 % trenes diésel y 5 % trenes eléctricos. Para agrupar los factores se propone una proporción de flota como plantea la figura 4.5.

Cuadro 4.4: Participación en actividades por tipo de buque modo marítimo

Tipo	2015	2016	2017	2018	2019	2020
GRL	17.5 %	21.3 %	27.2 %	27.2 %	26.6 %	22.2 %
PTC	24.6 %	22.8 %	20 %	17.7 %	18.6 %	21.6 %
GRA	20 %	16.6 %	15 %	15.3 %	13.5 %	18.6 %
PET	17.2 %	13.7 %	14.9 %	14.3 %	13.9 %	12.5 %
QUI	4.2 %	6.7 %	6.9 %	7.9 %	9.2 %	10.1 %
TLE	2.1 %	2.6 %	3.6 %	2.5 %	2.4 %	2.5 %
PAS/PASC	1.6 %	2 %	2 %	2.1 %	3.1 %	1.6 %
PES	1.3 %	1.6 %	1.7 %	1.5 %	2.2 %	1.3 %
FRI	1.6 %	1.1 %	1.2 %	0.9 %	1.1 %	1.3 %
WEL	0 %	0 %	0 %	1.9 %	1.2 %	1.2 %
GAS	1 %	0.9 %	0.8 %	0.7 %	0.6 %	0.9 %
PTR	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0.4 %
Otros	4.6 %	6.2 %	1.6 %	3.5 %	2.6 %	2.3 %
CIE	0.4 %	0.6 %	0.7 %	0 %	1.1 %	0 %
ROF	3.9 %	3.9 %	4.4 %	4.5 %	3.9 %	3.5 %

Fuente: AEP, DIRECTEMAR.

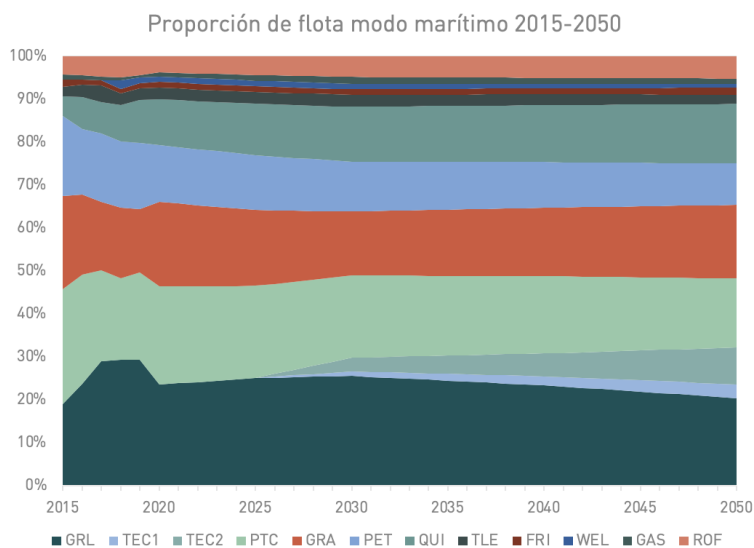


Figura 4.4: Escenario base: flota marítima

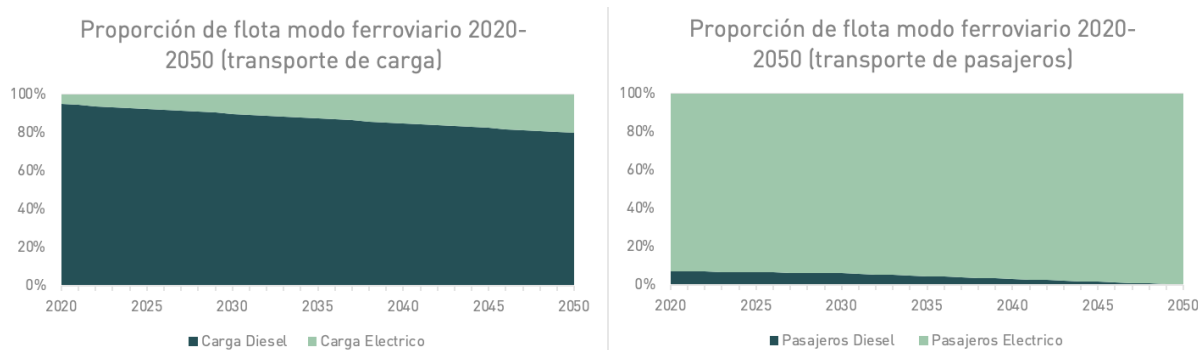


Figura 4.5: Escenario base: flota ferroviaria

Los datos de actividad utilizados se encuentran en las tablas 4.5 y 4.6. Para el modo caminero se multiplican los valores tabulados por el parque vehicular desagregado por año y categoría. Para los modos aéreo, marítimo y ferroviario se utilizó una distribución lineal entre los datos en la tabla.

Cuadro 4.5: Actividad anual por tipo de vehículo modo caminero

Categoría	Ámbito		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
VLP	U/I	[km/año]	8228	13302	14382	15241	13986	12127	12582	12390
VLC	U/I	[km/año]	9873	15962	17259	18289	16784	14552	15099	14869
TAX	U	[km/año]	16455	26604	28765	30482	27973	5000	25165	24781
BUS RIG	U	[km/año]	40361	66618	57942	54292	33598	28935	39394	54455
BUS ART	U	[km/año]	40361	66618	57942	54292	33598	28935	39394	54455
CAM LIV	U/I	[km/año]	30271	46120	43456	54292	23260	20032	27273	37700
CAM MED	U/I	[km/año]	30271	46120	43456	54292	23260	20032	27273	37700
CAM PES	U/I	[km/año]	30271	46120	43456	54292	23260	20032	27273	37700
MOT	U/I	[km/año]	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
BUS INT PROV	I	[km/año]	40361	66618	57942	54292	33598	28935	39394	54455

Categoría	Ámbito		R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16
VLP	U/I	[km/año]	13515	14494	12089	7284	14956/20000	14494	8228	13302
VLC	U/I	[km/año]	15962	17393	14507	8741	17948/20000	17393	9873	15962
TAX	U	[km/año]	27029	28989	24178	14569	40568	28989	16455	26604
BUS RIG	U	[km/año]	56173	58059	31175	46503	67378	58059	40361	66618
BUS ART	U	[km/año]	56173	58059	31175	46503	67378	58059	40361	66618
CAM LIV	U/I	[km/año]	38889	40195	31175	34877	29471/35000	40195	30271	46126
CAM MED	U/I	[km/año]	38889	40195	31175	34877	29471/35000	40195	30271	46126
CAM PES	U/I	[km/año]	38889	40195	31175	34877	29471/35000	40195	30271	46126
MOT	U/I	[km/año]	5000	5000	5000	5000	5000/7000	5000	5000	5000
BUS INT PROV	I	[km/año]	56173	58059	31175	46503	80000	58059	40361	66629

Cuadro 4.6: Actividad modos ferroviario, aéreo y marítimo

Modo	Ámbito	Unidad	2017	2050
Ferroviano	Carga	[tkm]	1348477420	5832872823
Ferroviano	Pasajeros	[pkm]	859392184	3641698174
Aéreo	CCD	[pkm]	23457385674	87677315026
Aéreo	LTO	[pax]	31623464	132659777
Marítimo	O	[tkm]	139498728095	315816387717
Marítimo	M+P	[ton]	65884532	90646478

4.1.1 Resultados Escenario Base

Las emisiones para los cuatro modos de transporte se encuentran en la figura 4.6. Los gráficos en la figura 4.7 representan las emisiones de CO₂, donde se observa que el transporte caminero de pasajeros representa el 75 % de las emisiones de CO₂ durante el 2020; sin embargo, disminuye al 56 % en el 2050. Esto sucede por la introducción de la electromovilidad en este modo en particular, en especial desde el 2035 en adelante, cuando entra en vigencia la meta de la Estrategia de Electromovilidad 2021. Para los modos marítimo y aéreo no se estima una entrada tan agresiva de las nuevas tecnologías bajas en emisiones por lo que las emisiones aumentan casi directamente con el aumento lineal de la actividad. Para el modo aéreo se considera solo un modelo híbrido eléctrico-hidrógeno con un 5 % de participación en 2050 y para el modo marítimo los nuevos combustibles bajos en emisiones conforman el 11 % en conjunto en el mismo año, en contraste con el 57 % de los VLP en el modo caminero. Como se mencionó anteriormente, estas soluciones aún no se encuentran disponibles a escala comercial como los vehículos o trenes eléctricos y son los modos más difíciles de descarbonizar junto con los camiones de carga debido a la carga que transportan y distancias que recorren.

Adicionalmente, a pesar de presentar el mayor porcentaje de aumento en el 2050 con respecto al 2020, el modo ferroviario no alcanza a contribuir una parte visible de las emisiones, también impulsado por el uso de trenes eléctricos en el ámbito de pasajeros. También destaca el gran aumento de la actividad aérea, como se mencionó en la sección 2.2, la actividad aérea se ha multiplicado por un factor de 2,5 desde el año 2000 y se proyecta que continúe este aumento.

		Escenario 1: Emisiones de CO ₂ , [kton]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovionario	Carga	38.32	51.75	64.40	76.27	87.36	97.66	107.19
Ferrovionario	Pasajeros	4.82	6.67	8.19	7.66	6.12	3.57	0.00
Aereo	Pasajeros	2706.48	3520.08	4047.80	4631.01	5071.17	5375.87	5598.03
Marítimo	Carga	716.88	843.38	950.66	1029.77	1102.34	1145.89	1181.19
Caminero	Pasajeros	20827.24	23027.04	24494.53	23783.26	18481.65	15821.02	13272.71
Caminero	Carga	3537.30	3949.45	4338.31	4715.83	5001.57	4841.72	3696.26
Total		27831.05	31398.37	33903.89	34243.79	29750.21	27285.73	23855.38

(a) Emisiones CO₂ Escenario Base

		Escenario 1: Emisiones de CO, [kton]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovionario	Carga	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ferrovionario	Pasajeros	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aereo	Pasajeros	3.91	5.02	5.67	6.49	7.11	7.47	7.69
Marítimo	Carga	0.73	0.86	0.97	1.05	1.12	1.16	1.19
Caminero	Pasajeros	93.92	58.10	49.42	44.00	34.32	28.49	23.60
Caminero	Carga	7.49	6.15	4.89	4.05	3.45	2.92	2.31
Total		106.05	70.13	60.96	55.58	45.99	40.03	34.79

(b) Emisiones CO Escenario Base

		Escenario 1: Emisiones de NO _x , [kton]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovionario	Carga	0.69	0.94	1.16	1.38	1.58	1.76	1.94
Ferrovionario	Pasajeros	0.10	0.13	0.15	0.14	0.11	0.06	0.00
Aereo	Pasajeros	12.66	16.01	17.90	20.12	21.64	22.55	23.03
Marítimo	Carga	17.06	19.82	22.41	24.36	26.17	27.27	28.17
Caminero	Pasajeros	47.25	36.05	28.54	22.56	13.28	10.82	8.77
Caminero	Carga	25.04	19.61	15.52	12.73	10.71	9.00	7.29
Total		102.80	92.56	85.68	81.29	73.49	71.46	69.19

(c) Emisiones NO_x Escenario Base

		Escenario 1: Emisiones de SO _x , [kton]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovionario	Carga	-	-	-	-	-	-	-
Ferrovionario	Pasajeros	-	-	-	-	-	-	-
Aereo	Pasajeros	-	-	-	-	-	-	-
Marítimo	Carga	1.93	2.30	2.63	2.86	3.07	3.20	3.31
Caminero	Pasajeros	0.67	0.74	0.79	0.77	0.60	0.51	0.43
Caminero	Carga	0.11	0.12	0.14	0.15	0.16	0.15	0.12
Total		2.71	3.16	3.56	3.78	3.83	3.87	3.86

(d) Emisiones SO_x Escenario Base

		Escenario 1: Emisiones de PM, [kton]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovionario	Carga	0.02	0.03	0.03	0.04	0.04	0.05	0.05
Ferrovionario	Pasajeros	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Aereo	Pasajeros	0.10	0.13	0.14	0.16	0.17	0.18	0.19
Marítimo	Carga	0.33	0.39	0.45	0.49	0.52	0.54	0.56
Caminero	Pasajeros	1.09	0.81	0.64	0.51	0.33	0.26	0.21
Caminero	Carga	0.44	0.30	0.23	0.18	0.15	0.12	0.10
Total		1.98	1.66	1.50	1.38	1.22	1.16	1.11

(e) Emisiones PM Escenario Base

		Escenario 1: Emisiones de VOC, [kton]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovionario	Carga	0.05	0.06	0.08	0.09	0.11	0.12	0.13
Ferrovionario	Pasajeros	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Aereo	Pasajeros	0.59	0.63	0.58	0.58	0.53	0.45	0.34
Marítimo	Carga	0.32	0.38	0.43	0.46	0.50	0.52	0.53
Caminero	Pasajeros	6.41	2.94	2.07	1.65	1.14	0.91	0.72
Caminero	Carga	0.79	0.55	0.46	0.41	0.38	0.34	0.27
Total		8.16	4.56	3.61	3.21	2.67	2.35	2.00

(f) Emisiones VOC Escenario Base

		Escenario 1: Consumo energético (EC), [TJ]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovionario	Carga	533	727	915	1095	1249	1437	1597
Ferrovionario	Pasajeros	406	553	698	820	933	1036	1129
Aereo	Pasajeros	37074	48219	55448	63437	69467	73641	76684
Marítimo	Carga	9369	11022	12425	13458	14407	14976	15437
Caminero	Pasajeros	285617	316377	337972	336849	281598	257158	234298
Caminero	Carga	47650	53202	58440	63525	67375	65221	49791
Total		380648.77	430100.81	465897.39	479186.11	435048.29	413469.04	378936.84

(g) Consumo energético (EC) Escenario Base

Figura 4.6: Emisiones Escenario Base

Cuadro 4.7: Porcentajes de variación de las emisiones de CO₂ en el escenario base con respecto al año 2020

Modo	Ámbito	2025/2020	2030/2020	2035/2020	2040/2020	2045/2020	2050/2020
Ferrovionario	Carga	35 %	68 %	99 %	128 %	155 %	180 %
Ferrovionario	Pasajeros	38 %	70 %	59 %	27 %	-26 %	-100 %
Aéreo	Pasajeros	30 %	50 %	71 %	87 %	99 %	107 %
Marítimo	Carga	18 %	33 %	44 %	54 %	60 %	65 %
Caminero	Pasajeros	11 %	18 %	14 %	-11 %	-24 %	-36 %
Caminero	Carga	12 %	23 %	33 %	41 %	37 %	4 %
Total		13 %	22 %	23 %	7 %	-2 %	-14 %

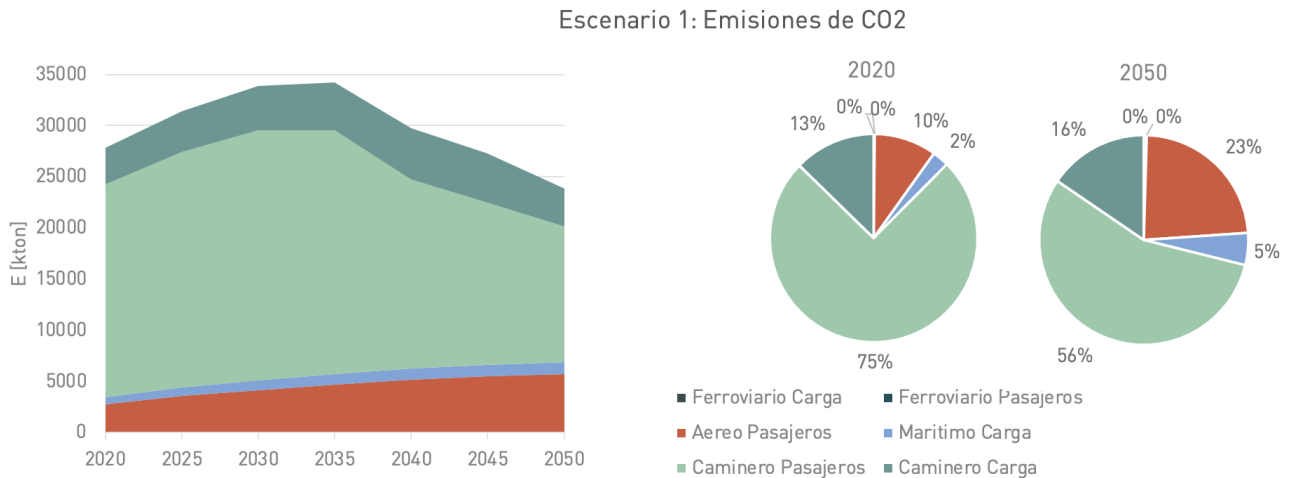


Figura 4.7: Emisiones de CO₂ para Escenario Base

Por su gran relevancia en el sector transporte, a continuación se presentan gráficos específicos del modo caminero. En la figura 4.8, se presentan las emisiones de CO₂ para el modo caminero por categoría y la proporción de vehículos cero emisiones en la flota total con lo cual se puede observar el impacto en la reducción de emisiones que implica la introducción de la electromovilidad. Comparativamente, en la figura 4.9 se encuentra el mismo gráfico para el consumo energético, donde la pendiente entre el año 2035 y 2050 no es tan pronunciada como para el CO₂. El factor de consumo energético para un VLP eléctrico reportado por COPERT es un 80 % menor que el del un VLP Euro 6. En el modelo, las emisiones de CO₂ alcanzan su valor máximo para el transporte caminero en 2033 con un valor total de 29409 [kton] anuales, este caso se repite para SO_x, cuyos factores de emisión son iguales para las normas Euro 4/IV, Euro 5/V y Euro 6/VI en el caso de los VLP, por lo que la introducción de la norma Euro 6/VI no implica una reducción de emisiones, como es el caso de los demás contaminantes estimados, cuyas emisiones disminuyen en la serie de tiempo seleccionada para el análisis.

La figura 4.10 contiene las emisiones para modo caminero en el escenario base en intervalos de 5 años desde el 2020 hasta el 2050 para las categorías definidas del modo caminero.

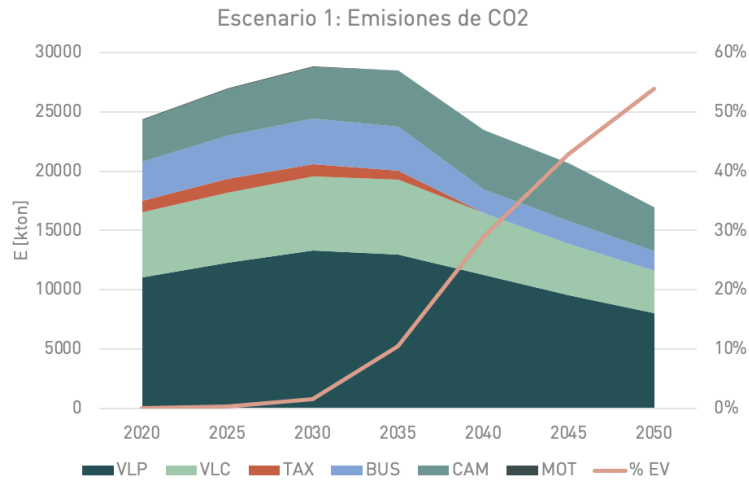


Figura 4.8: Emisiones de CO₂ modo caminero para Escenario Base

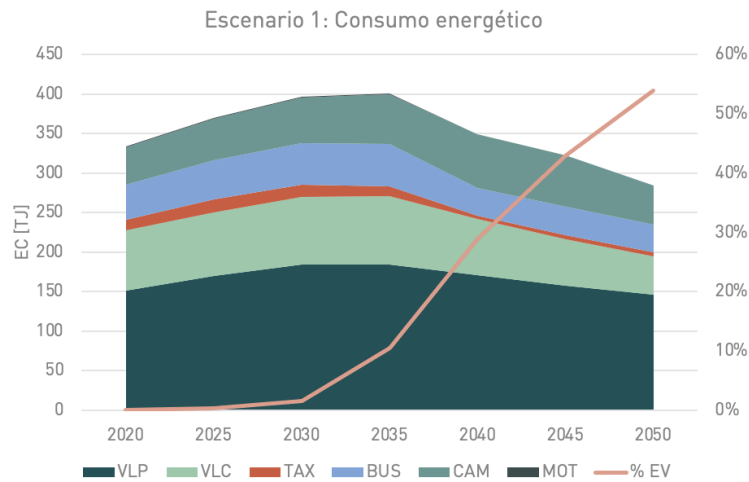


Figura 4.9: Consumo energético modo caminero para Escenario Base

Cuadro 4.8: Porcentajes de variación de las emisiones de CO₂ del transporte terrestre con respecto al año 2020 para el escenario base

	2025/2020	2030/2020	2035/2020	2040/2020	2045/2020	2050/2020
VLP	12 %	21 %	18 %	2 %	-13 %	-27 %
VLC	7 %	13 %	14 %	-6 %	-22 %	-36 %
TAX	20 %	4 %	-19 %	-100 %	-100 %	-100 %
BUS	11 %	19 %	15 %	-38 %	-40 %	-48 %
CAM	12 %	23 %	33 %	41 %	37 %	4 %
MOT	-25 %	-49 %	-66 %	-79 %	-89 %	-95 %
Total	11 %	18 %	17 %	-4 %	-15 %	-30 %

Escenario 1: Emisiones CO ₂							
[kton]	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Total	24364.5	26976.5	28832.8	28499.1	23483.2	20662.7	16969.0
VLP	11012.9	12304.4	13324.1	12962.4	11239.9	9565.1	8040.5
VLC	5534.9	5898.3	6275.0	6297.8	5224.6	4298.5	3555.0
TAX	990.5	1184.6	1029.7	804.3	0.0	0.0	0.0
BUS	3229.1	3594.8	3835.1	3698.6	2004.6	1950.6	1674.0
CAM	3537.3	3949.4	4338.3	4715.8	5001.6	4841.7	3696.3
MOT	59.8	44.9	30.6	20.2	12.6	6.8	3.2

(a) Emisiones CO₂ Escenario Base

Escenario 1: Emisiones CO							
[kton]	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Total	101.41	64.25	54.31	48.05	37.76	31.41	25.91
VLP	52.34	28.29	23.52	21.17	18.13	15.35	12.88
VLC	27.40	19.67	18.42	17.35	14.24	11.67	9.61
TAX	3.69	1.82	1.28	0.93	0.00	0.00	0.00
BUS	7.14	6.07	4.74	3.62	1.37	1.17	0.96
CAM	7.49	6.15	4.89	4.05	3.45	2.92	2.31
MOT	3.35	2.24	1.46	0.93	0.57	0.30	0.14

(b) Emisiones CO Escenario Base

Escenario 1: Emisiones CH ₄							
[kton]	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Total	0.6784	0.4790	0.4219	0.3783	0.2852	0.2431	0.1999
VLP	0.2688	0.1920	0.1879	0.1811	0.1570	0.1335	0.1123
VLC	0.0648	0.0418	0.0409	0.0403	0.0334	0.0276	0.0230
TAX	0.0205	0.0159	0.0132	0.0103	0.0	0.0	0.0
BUS	0.1531	0.1115	0.0869	0.0683	0.0263	0.0228	0.0192
CAM	0.1551	0.1073	0.0861	0.0739	0.0658	0.0576	0.0448
MOT	0.0162	0.0105	0.0069	0.0045	0.0028	0.0015	0.0007

(c) Emisiones CH₄ Escenario Base

Escenario 1: Emisiones NO _x							
[kton]	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Total	72.29	55.66	44.05	35.29	23.99	19.81	16.05
VLP	11.19	7.57	6.71	5.95	5.06	4.27	3.58
VLC	11.68	9.03	7.13	5.67	4.36	3.35	2.57
TAX	0.45	0.28	0.20	0.15	0.00	0.00	0.00
BUS	23.89	19.14	14.47	10.78	3.85	3.19	2.62
CAM	25.04	19.61	15.52	12.73	10.71	9.00	7.29
MOT	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00

(d) Emisiones NO_x Escenario Base

Escenario 1: Emisiones SO _x							
[kton]	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Total	0.7818	0.8660	0.9256	0.9146	0.7534	0.6625	0.5443
VLP	0.3559	0.3977	0.4306	0.4188	0.3632	0.3091	0.2598
VLC	0.1776	0.1895	0.2018	0.2027	0.1682	0.1385	0.1146
TAX	0.0324	0.0387	0.0337	0.0264	0.0000	0.0000	0.0000
BUS	0.1021	0.1137	0.1213	0.1170	0.0634	0.0617	0.0529
CAM	0.1119	0.1249	0.1372	0.1491	0.1582	0.1531	0.1169
MOT	0.0019	0.0015	0.0010	0.0007	0.0004	0.0002	0.0001

(e) Emisiones SO_x Escenario Base

Escenario 1: Emisiones N ₂ O							
[kton]	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Total	0.2081	0.2861	0.3442	0.3777	0.3403	0.3356	0.2663
BUS	0.0841	0.1173	0.1410	0.1445	0.0845	0.0838	0.0720
CAM	0.1220	0.1673	0.2021	0.2325	0.2553	0.2515	0.1941
MOT	0.0020	0.0015	0.0011	0.0007	0.0004	0.0002	0.0001

(f) Emisiones N₂O Escenario Base

Escenario 1: Emisiones PM							
[kton]	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Total	1.5277	1.1151	0.8684	0.6884	0.4818	0.3879	0.3081
VLP	0.1947	0.1561	0.1453	0.1321	0.1130	0.0955	0.0801
VLC	0.4685	0.3375	0.2538	0.1921	0.1422	0.1049	0.0776
TAX	0.0069	0.0071	0.0057	0.0042	0.0	0.0	0.0
BUS	0.4039	0.3017	0.2281	0.1733	0.0739	0.0618	0.0508
CAM	0.4368	0.3017	0.2283	0.1821	0.1499	0.1241	0.0989
MOT	0.0169	0.0110	0.0072	0.0046	0.0029	0.0015	0.0007

(g) Emisiones PM Escenario Base

Escenario 1: Emisiones BC							
[kton]	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Total	0.4583	0.3345	0.2605	0.2065	0.1445	0.1164	0.0924
VLP	0.0584	0.0468	0.0436	0.0396	0.0339	0.0287	0.0240
VLC	0.1405	0.1012	0.0762	0.0576	0.0426	0.0315	0.0233
TAX	0.0021	0.0021	0.0017	0.0013	0.0	0.0	0.0
BUS	0.1212	0.0905	0.0684	0.0520	0.0222	0.0185	0.0152
CAM	0.1311	0.0905	0.0685	0.0546	0.0450	0.0372	0.0297
MOT	0.0051	0.0033	0.0021	0.0014	0.0009	0.0005	0.0002

(h) Emisiones BC Escenario Base

Escenario 1: Emisiones VOC							
[kton]	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Total	7.1976	3.4831	2.5255	2.0674	1.5249	1.2535	0.9950
VLP	3.3045	1.1150	0.7106	0.6061	0.5151	0.4357	0.3655
VLC	1.2054	0.5988	0.4606	0.3825	0.2970	0.2311	0.1812
TAX	0.2346	0.0710	0.0435	0.0312	0.0	0.0	0.0
BUS	0.7848	0.5884	0.4831	0.3988	0.1885	0.1685	0.1424
CAM	0.7911	0.5452	0.4587	0.4131	0.3827	0.3440	0.2710
MOT	0.8771	0.5647	0.3690	0.2356	0.1415	0.0741	0.0348

(i) Emisiones VOC Escenario Base

Escenario 1: Emisiones EC							
[TJ]	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Total	333.27	369.58	396.41	400.37	348.97	322.38	284.09
VLP	151.61	169.49	184.03	184.23	170.53	157.45	146.08
VLC	75.65	80.73	85.99	86.36	71.66	58.98	48.80
TAX	13.85	16.71	14.92	12.75	4.14	4.50	4.86
BUS	43.69	48.83	52.61	53.24	35.09	36.13	34.51
CAM	47.65	53.20	58.44	63.53	67.37	65.22	49.79
MOT	0.83	0.62	0.42	0.28	0.17	0.09	0.04

(j) Emisiones EC Escenario Base

Figura 4.10: Emisiones Escenario Base Modo Caminero por categorías

Para validar el modelo de emisiones nacionales, se realizó una comparación entre los resultados de las emisiones en el escenario base y los resultados publicados en el Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) para el año 2018. Se incluyeron las emisiones de CH₄ y N₂O considerando un GWP en 100 años de 28 y 265, respectivamente, en el modo caminero. Por

lo tanto, se obtiene que el total de emisiones para el sector transporte nacional es un 7,3% más bajo que lo reportado en el INGEI en 2020.

Cuadro 4.9: Comparación de emisiones de CO_{2eq} [kton] en el año 2018 según escenario base e INGEI

2018 [kton CO _{2eq}]	Modelo	INGEI
Ferrovionario	38	149
Aéreo	2145	1902
Marítimo	634	779
Caminero	23700	24600
Total	26516	27430

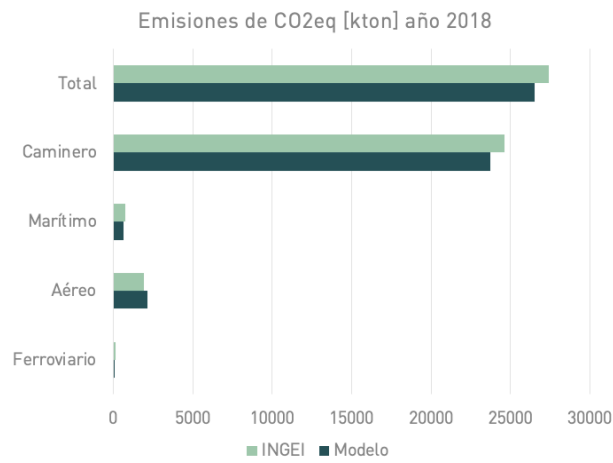


Figura 4.11: Comparación de emisiones de CO_{2eq} [kton] en el año 2018 según escenario base e INGEI

4.2 Escenario electromovilidad acelerada

El segundo escenario de proporción desarrollado considera cambios en el modo caminero introduciendo un mayor crecimiento de la electromovilidad en Chile para alcanzar un 70 % de proporción de flota en 2050.

El escenario se genera sobre la base de proyecciones actualizadas de estudios de Bloomberg NEF, los cuales señalan que en el 2030 un 29 % de las nuevas ventas de autos corresponderán a vehículos cero emisiones. Además, se pronostica que esta participación de mercado aumente a un 70 % para 2040; sin embargo, en el escenario desarrollado se mantiene el límite de 2035 para ventas de vehículos con MCI establecido en la Estrategia de Movilidad 2021 [23].

En el 2020, la participación de mercado de los autos eléctricos en Chile fue de un 0,5 % muy por debajo del promedio global del 7 % y del 11 % en Europa [23]. Sin embargo, se han superado ambas metas de corto plazo decretadas en 2017 en Chile, mencionadas en la sección 2.1. A noviembre de 2021 existen más de 300 electrolinerías en el país - el doble de lo que estipulaba la meta para 2019, y más de 2500 vehículos eléctricos. Además, las ventas globales de EV alcanzarán un nuevo récord en 2021; BNEF espera 5,6 millones de unidades vendidas, lo que corresponde a un aumento del 83 % en comparación al 2020, y del 168 % en comparación al 2019.

Globalmente, las ventas de vehículos eléctricos en 2020 hicieron mella en las ventas de vehículos con motor de combustión interna, debido a que éstas disminuyeron un 16 % a nivel mundial en 2020, lo que permitió a los vehículos eléctricos ganar cuota de mercado.

En Europa, las cuotas de ventas de los autos eléctricos de los mercados de auto más grandes se han incrementado considerablemente en los últimos dos años. De 3 %, 2,8 % y 0,5 % en 2019 a 22 %, 16 % y 8 % en 2021 en Alemania, Francia e Italia, respectivamente, por lo que el escenario planteado es factible al ser un poco más conservador que el mercado italiano, por ejemplo.

De acuerdo a lo anterior, y sobre la base de los antecedentes conocidos, se genera un escenario de electromovilidad acelerada en Chile, que incluye un crecimiento sostenido de entre 80 % y 50 % entre 2022 y 2034, con lo cual se alcanza aproximadamente un 29 % de participación de autos eléctricos en las ventas de autos en 2029, consistente con la proyección de BNEF 2021. Este crecimiento acelerado significa, además, que se alcanzaría un 70,0 % de vehículos cero emisiones en la flota en el año 2050.

Aplicando las mismas tasas de crecimiento en los vehículos comerciales eléctricos se tiene un 63 % de vehículos cero emisiones en la flota en el año 2050.

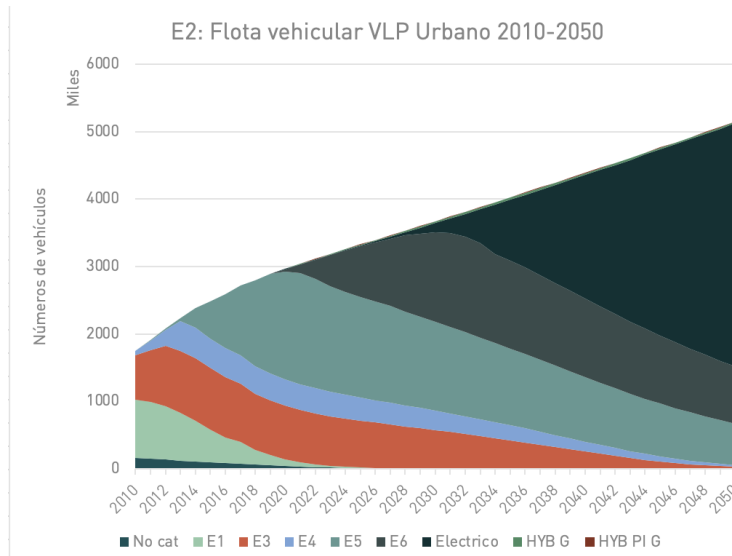


Figura 4.12: Escenario 2: flota VLP

4.2.1 Resultados Escenario Electromovilidad Acelerada

El segundo escenario planteado introduce cambios en las categorías VLP y VLC del modo caminero. Al comparar los gráficos de las emisiones de CO₂ 4.13 y 4.8, se observa un comportamiento similar, pero en el escenario dos el máximo de emisiones anuales se alcanza el 2031, dos años antes que para el primer caso, con un valor de 28589 [kton] anuales, un 2,79 % menos. En la tabla 4.10 se observa cómo los porcentajes de reducción frente al escenario 1 aumentan y alcanzan un 29,4 % de disminución en las emisiones de VLP en 2050.

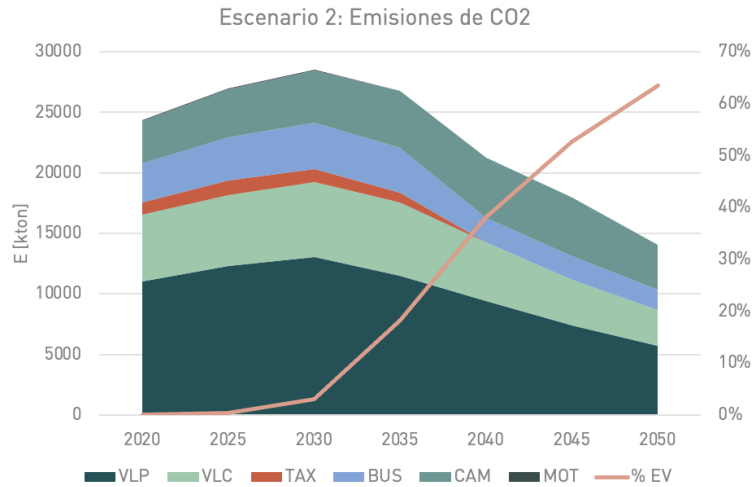


Figura 4.13: Emisiones de CO₂ para Escenario Electromovilidad Acelerada

Cuadro 4.10: Reducción de emisiones de CO₂ en Escenario 2 con respecto al Escenario 1

Categoría	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
VLP	0 %	-0.1 %	-2.2 %	-11.3 %	-16.3 %	-23.0 %	-29.4 %
VLC	0 %	0.0 %	-0.6 %	-4.2 %	-7.4 %	-11.7 %	-14.9 %
Total caminero	0 %	-0.1 %	-1.2 %	-6.1 %	-9.5 %	-13.1 %	-17.0 %

Cuadro 4.11: Reducción de emisiones de CO₂ en Escenario 2 con respecto 2020

Categoría	2025/2020	2030/2020	2035/2020	2040/2020	2045/2020	2050/2020
VLP	12 %	18 %	4 %	-15 %	-33 %	-48 %
VLC	7 %	13 %	9 %	-13 %	-31 %	-45 %
Total caminero	11 %	17 %	10 %	-13 %	-26 %	-42 %

4.3 Escenario intermodal

El tercer escenario proyectado incluye un análisis de cómo se ven afectadas las emisiones del sector transporte al considerar la intermodalidad, específicamente, considerando en la disminución de la actividad del modo caminero en beneficio del aumento de ésta en los modos ferroviario y marítimo. Estos últimos corresponden a los modos de transporte con menos emisiones y más eficientes, respectivamente.

Como se mencionó en la sección 2.4, el transporte ferroviario de pasajeros es el modo más electrificado actualmente. En Chile, los metros urbanos dominan el transporte ferroviario, por lo que en el escenario se consideró el aumento de la actividad ferroviaria en las regiones de Valparaíso, Bío Bío y Metropolitana, donde existen las principales redes de metro. La proporción de actividad de la categoría Vehículos Livianos Pasajeros (VLP) del modo caminero que se consideró como traspaso al modo ferroviario se encuentra en la tabla 4.12.

Años	% C → F
2025-2028	1 %
2029-2030	2 %
2031-2050	3 %

Cuadro 4.12: Transporte de pasajeros escenario intermodal caminero-ferroviario

Con respecto al transporte de carga, se considera la disminución de la actividad de los camiones pesados distribuida en los modos ferroviario y marítimo como indica la tabla 4.13. Se considera una mayor proporción destinada al transporte en buque debido a las altas capacidades de los buques de carga en comparación de la inversión necesaria para aumentar considerablemente la capacidad de carga del modo ferroviario considerando la necesaria ampliación y modernización del sistema.

El cabotaje marítimo en Chile está regulado por la Ley de Fomento a la Marina Mercante (D.L 3.059 de 1979) y actualmente está reservado para naves chilenas con algunas pocas excepciones, por lo que cuenta con altas barreras en términos de la posibilidad de crecimiento del sector, el cual se encuentra desvinculado del crecimiento de la actividad comercial. Sin embargo, existen iniciativas para incentivar el cabotaje en Chile como el Proyecto de Ley ingresado el año 2021 que busca modificar la Ley 3.059 de 1979 y al Decreto de Ley 2.222 de 1978, Ley de Navegación; iniciativa que podría abrir el cabotaje a naves con bandera extranjera y así aumentar la actividad del sector. Este trabajo no tiene como objetivo evaluar positiva o negativamente el impacto que tendría esta política en la seguridad, competitividad y condiciones laborales en la marina mercante chilena, por ejemplo, al provocar una migración al uso de banderas de conveniencia, pero lo considera como ejemplo de una medida que podría aumentar la actividad de cabotaje en Chile.

Años	% C → F	% C → M	Total
2025-2028	1 %	9 %	10 %
2029-2032	2 %	13 %	15 %
2033-2036	3 %	17 %	20 %
2037-2040	4 %	21 %	25 %
2041-2050	5 %	25 %	30 %

Cuadro 4.13: Transporte de carga escenario intermodal caminero-ferroviario-marítimo

4.3.1 Resultados Escenario Intermodal

El tercer escenario incorpora las modificaciones de electromovilidad acelerada e intermodalidad, es decir, modifica tanto la proporción de flota como la actividad. Por lo tanto, se comporta de la misma forma que el segundo escenario planteado, pero con una menor magnitud, como se observa en la figura 4.14 y 4.17 así alcanzando la mayor reducción de emisiones entre los escenarios planteados.

Como se observa en la tabla 4.14, la intermodalidad aplicada en el escenario alcanza un 2,3 % adicional de reducción en las emisiones de CO₂ en los vehículos particulares y un 10 % en las emisiones en conjunto de los camiones livianos, medianos y pesados o un 28,5 % de reducción considerando solo camiones pesados.

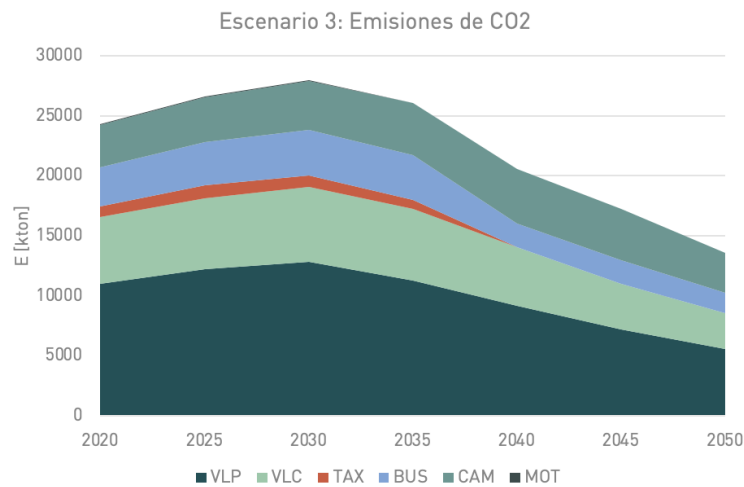


Figura 4.14: Emisiones de CO₂ para Escenario Intermodal (modo caminero)

		Escenario 3: Emisiones de CO ₂ , [kton]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovial	Carga	38.3	59.7	81.5	103.7	126.1	148.9	161.0
Ferrovial	Pasajeros	4.8	6.7	10.7	14.0	10.7	6.1	0.0
Aereo	Pasajeros	2706.5	3520.1	4047.8	4631.0	5071.2	5375.9	5598.0
Marítimo	Carga	716.9	859.3	975.5	1063.9	1146.5	1199.8	1236.3
Caminero	Pasajeros	20739.6	22824.1	23880.6	21720.2	16045.8	12948.4	10250.5
Caminero	Carga	3537.3	3792.1	4078.9	4339.6	4502.6	4263.1	3325.5
Total		27743.42	31061.89	33074.90	31872.28	26902.96	23942.17	20571.37

(a) Emisiones CO₂ Escenario Intermodal

		Escenario 3: Emisiones de CO, [kton]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovial	Carga	-	-	-	-	-	-	-
Ferrovial	Pasajeros	-	-	-	-	-	-	-
Aereo	Pasajeros	3.91	5.02	5.67	6.49	7.11	7.47	7.69
Marítimo	Carga	0.73	0.88	1.00	1.08	1.16	1.22	1.25
Caminero	Pasajeros	93.83	57.77	48.31	40.15	28.28	20.30	14.70
Caminero	Carga	7.49	5.93	4.67	3.84	3.25	2.74	2.20
Total		105.95	69.59	59.65	51.56	39.79	31.72	25.84

(b) Emisiones CO Escenario Intermodal

		Escenario 3: Emisiones de NO _x , [kton]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovial	Carga	0.69	1.08	1.47	1.87	2.28	2.69	2.91
Ferrovial	Pasajeros	0.10	0.17	0.24	0.25	0.19	0.11	0.00
Aereo	Pasajeros	12.66	16.01	17.90	20.12	21.64	22.55	23.03
Marítimo	Carga	17.06	20.19	22.99	25.17	27.21	28.55	29.48
Caminero	Pasajeros	47.32	35.97	28.28	21.70	11.76	8.64	6.36
Caminero	Carga	24.94	19.12	15.06	12.33	10.36	8.71	7.11
Total		102.78	92.55	85.95	81.45	73.46	71.24	68.89

(c) Emisiones NO_x Escenario Intermodal

		Escenario 3: Emisiones de SO _x , [kton]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovial	Carga	-	-	-	-	-	-	-
Ferrovial	Pasajeros	-	-	-	-	-	-	-
Aereo	Pasajeros	-	-	-	-	-	-	-
Marítimo	Carga	1.93	2.34	2.70	2.96	3.20	3.35	3.47
Caminero	Pasajeros	0.67	0.73	0.77	0.70	0.52	0.42	0.33
Caminero	Carga	0.11	0.12	0.13	0.14	0.14	0.13	0.11
Total		2.70	3.19	3.60	3.79	3.86	3.91	3.90

(d) Emisiones SO_x Escenario Intermodal

		Escenario 3: Emisiones de PM, [kton]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovial	Carga	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08
Ferrovial	Pasajeros	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00
Aereo	Pasajeros	0.10	0.13	0.14	0.16	0.17	0.18	0.19
Marítimo	Carga	0.33	0.40	0.46	0.50	0.54	0.57	0.58
Caminero	Pasajeros	1.10	0.81	0.63	0.48	0.27	0.18	0.12
Caminero	Carga	0.43	0.29	0.22	0.17	0.14	0.12	0.09
Total		1.98	1.66	1.50	1.37	1.20	1.12	1.06

(e) Emisiones PM Escenario Intermodal

		Escenario 3: Emisiones de VOC, [kton]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovial	Carga	0.05	0.07	0.10	0.12	0.15	0.18	0.19
Ferrovial	Pasajeros	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
Aereo	Pasajeros	0.59	0.63	0.58	0.58	0.53	0.45	0.34
Marítimo	Carga	0.32	0.38	0.44	0.48	0.52	0.54	0.56
Caminero	Pasajeros	6.40	2.92	2.03	1.54	0.96	0.66	0.46
Caminero	Carga	0.79	0.53	0.44	0.39	0.36	0.32	0.25
Total		8.16	4.55	3.60	3.13	2.53	2.16	1.81

(f) Emisiones VOC Escenario Intermodal

		Escenario 3: Consumo energético (EC), [TJ]						
Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferrovial	Carga	533	839	1157	1489	1833	2190	2400
Ferrovial	Pasajeros	406	737	1098	1457	1604	1738	1860
Aereo	Pasajeros	37074	48219	55448	63437	69467	73641	76684
Marítimo	Carga	9369	11230	12749	13904	14985	15681	16158
Caminero	Pasajeros	284394	313511	330384	313124	253786	224228	199578
Caminero	Carga	47523	51070	54944	58457	60653	57427	44797
Total		379299	425607	455780	451868	402327	374905	341476

(g) Emisiones EC Escenario Intermodal

Figura 4.15: Emisiones Escenario Intermodal

Cuadro 4.14: Variación de emisiones de CO₂ en Escenario 3 con respecto al Escenario 2

Categoría	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
VLP	0 %	-0.8 %	-1.5 %	-2.3 %	-2.3 %	-2.3 %	-2.3 %
CAM	0 %	-4.0 %	-6.0 %	-8.0 %	-10.0 %	-12.0 %	-10.0 %
Total caminero	0 %	-1.3 %	-1.9 %	-2.7 %	-3.4 %	-4.2 %	-3.6 %

Cuadro 4.15: Variación de emisiones de CO₂ en Escenario 3 con respecto al Escenario 1

Modo	Ámbito	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Ferroviario	Carga	0 %	15 %	27 %	36 %	44 %	52 %	50 %
Ferroviario	Pasajeros	0 %	0 %	31 %	82 %	75 %	70 %	0 %
Aéreo	Pasajeros	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
Marítimo	Carga	0 %	2 %	3 %	3 %	4 %	5 %	5 %
Caminero	Pasajeros	0 %	-1 %	-3 %	-9 %	-13 %	-18 %	-23 %
Caminero	Carga	0 %	-4 %	-6 %	-8 %	-10 %	-12 %	-10 %

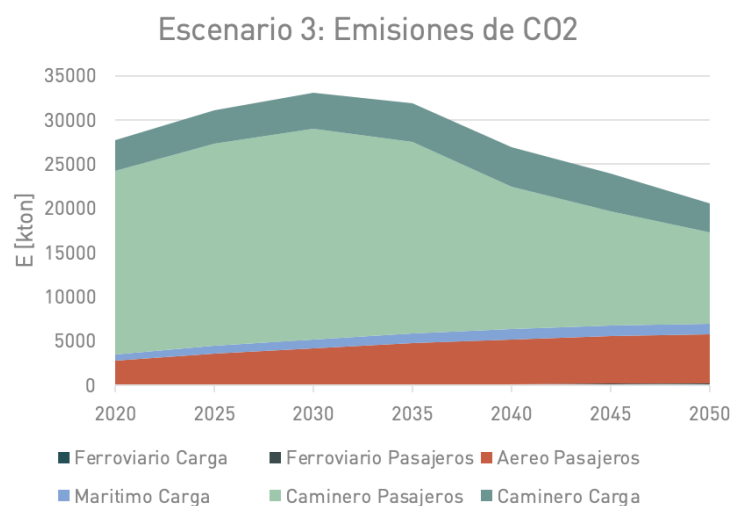


Figura 4.16: Emisiones de CO₂ para Escenario Intermodal

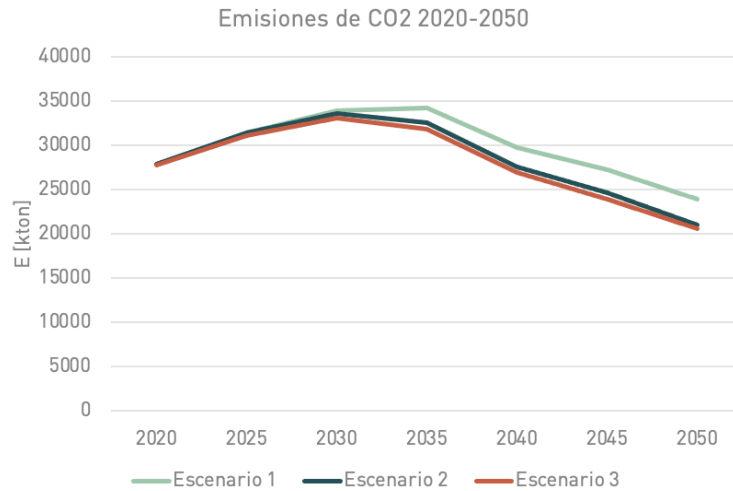


Figura 4.17: Emisiones de CO₂ para todos los escenarios

Cuadro 4.16: Variación de emisiones en Escenario 1 con respecto a 2020 (todos los modos)

Contaminante	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CO ₂	13 %	22 %	23 %	7 %	-2 %	-14 %
EC	13 %	22 %	26 %	14 %	9 %	0 %
CO	-34 %	-43 %	-48 %	-57 %	-62 %	-67 %
NO _x	-10 %	-17 %	-21 %	-29 %	-30 %	-33 %
PM	-16 %	-24 %	-30 %	-38 %	-41 %	-44 %
SO _x	17 %	31 %	39 %	41 %	43 %	42 %
VOC	-44 %	-56 %	-61 %	-67 %	-71 %	-75 %

Cuadro 4.17: Variación de emisiones en Escenario 3 con respecto a 2020 (todos los modos)

Contaminante	2025	2030	2035	2040	2045	2050
CO ₂	12 %	19 %	15 %	-3 %	-14 %	-26 %
EC	12 %	20 %	19 %	6 %	-1 %	-10 %
CO	-34 %	-44 %	-51 %	-62 %	-70 %	-76 %
NO _x	-10 %	-16 %	-21 %	-29 %	-31 %	-33 %
PM	-16 %	-24 %	-31 %	-39 %	-43 %	-46 %
SO _x	18 %	33 %	40 %	43 %	44 %	44 %
VOC	-44 %	-56 %	-62 %	-69 %	-74 %	-78 %

La mayoría de las emisiones son proporcionadas por los vehículos particulares, por lo que se debe priorizar la efectiva reducción en este modo, sobre todo en las ciudades. A pesar de que el precio de los autos eléctricos sigue siendo muy alto, la diferencia en comparación con los autos a gasolina se ha reducido en los últimos años, impulsado en gran medida por una disminución abrupta del precio de las baterías. Esto, en conjunto con el desarrollo de las nuevas tecnologías expuestas en el presente trabajo y la actualización de las normativas para que se incorporen éstas, serán claves en la reducción de emisiones. En general, existen tres vías de reducción de emisiones:

- Cambio modal y de actividad: se refiere a limitar la actividad y utilizar otras soluciones como bicicletas o movilidad compartida en ámbitos urbanos, se puede impulsar desde planes de urbanismo y modelos de negocios innovadores, por ejemplo. A mayor escala, esta vía incluye las modificaciones adoptadas en el tercer escenario, en el que se traspasa actividad de un modo intenso en emisiones a uno más eficiente como el ferroviario y marítimo.
- Mejoras de eficiencia en el uso de combustible: esta opción ya es usada ampliamente y regulada por gobiernos a través de leyes de eficiencia energética que impulsan a la industria a invertir en i+D. Sin embargo, desde el ámbito normativo, constituye un problema en los modos aéreo y marítimo, puesto que a pesar de que existen iniciativas por parte de organizaciones internacionales, estos modos son muy difíciles de fiscalizar debido a que muchas veces la jurisdicción de tales emisiones no es clara.
- Eliminar las emisiones a través de tecnologías: incluye la electrificación directa, los biocombustibles y la electrificación indirecta (hidrógeno y e-fuels) es la opción que más impacto puede tener sin interferir en la movilización de personas y bienes, como se observa en el caso de la electromovilidad que logra disminuir las emisiones de CO₂ en un 48 % al 2050 versus 2020 en el escenario de electromovilidad acelerada.

A continuación se analizan los resultados en comparación con las metas y objetivos planteados en la Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile (ECLP). Este documento presentado en la COP26 plantea que “Chile ha establecido en su Proyecto de Ley Marco de Cambio Climático los principales contenidos de la ECLP, siendo éste el instrumento de largo plazo, que permitirá definir cómo se logrará la meta de la neutralidad de GEI y aumento de resiliencia a más tardar al 2050” [24]. Específicamente, en materias de reducción de emisiones y tecnologías vehiculares del sector energía y transporte, se presentan las siguientes metas que este trabajo puede analizar:

- Objetivo 1: Alcanzar una matriz energética baja en carbono al 2050.
 - Meta 1.2: Al 2040, reducción de un 20 % de las emisiones directas de GEI provenientes del uso de combustibles en el sector transporte (incluido el transporte terrestre,

- marítimo y aéreo) con respecto al 2018.
- Meta 1.3: Al 2050, reducción de un 40 % de las emisiones directas de GEI provenientes del uso de combustibles en el sector transporte (incluido el transporte terrestre, marítimo y aéreo) con respecto al 2018.
 - Objetivo 3: Incrementar el uso de tecnologías y energéticos bajos en emisiones, como por ejemplo el uso de hidrógeno verde, en todos los sectores de la economía.
 - Meta 3.1: Meta 3.1: Al 2035, 100 % de las ventas de vehículos nuevos terrestres, de categoría livianos y medianos, son cero emisiones; y el 100 % de las nuevas incorporaciones en el transporte público urbano (buses, taxis y colectivos) son cero emisiones.
 - Meta 3.2: Al 2030, se alcanza un 15 % de combustibles cero emisiones (tales como hidrógeno verde y sus derivados, y combustibles sintéticos) en los usos energéticos finales no eléctricos.
 - Meta 3.3: Al 2040, el 100 % del parque de buses de transporte urbano público y privado, taxis, y logística urbana son vehículos cero emisión, asegurando contar con la infraestructura necesaria
 - Meta 3.4: Al 2045, el 100 % de las ventas de transporte de carga y buses interurbanos serán cero emisiones.
 - Meta 3.5: Al 2050, alcanzar al menos 60 % de participación de vehículos cero emisiones en el parque de uso particular y comercial, asegurando contar con la infraestructura necesaria.
 - Meta 3.6: Al 2050, se alcanza un al menos un 70 % de combustibles cero emisiones (tales como hidrógeno verde y sus derivados, y combustibles sintéticos) en los usos energéticos finales no eléctricos.

Algunas de las metas del objetivo 3 son consistentes con las ya descritas en las Estrategias de Electromovilidad y son utilizadas para realizar las proyecciones en los escenarios planteados (3.1, 3.3 y 3.4). Así - como se muestra en la tabla 4.18¹ - las metas 1.2 y 1.3 no serían alcanzadas en los escenarios planteados. El nivel de CO_{2eq} para el modo caminero se calcula considerando las emisiones de CH₄ con un GWP de 28 y de 265 para el N₂O. Considerando solo el modo caminero, la meta 1.3 se cumple en los escenarios 2 y 3; sin embargo, la falta de cambios considerables en los modos aéreo y marítimo no alcanzan a disminuir las emisiones en comparación a la elevada alza en la actividad. La meta 3.5 no se cumple en el escenario base pero sí considerando una aceleración en la adopción de la electromovilidad, como en el segundo escenario.

¹C:Caminero / A+M+F:Aéreo, Marítimo y Ferroviario.

Cuadro 4.18: Comparación de CO_{2eq} con respecto al año 2018 para evaluación de metas ECLP

Escenario	Emisiones	CO _{2eq} [kton]			Reducción [%]	
		2018	2040	2050	2040/2018	2050/2018
1	CO _{2eq} (C)	23700	23581	17045	-0.5 %	-28.1 %
	CO ₂ (A+M+F)	2817	6268	6886	122.5 %	144.5 %
	Total	26516	29849	23932	12.6 %	-9.7 %
2	CO _{2eq} (C)	23700	21359	14151	-9.9 %	-40.3 %
	CO ₂ (A+M+F)	2817	6268	6886	122.5 %	144.5 %
	Total	26516	27627	21038	4.2 %	-20.7 %
3	CO _{2eq} (C)	23700	20639	13646	-12.9 %	-42.4 %
	CO ₂ (A+M+F)	2817	6355	6995	125.6 %	148.4 %
	Total	26516	26994	20642	1.8 %	-22.2 %

Capítulo 5

Conclusiones

5.1 Conclusiones generales

El transporte - especialmente en la última década - permite conectar el mundo de múltiples formas, vinculando diferentes culturas a través tanto del comercio como los viajes, lo que también ha hecho surgir metas que se deben perseguir en conjunto, como las relacionadas con el impacto del cambio climático, por lo que resulta paradójico el hecho de que el transporte sea la segunda mayor causa de emisiones de CO₂. Sin embargo, es una realidad ineludible que constituye ahora y a futuro una necesidad básica para el desarrollo humano.

La demanda de transporte seguirá incrementándose hasta al menos el año 2050, impulsada por la aviación, camiones, barcos, y el aumento de disponibilidad de recursos para acceder a vehículos particulares. Junto con la generación de electricidad - que corresponde al mayor contribuyente de emisiones de CO₂, el transporte muestra las mayores tasas de aumento de emisiones en los últimos 30 años, por lo que en el futuro será fundamental introducir innovaciones tanto a nivel tecnológico - en la forma de soluciones bajas o nulas en emisiones, como en políticas públicas y modelos de negocios que permitan seguir impulsando el desarrollo, sobre todo en países con menos recursos.

En el presente trabajo se desarrolló un modelo intermodal para universalizar los criterios y normas que en el futuro próximo debiesen regir el sector de transporte en Chile cumpliendo con las crecientes exigencias de sustentabilidad como demanda mundial con base en el cuidado del medio ambiente, recursos naturales y la salud de sus habitantes.

El objeto de estudio y la metodología empleada son parte de el proyecto STEP 3.0: “Actuali-

zación Metodológica del Modelo de Consumo Energético y Emisiones para el Sector Transporte, Etapa II” que se presenta como una herramienta en la toma de decisiones para contribuir a la solución del problema planteado en el sector transporte.

Se seleccionaron metodologías relevantes y actualizadas con respecto a la determinación de los factores de emisión del sector transporte adecuadas al contexto chileno mediante el uso de fuentes de información oficiales y se implementaron diversas medidas y tecnologías con distintos niveles de ambición en cuando a la mitigación del impacto en el medio ambiente del transporte utilizando los más de 31.000 factores estimados.

5.2 Conclusiones específicas

Con el objetivo de determinar y analizar los factores de emisión y consumo energético del sector transporte en Chile, se estudiaron diversas metodologías para cada modo, considerando los diferentes factores y clasificaciones que influyen en la operación y emisiones asociadas a cada uno, con lo cual se determinaron los factores considerando los niveles más detallados disponibles como sigue:

- Modo terrestre: metodología EMEP/EEA con factores de emisión COPERT 5.4. Los factores se estimaron para 10 categorías principales distintas según su respectiva velocidad, combustible, clase y tecnología del motor, además de la aplicación de factores de degradación. Se utilizaron como fuentes de información las velocidades por región y ámbito (SECTRA), categorías estipuladas en los Decretos 55 (1994) y 211 (1991) del MTT y año de introducción de normas de emisión.
- Modo aéreo: metodología EMEP/EEA que entrega factores desagregados según tipo de aeronave, tipo de motor, altitud, modo de operación y tipo de combustible basados en datos reales de movimientos de vuelos. Los inventarios se modelan utilizando datos sobre el consumo medio de combustible y las emisiones para la fase LTO y las distintas longitudes de la fase CCD, para una serie de modelos de aeronaves representativas de la flota chilena. Se utilizaron como fuentes de información las bitácoras de vuelo de la DGAC.
- Modo marítimo: Entec UK entrega una metodología y base de datos para el cálculo de emisiones, se trabaja con factores de emisión en [g/kWh] desarrollados por SMED los cuales en conjunto con una serie de características tales como potencia de los motores principales y auxiliares, combustible, velocidad del buque y distancia recorrida o tiempo de permanencia en el puerto permiten calcular los factores de emisión finales para cada categoría de buque. Esta metodología es consistente con la metodología Tier 3 basada en

la potencia de EMEP/EEA. Debido a la gran cantidad de variables que se deben utilizar para el cálculo de los factores, las fuentes de información son más diversas e incluyen las metodologías mencionadas además de informes de la DIRECTEMAR.

- Modo ferroviario: metodologías desarrolladas por el EIB y ESRS de IUC considerando los tipos más usados de trenes: eléctricos y diésel. En Chile, se usan los primeros mayoritariamente en transporte de pasajeros, mientras que el transporte de carga se realiza casi exclusivamente con locomotoras diésel. Se utilizan como fuentes de información adicionales los programas EcoPassenger y EcoTransIT World.

Se estudiaron además los proyectos en Chile que comparten el objetivo de contabilizar las emisiones de contaminantes. El proyecto STEP entrega la motivación para este trabajo y el marco bajo el cual se generó la metodología, mientras que los demás estudios entregan una comparación en términos tanto de metodologías usadas - incluyendo medidas incluidas en las proyecciones - como en resultados.

Sobre la base del estudio del sector transporte realizado, se confirma que las metodologías seleccionadas son las adecuadas para desarrollar el modelo y se determinó que los factores más influyentes en cada modo serán las nuevas tecnologías y los cambios en las flotas. En el modo caminero se consideró la introducción de la norma Euro 6/VII en 2022 y las metas propuestas en las Estrategias de Electromovilidad de 2017 y 2021 desde el punto de vista normativo y el uso de vehículos cero emisiones, eléctricos o con celdas de combustible a hidrógeno, desde el punto de vista tecnológico. En el modo aéreo se consideró la alta renovación de flota que caracteriza al sector, especialmente en la compra de aviones pertenecientes a la familia neo de Airbus por parte de las aerolíneas chilenas y la entrada al mercado del modelo en desarrollo AZEROe de la misma empresa manufacturera. En cuanto al modo marítimo, se consideró la última regulación de límites de SO_x de la OMI que entró en vigor en 2020 la cual rebaja el límite de 3,5 % (m/m) a 0,5 % del HFO utilizado a bordo, lo que impacta las emisiones con reducciones del orden de 82 % para SO_x , 4 % para CO_2 y 13 % para NO_x y se consideró, además, la inclusión de nuevos combustibles en los buques de carga: hidrógeno y metanol. Finalmente, en el modo ferroviario se consideraron las tendencias que han caracterizado al sector en los últimos años y se consideró que el 100 % de los trenes de pasajeros son eléctricos al 2050.

Finalmente, se generaron tres escenarios de proyección de emisiones: un escenario base, un escenario de electromovilidad acelerada y un escenario intermodal. En el escenario base se alcanza una participación de vehículos eléctricos en el parque vehicular de 57 % para vehículos livianos de pasajeros y 38.5 % para camiones al 2050. El segundo escenario considera una aceleración

en la adopción de vehículos eléctricos en los vehículos de pasajeros, para alcanzar un 70 % de participación en el parque al 2050 y 63 % para vehículos livianos comerciales, lo cual genera una reducción en emisiones de CO₂ adicional de 17 % en el modo caminero en comparación al escenario base al 2050. El tercer escenario evalúa además el impacto que tienen en las emisiones los cambios donde se disminuye la actividad del modo caminero para que sea absorbida por modos menos intensos en emisiones como el ferroviario y marítimo. Con lo cual se obtiene una reducción adicional de emisiones de CO₂ del 3,6 % en el modo caminero.

El análisis llevado a cabo demuestra el impacto que ciertas medidas tecnológicas y normativas pueden tener en la mitigación del impacto en el medio ambiente del sector transporte, como la adopción de la electromovilidad en el modo caminero, y cómo la falta de estas medidas en los modos aéreo y marítimo aleja al sector de las metas de reducción de emisiones propuestas.

5.3 Recomendaciones

Una de las principales dificultades es la obtención de información específica y oficial sobre los modos de transporte que permitiría una mayor desagregación en las categorías consideradas. Por ejemplo, incluir los SUV que cada vez representan mayor porcentaje de las ventas y tienen factores de emisión más altos o desagregar los factores del modo marítimo según puerto considerando tiempo de estadía promedio en cada uno.

Continuando con lo anterior, se podrían agregar emisiones de N₂O para vehículos livianos, las cuales dependen del kilometraje de los vehículos según norma de emisión, información que no se encuentra disponible. De la misma forma, no se incluyeron algunos factores de consumo energético de ciertos vehículos eléctricos por no poder unificar las fuentes de información en cuanto a los factores debido a que estos no estaban disponibles en la base de datos provista por COPERT.

Con el fin de poder profundizar en el análisis y expandir el alcance del trabajo, sería recomendable realizar una proyección propia de la actividad y poder incluir cambios modales más variados para evaluar las diferentes vías de reducción de emisiones en conjunto y cómo se relacionan entre ellas.

Es también importante destacar la importancia de la actualización periódica de acuerdo a las nuevas estrategias y metas propuestas en estas según se desarrollen las posibilidades tanto

tecnológicas como de movilidad inteligente.

Finalmente, fuera del alcance del proyecto está la inclusión de medidas operacionales que afectan los factores de emisión. Como por ejemplo, cambios de velocidad en los modos marítimos y camineros o adopción de ajustes tecnológicos de reducción de consumo de combustible como dispositivos de punta alar en aviones, de lo que existe muy poca información disponible como para ser considerado.

Anexos

Apéndice A

Procesamiento de bases de datos

A.1 Modo Caminero

A.1.1 COPERT 5.4

```
[ ]: from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')
```

```
[ ]: %cd "/content/drive/MyDrive/Colab Notebooks/STEP3-Colab/1_Caminero/211124_1_Caminero"
!ls
```

```
[ ]: import pandas as pd
import numpy as np
```

```
[ ]: xls = pd.ExcelFile('Copert5-202009.xlsx')
df = pd.read_excel(xls, 'HOT_EMISSIONS_PARAMETERS', index_col=None)
```

```
[ ]: #Reduciendo a gasolina/diesel y normas (se eliminan normas ECE, 6 a/b/c y 6 d-temp y
→otras)
df = df.loc[
    #Combustible
    ((df['Fuel'] == 'Petrol') |
     (df['Fuel'] == 'Diesel') |
     (df['Fuel'] == 'Petrol Hybrid') |
     (df['Fuel'] == 'Petrol PHEV ~ Petrol') |
     (df['Fuel'] == 'Petrol PHEV ~ Electricity') |
     (df['Fuel'] == 'Diesel PHEV ~ Diesel') | # solo SUV
     (df['Fuel'] == 'LPG Bifuel ~ LPG') |
     (df['Fuel'] == 'CNG Bifuel ~ CNG') |
     (df['Fuel'] == 'Diesel Hybrid ~ Electricity') # Buses
    ) &
    #Euro
    (
     (df['Euro Standard'] == 'PRE ECE') |
     (df['Euro Standard'] == 'Euro 1') |
     (df['Euro Standard'] == 'Euro 2') |
     (df['Euro Standard'] == 'Euro 3') |
```

```

(df['Euro Standard'] == 'Euro 4') |
(df['Euro Standard'] == 'Euro 5') |
(df['Euro Standard'] == 'Euro 6 d') |
(df['Euro Standard'] == 'Conventional') |
(df['Euro Standard'] == 'Euro I') |
(df['Euro Standard'] == 'Euro II') |
(df['Euro Standard'] == 'Euro III') |
(df['Euro Standard'] == 'Euro IV') |
(df['Euro Standard'] == 'Euro V') |
(df['Euro Standard'] == 'Euro VI') |
(df['Euro Standard'] == 'Euro VI D/E') |
(df['Euro Standard'] == 'EEV') # Buses CNG
)
]
df.to_excel('C5_reducido.xlsx', index = False)

```

```

[ ]: #Reduciendo COPERT 5 Para utilizar solo las categorias necesarias
#Clasificacion basada en decretos 55-16 Abr 1994 (pesados) y 211-11 Dic 1991 (livianos)
df = pd.read_excel('C5_reducido.xlsx')
df = df.loc[
    (df['Segment'] == 'Medium' ) | #VLP, TAX
    ((df['Segment'] == 'Large-SUV-Executive') & (df['Fuel'] == 'Diesel PHEV ~
↳Diesel')) | #
    (df['Segment'] == 'N1-II' ) | #VLC
    (df['Segment'] == 'Rigid <=7,5 t' ) | #CAM LIV
    (df['Segment'] == 'Rigid 12 - 14 t' ) | #CAM MED
    (df['Segment'] == 'Rigid 20 - 26 t' ) | #CAM PES
    (df['Segment'] == 'Urban Buses Standard 15 - 18 t' ) | #BUS RIG
    (df['Segment'] == 'Urban Buses Diesel Hybrid' ) | #BUS RIG
    (df['Segment'] == 'Urban Buses Articulated >18 t' ) | #BUS ART
    (df['Segment'] == 'Coaches Standard <=18 t' ) | #BUS INT PROV
    (df['Segment'] == 'Motorcycles 2-stroke >50 cm³' ) #MOT
]
df.to_excel('C5_reducido.xlsx', index = False)

```

```

[ ]: #Cambiando a la clasificacion a utilizar
df.loc[df['Segment'] == 'Medium', 'Segment'] = 'VLP'
df.loc[df['Segment'] == 'Large-SUV-Executive', 'Segment'] = 'VLP'
df.loc[df['Segment'] == 'N1-II', 'Segment'] = 'VLC'
df.loc[df['Segment'] == 'Rigid <=7,5 t', 'Segment'] = 'CAM LIV'
df.loc[df['Segment'] == 'Rigid 12 - 14 t', 'Segment'] = 'CAM MED'
df.loc[df['Segment'] == 'Rigid 20 - 26 t', 'Segment'] = 'CAM PES'
df.loc[df['Segment'] == 'Urban Buses Standard 15 - 18 t', 'Segment'] = 'BUS RIG'
df.loc[df['Segment'] == 'Urban Buses Diesel Hybrid', 'Segment'] = 'BUS RIG'
df.loc[df['Segment'] == 'Urban Buses Articulated >18 t', 'Segment'] = 'BUS ART'
df.loc[df['Segment'] == 'Coaches Standard <=18 t', 'Segment'] = 'BUS INT PROV'
df.loc[df['Segment'] == 'Motorcycles 2-stroke >50 cm³', 'Segment'] = 'MOT'
df.to_excel('C5_reducido.xlsx', index = False)

```

```

[ ]: #Cambiando a la clasificacion a usar
df.loc[df['Euro Standard'] == 'PRE ECE', 'Euro Standard'] = 'No cat'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro 1', 'Euro Standard'] = 'E1'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro 2', 'Euro Standard'] = 'E2'

```

```

df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro 3', 'Euro Standard'] = 'E3'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro 4', 'Euro Standard'] = 'E4'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro 5', 'Euro Standard'] = 'E5'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro 6 d', 'Euro Standard'] = 'E6'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Conventional', 'Euro Standard'] = 'No cat'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro I', 'Euro Standard'] = 'E1'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro II', 'Euro Standard'] = 'E2'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro III', 'Euro Standard'] = 'E3'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro IV', 'Euro Standard'] = 'E4'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro V', 'Euro Standard'] = 'E5'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro VI', 'Euro Standard'] = 'E6'
df.loc[df['Euro Standard'] == 'Euro VI D/E', 'Euro Standard'] = 'E6'
df.loc[df['Fuel'] == 'Petrol', 'Fuel'] = 'Gasolina'

df.loc[df['Fuel'] == 'Petrol Hybrid', 'Fuel'] = 'HYB G'
df.loc[df['Fuel'] == 'Petrol PHEV ~ Petrol', 'Fuel'] = 'HYB PI G'
df.loc[df['Fuel'] == 'Petrol PHEV ~ Electricity', 'Fuel'] = 'Electrico'
df.loc[df['Fuel'] == 'Diesel PHEV ~ Diesel', 'Fuel'] = 'HYB PI D'
df.loc[df['Fuel'] == 'LPG Bifuel ~ LPG', 'Fuel'] = 'GLP'
df.loc[df['Fuel'] == 'CNG Bifuel ~ CNG', 'Fuel'] = 'GNC'
df.loc[df['Fuel'] == 'Diesel Hybrid ~ Electricity', 'Fuel'] = 'Electrico'

df.to_excel('C5_reducido.xlsx', index = False)

```

```

[ ]: df = pd.read_excel('C5_reducido.xlsx')
df = df.loc[
    #Todo lo en blanco
    (df['Technology'].isnull() |
    #Passenger Cars
    ((df['Category'] == 'Passenger Cars') &
    (df['Technology'] == 'GDI') | (df['Technology'] == 'DPF')) |
    #Light Commercial Vehicles
    ((df['Category'] == 'Light Commercial Vehicles') &
    (df['Technology'] == 'PFI') | (df['Technology'] == 'DPF')) |
    #Buses
    ((df['Category'] == 'Buses') &
    (df['Technology'] == 'SCR') | (df['Technology'] == 'DPF+SCR')) |
    #Heavy Duty Trucks
    ((df['Category'] == 'Heavy Duty Trucks') &
    (df['Technology'] == 'SCR') | (df['Technology'] == 'DPF+SCR'))
    ]
    #Motorcycles no requieren filtro
df.to_excel('C5_reducido.xlsx', index = False)

```

```

[ ]: df = pd.read_excel('C5_reducido.xlsx')
df = df.loc[ ((df['Road Slope'].isnull()) & (df['Load'].isnull())) |
    ((df['Road Slope'] == 0) & (df['Load'] == 0.5))
    ]
df.to_excel('C5_reducido.xlsx', index = False)

```

```

[ ]: df = pd.read_excel('C5_reducido.xlsx')
df = df.loc[
    df['Mode'].isnull() |

```

```

        (df['Mode'] == 'Highway') |
        (df['Mode'] == 'Urban Off Peak')
    ]
df.loc[df['Mode'] == 'Highway', 'Mode'] = 'Interurbano'
df.loc[df['Mode'] == 'Urban Off Peak', 'Mode'] = 'Urbano'
df.to_excel('C5_reducido.xlsx', index = False)

```

```

[ ]: df.loc[df['Fuel'] == 'Electrico', 'Euro Standard'] = ''
df.loc[df['Pollutant'] == 'PM Exhaust', 'Pollutant'] = 'PM'
df.to_excel('C5_reducido.xlsx', index = False)

```

A.1.2 Factores de emisión y consumo energético

```

[ ]: from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

```

```

[ ]: %cd "/content/drive/MyDrive/Colab Notebooks/STEP3-Colab/1_Caminero/211124_1_Caminero"
!ls

```

```

[ ]: import pandas as pd
import numpy as np

```

```

[ ]: # Se define la formula de COPERT 5.4
def factor_emision(A,B,C,D,E,F,G,f,v) -> float:
    if (E*v*v + F*v + G) == 0:
        return 0
    else:
        return ( A*v*v + B*v + C + (D/v) ) / (E*v*v + F*v + G) * (1 - f)

```

```

[ ]: contaminantes = ['CO', 'NOx', 'VOC', 'N2O', 'PM', 'CH4', 'N2O']
dfS = pd.read_excel('211124_Velocidades.xlsx')
for cont in contaminantes:
    df = pd.read_excel('C5_reducido.xlsx')
    dfNew = df.copy()
    df = df.loc[df['Pollutant'] == cont]
    for i, row in dfS.iterrows(): # i posicion, row objeto en esa posicion en este caso
        →la fila del DF
        Cnst = df.loc[ (df['Fuel'] == row['Motorizacion']) & (df['Segment'] ==
        →row['Categoria']) & (df['Euro Standard'] == row['Norma']) & ((df['Mode'] ==
        →row['Ambito']) | (df['Mode'].isnull()))]
        if not Cnst.empty: # Si existe las constantes se extraen
            a = Cnst.iloc[0]['Alpha']
            b = Cnst.iloc[0]['Beta']
            c = Cnst.iloc[0]['Gamma']
            d = Cnst.iloc[0]['Delta']
            e = Cnst.iloc[0]['Epsilon']
            f = Cnst.iloc[0]['Zita']
            g = Cnst.iloc[0]['Hta']
            r = Cnst.iloc[0]['Reduction Factor [%]']
            if not row.empty:
                dfNew.loc[i, 'Unidad'] = '[g/km]' #Cambia unidad del FE
                for j in dfS.columns[6:]:

```

```

        rfactor = factor_emision(a,b,c,d,e,f,g,r,row[j])
        dfNew.at[i,j] = float(rfactor)
dfNew.to_csv('C_'+cont+'_FE.csv',sep=',',index = False)

```

```

[ ]: # CO2 SOx EC
dfS = pd.read_excel('211124_Velocidades.xlsx')
dfNew_co2 = dfS.copy()
dfNew_sox = dfS.copy()
dfNew_ec = dfS.copy()
dfC5 = pd.read_excel('C5_reducido.xlsx')
dfCO2 = dfC5.loc[dfC5['Pollutant'] == 'EC']
for i, row in dfS.iterrows():
    Cnst = dfCO2.loc[(dfCO2['Fuel'] == row['Motorizacion']) & (dfCO2['Segment'] ==_
→row['Categoria']) & (dfCO2['Euro Standard'] == row['Norma'])]
    if not Cnst.empty:
        a_co2 = Cnst.iloc[0]['Alpha']
        b_co2 = Cnst.iloc[0]['Beta']
        c_co2 = Cnst.iloc[0]['Gamma']
        d_co2 = Cnst.iloc[0]['Delta']
        e_co2 = Cnst.iloc[0]['Epsilon']
        f_co2 = Cnst.iloc[0]['Zita']
        g_co2 = Cnst.iloc[0]['Hta']
        r_co2 = Cnst.iloc[0]['Reduction Factor [%]']
        dfNew_co2.loc[i,'Unidad'] = '[g/km]'
        dfNew_sox.loc[i,'Unidad'] = '[g/km]'
        dfNew_ec.loc[i,'Unidad'] = '[MJ/km]'
    for j in dfS.columns[6:]:
        rfactor = factor_emision(a_co2,b_co2,c_co2,d_co2,e_co2,f_co2,g_co2,r_co2,row[j])
        dfNew_ec.at[i,j] = float(rfactor)
        if row['Motorizacion'] == 'Gasolina':
            rfactor_co2 = 44.011 * ((rfactor*1000 / 43.774) / (12.011 + 1.008 * 1.86))
            rfactor_sox = 2 * 5 * (10 ** (-5)) * ((rfactor * 1000) / 42.6)
        elif row['Motorizacion'] == 'HYB G':
            rfactor_co2 = 44.011 * ((rfactor*1000 / 43.774) / (12.011 + 1.008 * 1.86))
            rfactor_sox = 2 * 5 * (10 ** (-5)) * ((rfactor * 1000) / 42.6)
        elif row['Motorizacion'] == 'HYB PI G':
            rfactor_co2 = 44.011 * ((rfactor*1000 / 43.774) / (12.011 + 1.008 * 1.86))
            rfactor_sox = 2 * 5 * (10 ** (-5)) * ((rfactor * 1000) / 42.6)
        elif row['Motorizacion'] == 'Diesel':
            rfactor_co2 = 44.011 * ((rfactor*1000 / 42.695) / (12.011 + 1.008 * 1.86))
            rfactor_sox = 2 * 5 * (10 ** (-5)) * ((rfactor * 1000) / 42.6)
        elif row['Motorizacion'] == 'HYB PI D':
            rfactor_co2 = 44.011 * ((rfactor*1000 / 42.695) / (12.011 + 1.008 * 1.86))
            rfactor_sox = 2 * 5 * (10 ** (-5)) * ((rfactor * 1000) / 42.6)
        elif row['Motorizacion'] == 'GLP':
            rfactor_co2 = 44.011 * ((rfactor*1000 / 46.564) / (12.011 + 1.008 * 2.525))
            rfactor_sox = 2 * 5 * (10 ** (-5)) * ((rfactor * 1000) / 42.6)
        elif row['Motorizacion'] == 'GNC':
            rfactor_co2 = 44.011 * ((rfactor*1000 / 48) / (12.011 + 1.008 * 4))
            rfactor_sox = 2 * 5 * (10 ** (-5)) * ((rfactor * 1000) / 42.6)
        dfNew_co2.at[i,j] = float(rfactor_co2)
        dfNew_sox.at[i,j] = float(rfactor_sox)
dfNew_co2.to_csv('C_CO2_FE.csv',sep=',',index = False)

```

```
dfNew_sox.to_csv('C_SOx_FE.csv',sep=',',index = False)
dfNew_ec.to_csv('C_EC_FE.csv',sep=',',index = False)
```

```
[ ]: # Solo EC
dfS = pd.read_excel('211124_Velocidades.xlsx')
dfNew_ec = dfS.copy()
dfC5 = pd.read_excel('C5_reducido.xlsx')
dfCO2 = dfC5.loc[dfC5['Pollutant'] == 'EC']
for i, row in dfS.iterrows():
    if row['Motorizacion'] == 'Electrico':
        Cnst = dfCO2.loc[(dfCO2['Fuel'] == row['Motorizacion']) & (dfCO2['Segment'] ==
        →row['Categoria'])]
    else:
        Cnst = dfCO2.loc[(dfCO2['Fuel'] == row['Motorizacion']) & (dfCO2['Segment'] ==
        →row['Categoria']) & (dfCO2['Euro Standard'] == row['Norma'])]
    if not Cnst.empty:
        a_co2 = Cnst.iloc[0]['Alpha']
        b_co2 = Cnst.iloc[0]['Beta']
        c_co2 = Cnst.iloc[0]['Gamma']
        d_co2 = Cnst.iloc[0]['Delta']
        e_co2 = Cnst.iloc[0]['Epsilon']
        f_co2 = Cnst.iloc[0]['Zita']
        g_co2 = Cnst.iloc[0]['Hta']
        r_co2 = Cnst.iloc[0]['Reduction Factor [%]']
        dfNew_ec.loc[i,'Unidad'] = '[MJ/km]'
        for j in dfS.columns[6:]:
            rfactor = factor_emision(a_co2,b_co2,c_co2,d_co2,e_co2,f_co2,g_co2,r_co2,row[j])
            dfNew_ec.at[i,j] = float(rfactor)
dfNew_ec.to_csv('C_EC_FE.csv',sep=',',index = False)
```

```
[ ]: dfPM = pd.read_csv('C_PM_FE.csv', delimiter = ',')
dfBC = dfPM.copy()
for i, row in dfBC.iterrows():
    if row['Unidad'] == '[g/km]':
        for j in dfBC.columns[-61:]:
            dfBC.at[i,j] = dfBC.at[i,j]*0.3
dfBC.to_csv('C_BC_FE.csv', sep=',', index = False)
```

```
[ ]: # Factores electricos
Archivos = ['C_EC_FE.csv'], #, 'C_CO2_FE.csv', 'C_SOx_FE.csv', 'C_VOC_FE.csv', 'C_CH4_FE.
→csv', 'C_CO_FE.csv', 'C_NOx_FE.csv', 'C_BC_FE.csv', 'C_PM_FE.csv', 'C_N2O_FE.csv',
→'C_EC_FE.csv']
for file in Archivos:
    df = pd.read_csv(file, delimiter = ',')
    for i, row in df.iterrows():
        if (row['Motorizacion'] == 'Electrico') & (row['Unidad'] == '[m/s]'):
            df.loc[i,'Unidad'] = df.loc[4,'Unidad']
            #if file.replace('_FE.csv','').replace('C_', '') == 'EC':
            #df.loc[i,'Unidad'] = '[MJ/km]'
            for j in df.columns[-61:]: # j: años
                efactor = 0
                df.at[i,j] = efactor
    df.to_csv(file,sep=',',index = False)
```

```
[ ]: #Euro 7
Archivos = ['C_EC_FE.csv', 'C_CO2_FE.csv', 'C_SOx_FE.csv', 'C_VOC_FE.csv', 'C_CH4_FE.
→csv', 'C_NOx_FE.csv', 'C_BC_FE.csv', 'C_PM_FE.csv', 'C_N2O_FE.csv', 'C_CO_FE.csv']
#df_E7 = read
for file in Archivos: #Con este for entrar al contaminante
    df = pd.read_csv(file,engine='python',delimiter = ',', encoding = 'latin1')
    for i, row in df.iterrows():
        if i > 5:
            #Aux = df_E7.loc[ (df_E7['Categoria'] == row['Categoria']) &
→(df_E7['Motorizacion'] == row['Motorizacion']) & (df_E7['Contaminante'] == file.
→replace('_factors.csv',''))]
            #if not row.empty:
            if row['Norma'] == 'Norm. 1':
                E6_row = df.loc[i-1,:]
                df.loc[i, 'Unidad'] = E6_row['Unidad']
                for j in df.columns[-61:]:
                    #factor = Aux['E7/E6']
                    #E7 = factor * E6_row[j]
                    E7 = float(E6_row[j]) #Se deja igual a Euro 6
                    df.at[i,j] = E7
            df.to_csv(file,sep=',',index = False)
```

```
[ ]: #Completar TAX
Archivos = [ 'C_EC_FE.csv', 'C_CO2_FE.csv', 'C_SOx_FE.csv', 'C_VOC_FE.csv', 'C_CH4_FE.
→csv', 'C_CO_FE.csv', 'C_NOx_FE.csv', 'C_BC_FE.csv', 'C_PM_FE.csv', 'C_N2O_FE.csv']
for file in Archivos:
    df = pd.read_csv(file,engine='python',delimiter = ',', encoding = 'latin1')
    for i, row in df.iterrows():
        if row['Categoria'] == 'TAX':
            if row['Motorizacion'] == 'Electrico':
                VLP_row = df.loc[ (df['Region'] == row['Region']) & (df['Ambito'] ==
→row['Ambito']) & (df['Categoria'] == 'VLP') & (df['Motorizacion'] ==
→row['Motorizacion'])]
            else:
                VLP_row = df.loc[ (df['Region'] == row['Region']) & (df['Ambito'] ==
→row['Ambito']) & (df['Categoria'] == 'VLP') & (df['Motorizacion'] ==
→row['Motorizacion']) & (df['Norma'] == row['Norma'])]
            if not VLP_row.empty:
                df.loc[i, 'Unidad'] = VLP_row.iloc[0]['Unidad']
                for j in df.columns[-61:]:
                    tax = float(VLP_row[j])
                    df.at[i,j] = tax
            df.to_csv(file,sep=',',index = False)
```

```
[ ]: #Borrar velocidad de categorias no usadas
Archivos = [ 'C_EC_FE.csv', 'C_CO2_FE.csv', 'C_SOx_FE.csv', 'C_VOC_FE.csv', 'C_CH4_FE.
→csv', 'C_CO_FE.csv', 'C_NOx_FE.csv', 'C_BC_FE.csv', 'C_PM_FE.csv', 'C_N2O_FE.csv']
for file in Archivos:
    df = pd.read_csv(file,engine='python',delimiter = ',', encoding = 'latin1')
    for i, row in df.loc[df['Unidad']=='[m/s]'].iterrows():
```

```

for j in df.columns[-61:]:
    df.at[i,j] = 0
df.to_csv(file,sep=',',index = False)

```

```

[ ]: #Factores de deterioro
Archivos = ['C_VOC_FE.csv','C_CO_FE.csv','C_NOx_FE.csv']
#xlsDeg = pd.ExcelFile('C_Deterioro.xls')
xls = pd.ExcelFile('211124_DET.xlsx')

for file in Archivos:
    cont = file.replace('_FE.csv','').replace('C_','')
    dfF = pd.read_csv(file, engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='.')
    dfDet = pd.read_excel(xls,'DET '+cont, index_col=None)
    dfDet.columns = dfDet.columns.map(str)
    #Se extraen columnas 1990-2050 para poder cross-multiply dfs
    colsf = list(dfF.columns)
    dfi = dfF[colsf[:6]] # se extrae formato
    dfF = dfF[colsf[-61:]]
    colsd = list(dfDet.columns)
    dfDet = dfDet[colsd[-61:]]
    dfN = dfF.mul(dfDet, axis='columns') # multiplicacion
    dfN = pd.concat([dfi, dfN], axis=1) # se vuelve al formato

    dfN.to_csv(file,sep=',',index = False, decimal='.')

```

```

[ ]: df = pd.read_csv('C_EC_FE.csv', engine='python',delimiter = ',', encoding = 'latin1')
df = df.loc[ df['Unidad'] == 'MJ/km' ]
df.to_csv('STEP_C_EC_FE.csv',sep=',',index = False, decimal='.')

```

```

[ ]: Archivos = ['C_CO2_FE.csv','C_SOx_FE.csv','C_VOC_FE.csv','C_CH4_FE.csv','C_CO_FE.
→csv','C_NOx_FE.csv','C_BC_FE.csv','C_PM_FE.csv','C_N2O_FE.csv']
for file in Archivos:
    df = pd.read_csv(file, engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='.')
    df = df.loc[ df['Unidad'] == '[g/km]' ]
    df.to_csv('STEP'+file,sep=',',index = False, decimal='.')

```

A.1.3 Emisiones

Escenario 1: Escenario Base

```

[ ]: def multiplicar_df(df1,df2):
    df1.columns = df1.columns.map(str)
    df2.columns = df2.columns.map(str)
    col1 = list(df1.columns)
    dfi = df1[col1[:6]] # se extrae formato
    df1 = df1[col1[-61:]]
    col2 = list(df2.columns)
    df2 = df2[col2[-61:]]
    dfN = df1.mul(df2, axis='columns') # multiplicacion
    dfN = pd.concat([dfi, dfN], axis=1) # se vuelve al formato
    return dfN

```

```
[ ]: df = pd.read_excel('211214_FP_C_Esc1_VEH.xlsx')

dfS = pd.read_excel('211124_Velocidades.xlsx')
dfNew = dfS.copy()
for i, row in dfS.iterrows():
    if row['Motorizacion'] == 'Electrico':
        Cnst = df.loc[(df['Motorizacion'] == row['Motorizacion']) & (df['Categoria'] == row['Categoria']) & (df['Ambito'] == row['Ambito'])]
    else:
        Cnst = df.loc[(df['Motorizacion'] == row['Motorizacion']) & (df['Categoria'] == row['Categoria']) & (df['Norma'] == row['Norma']) & (df['Ambito'] == row['Ambito'])]
    if not Cnst.empty:
        if not row.empty:
            dfNew.loc[i, 'Unidad'] = '[veh]'
            for j in dfS.columns[6:]:
                dfNew.at[i, j] = float(Cnst[int(j)])
dfNew.to_csv('FP_C_Esc1_VEH.csv', sep=',', index = False, decimal='.')
```

```
[ ]: df = pd.read_csv('FP_C_Esc1_VEH.csv')
for i, row in df.iterrows():
    if row['Unidad'] == '[m/s]':
        df.loc[i, 'Unidad'] = '[veh]'
    for j in df.columns[-61:]:
        df.at[i, j] = 0
df.to_csv('FP_C_Esc1_VEH.csv', sep=',', index = False, decimal='.')
```

```
[ ]: dfFP = pd.read_csv('FP_C_Esc1_VEH.csv', engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='.')
dfR = pd.read_excel('Regiones.xlsx')

dfN = multiplicar_df(dfFP, dfR)
dfN.to_csv('FP_C_Esc1_VEH_R.csv', sep=',', index = False, decimal='.')
```

```
[ ]: Archivos = ['C_EC_FE.csv', 'C_CO2_FE.csv', 'C_SOx_FE.csv', 'C_VOC_FE.csv', 'C_CH4_FE.csv', 'C_CO_FE.csv', 'C_NOx_FE.csv', 'C_BC_FE.csv', 'C_PM_FE.csv', 'C_N2O_FE.csv']
dfFP = pd.read_csv('FP_C_Esc1_VEH_R.csv', engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='.')

for file in Archivos:
    cont = file.replace('_FE.csv', '').replace('C_', '')
    dfFE = pd.read_csv(file, engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='.')
    dfN = multiplicar_df(dfFE, dfFP)
    dfN.to_csv(file.replace('_FE.csv', '_FEFP.csv'), sep=',', index = False, decimal='.')
```

```
[ ]: dfA = pd.read_csv('Actividad Vehicular.csv', engine = 'python', delimiter = ';', decimal = ',', encoding = 'latin1')
dfA = dfA.rename({'Región': 'Region', 'Ámbito': 'Ambito', 'Categoría': 'Categoria'}, axis = 'columns')
dfA.to_csv('Actividad.csv', sep=',', index = False, decimal='.')
```

```
[ ]: df = pd.read_csv('Actividad.csv') # km por año por categoría, ámbito y región
dfS = pd.read_excel('211124_Velocidades.xlsx')
dfNew = dfS.copy()
for i, row in dfS.iterrows():
    Cnst = df.loc[ (df['Categoria'] == row['Categoria']) & (df['Region'] ==
→row['Region']) & (df['Ambito'] == row['Ambito'])] #(df['Motorizacion'] ==
→row['Motorizacion']) &
    Cnst = Cnst.reset_index()
    if row['Categoria'] == 'BUS ART':
        Cnst = df.loc[ (df['Categoria'] == 'BUS RIG') & (df['Region'] == row['Region']) &
→(df['Ambito'] == row['Ambito'])] #(df['Motorizacion'] == row['Motorizacion']) &
        Cnst = Cnst.reset_index()
    if not Cnst.empty:
        if not row.empty:
            dfNew.loc[i, 'Unidad'] = '[km/a]'
            for j in dfS.columns[6:]:
                dfNew.at[i, j] = float(Cnst.loc[2, str(j)])
dfNew.to_csv('Actividad.csv', sep=',', index = False, decimal='.')
```

```
[ ]: # Emisiones

Archivos = ['C_EC_FEFP.csv' , 'C_CO2_FEFP.csv', 'C_SOx_FEFP.csv', 'C_VOC_FEFP.
→csv', 'C_CH4_FEFP.csv', 'C_CO_FEFP.csv', 'C_NOx_FEFP.csv', 'C_BC_FEFP.csv', 'C_PM_FEFP.
→csv', 'C_N2O_FEFP.csv']

dfA = pd.read_csv('Actividad.csv', engine = 'python', delimiter = ',')
dfA = dfA.loc[:4844, :]
for file in Archivos:
    dfFE = pd.read_csv(file, engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='
→')
    dfFE = dfFE.loc[:4844, :]
    dfN = multiplicar_df(dfFE, dfA)
    if file == 'C_EC_FEFP.csv':
        dfN = dfN.loc[ dfN['Unidad'] == '[MJ/km]']
        dfN.loc[i, 'Unidad'] = '[MJ/a]'
    else:
        dfN = dfN.loc[ dfN['Unidad'] == '[g/km]']
        dfN.loc[i, 'Unidad'] = '[g/a]'
    dfN.to_csv(file.replace('_FEFP.csv', '_E.csv'), sep=',', index = False, decimal='.')
```

```
[ ]: Archivos = ['C_CO2_E.csv', 'C_SOx_E.csv', 'C_VOC_E.csv', 'C_CH4_E.csv', 'C_CO_E.
→csv', 'C_NOx_E.csv', 'C_BC_E.csv', 'C_PM_E.csv', 'C_N2O_E.csv']
for file in Archivos:
    df = pd.read_csv(file, engine='python', delimiter = ',', encoding = 'latin1')
    df = df.loc[ df['Unidad'] == '[g/a]']
    df.to_csv('STEP_'+file, sep=',', index = False, decimal='.')
```

```
[ ]: df = pd.read_csv('C_EC_E.csv', engine='python', delimiter = ',', encoding = 'latin1')
df = df.loc[ df['Unidad'] == '[MJ/a]']
df.to_csv('STEP_C_EC_E.csv', sep=',', index = False, decimal='.')
```

Escenario 2: 70% EV al 2050 con 29% participación en ventas al 2030 (estimación 2021 BNEF)

```
[ ]: esc2 = 'FP_C_Esc2_VEH'

df = pd.read_excel(esc2+'.xlsx')

dfS = pd.read_excel('211124_Velocidades.xlsx')
dfNew = dfS.copy()
for i, row in dfS.iterrows():
    if row['Motorizacion'] == 'Electrico':
        Cnst = df.loc[(df['Motorizacion'] == row['Motorizacion']) & (df['Categoria'] == row['Categoria']) & (df['Ambito'] == row['Ambito'])]
    else:
        Cnst = df.loc[(df['Motorizacion'] == row['Motorizacion']) & (df['Categoria'] == row['Categoria']) & (df['Norma'] == row['Norma']) & (df['Ambito'] == row['Ambito'])]
    if not Cnst.empty:
        if not row.empty:
            dfNew.loc[i, 'Unidad'] = '[veh]'
            for j in dfS.columns[6:]:
                dfNew.at[i, j] = float(Cnst[int(j)])
dfNew.to_csv(esc2+'.csv', sep=',', index = False, decimal='.')
```

```
[ ]: df = pd.read_csv(esc2+'.csv')
for i, row in df.loc[df['Unidad']=='[m/s]'].iterrows():
    df.loc[i, 'Unidad'] = '[veh]'
    for j in df.columns[-61:]:
        df.at[i, j] = 0
df.to_csv(esc2+'.csv', sep=',', index = False, decimal='.')
```

```
[ ]: dfFP = pd.read_csv(esc2+'.csv', engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='.')
dfR = pd.read_excel('Regiones.xlsx')

dfN = multiplicar_df(dfFP, dfR)
dfN.to_csv(esc2+'_R.csv', sep=',', index = False, decimal='.')
```

```
[ ]: Archivos = ['C_EC_FE.csv', 'C_CO2_FE.csv', 'C_SOx_FE.csv', 'C_VOC_FE.csv', 'C_CH4_FE.csv', 'C_CO_FE.csv', 'C_NOx_FE.csv', 'C_BC_FE.csv', 'C_PM_FE.csv', 'C_N2O_FE.csv']
dfFP = pd.read_csv(esc2+'_R.csv', engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='.')

for file in Archivos:
    cont = file.replace('_FE.csv', '').replace('C_', '')
    dfFE = pd.read_csv(file, engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='.')
    dfN = multiplicar_df(dfFE, dfFP)
    dfN.to_csv(file.replace('_FE.csv', '_FEFP_2.csv'), sep=',', index = False, decimal='.')
```

```
[ ]: # Emisiones
```

```

Archivos = ['C_EC_FEFP_2.csv' , 'C_CO2_FEFP_2.csv', 'C_SOx_FEFP_2.csv', 'C_VOC_FEFP_2.
→csv', 'C_CH4_FEFP_2.csv', 'C_CO_FEFP_2.csv', 'C_NOx_FEFP_2.csv', 'C_BC_FEFP_2.
→csv', 'C_PM_FEFP_2.csv', 'C_N2O_FEFP_2.csv']

dfA = pd.read_csv('Actividad.csv', engine = 'python', delimiter = ',')
dfA = dfA.loc[:4844,:]
for file in Archivos:
    dfFE = pd.read_csv(file, engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='.'
→)
    dfFE = dfFE.loc[:4844,:]
    dfN = multiplicar_df(dfFE,dfA)
    if file == 'C_EC_FEFP_2.csv':
        dfN = dfN.loc[ dfN['Unidad'] == '[MJ/km]']
        dfN.loc[i,'Unidad'] = '[MJ/a]'
    else:
        dfN = dfN.loc[ dfN['Unidad'] == '[g/km]']
        dfN.loc[i,'Unidad'] = '[g/a]'
    dfN.to_csv(file.replace('_FEFP_2.csv','_E_2.csv'),sep=',',index = False, decimal='.')

```

```

[ ]: df = pd.read_csv('C_EC_E_2.csv', engine='python',delimiter = ',', encoding = 'latin1')
df = df.loc[ df['Unidad'] == '[TJ/a]']
df.to_csv('STEP_C_EC_FE.csv',sep=',',index = False, decimal='.')

```

```

[ ]: Archivos = ['C_CO2_E_2.csv', 'C_SOx_E_2.csv', 'C_VOC_E_2.csv', 'C_CH4_E_2.csv', 'C_CO_E_2.
→csv', 'C_NOx_E_2.csv', 'C_BC_E_2.csv', 'C_PM_E_2.csv', 'C_N2O_E_2.csv']
for file in Archivos:
    df = pd.read_csv(file, engine='python',delimiter = ',', encoding = 'latin1')
    df = df.loc[ df['Unidad'] == '[ton/a]']
    df.to_csv('STEP_'+file,sep=',',index = False, decimal='.')

```

Escenario 3: VLP a Tren pasajero / CAM PES a Tren carga y Marítimo

```

[ ]: esc3 = 'FP_C_Esc3_VEH'

xls = pd.ExcelFile(esc3+'.xlsx')
df3 = pd.read_excel(xls,'regiones_tren', index_col=None)
df3r = pd.read_excel(xls,'regiones_otras', index_col=None)

dfS = pd.read_excel('211124_Velocidades.xlsx')
dfNew = dfS.copy()
for i, row in dfS.
→loc[(dfS['Region']=='R05')|(dfS['Region']=='R08')|(dfS['Region']=='R13')].iterrows():
    if row['Motorizacion'] == 'Electrico':
        Cnst = df3.loc[ (df3['Motorizacion'] == row['Motorizacion']) & (df3['Categoria']_
→== row['Categoria']) & (df3['Ambito'] == row['Ambito'])]
    else:
        Cnst = df3.loc[ (df3['Motorizacion'] == row['Motorizacion']) & (df3['Categoria']_
→== row['Categoria']) & (df3['Norma'] == row['Norma']) & (df3['Ambito'] ==_
→row['Ambito'])]
    if not Cnst.empty:
        if not row.empty:
            dfNew.loc[i,'Unidad'] = '[veh]'

```

```

        for j in dfS.columns[6:]:
            dfNew.at[i,j] = float(Cnst[int(j)])
for i, row in dfS:
    →loc[(dfS['Region']=='R01')|(dfS['Region']=='R02')|(dfS['Region']=='R03')|(dfS['Region']=='R04')|(dfS
    →iterrows():
    if row['Motorizacion'] == 'Electrico':
        Cnst = df3r.loc[ (df3r['Motorizacion'] == row['Motorizacion']) &
    →(df3r['Categoria'] == row['Categoria']) & (df3r['Ambito'] == row['Ambito'])]
    else:
        Cnst = df3r.loc[ (df3r['Motorizacion'] == row['Motorizacion']) &
    →(df3r['Categoria'] == row['Categoria']) & (df3r['Norma'] == row['Norma']) &
    →(df3r['Ambito'] == row['Ambito'])]
    if not Cnst.empty:
        if not row.empty:
            dfNew.loc[i,'Unidad'] = '[veh]'
            for j in dfS.columns[6:]:
                dfNew.at[i,j] = float(Cnst[int(j)])
dfNew.to_csv(esc3+'.csv',sep=',',index = False, decimal='.')

```

```

[ ]: df = pd.read_csv(esc3+'.csv')
for i, row in df.loc[df['Unidad']=='[m/s]'].iterrows():
    df.loc[i,'Unidad'] = '[veh]'
    for j in df.columns[-61:]:
        df.at[i,j] = 0
df.to_csv(esc3+'.csv',sep=',',index = False, decimal='.')

```

```

[ ]: dfFP = pd.read_csv(esc3+'.csv', engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1',
    →decimal='.')
dfR = pd.read_excel('Regiones.xlsx')

dfN = multiplicar_df(dfFP,dfR)
dfN.to_csv(esc3+'.R.csv',sep=',',index = False, decimal='.')

```

```

[ ]: esc3 = 'FP_C_Esc3_VEH'
Archivos = ['C_EC_FE.csv', 'C_CO2_FE.csv','C_SOx_FE.csv','C_VOC_FE.csv','C_CH4_FE.
    →csv','C_CO_FE.csv','C_NOx_FE.csv','C_BC_FE.csv','C_PM_FE.csv','C_N2O_FE.csv']
dfFP = pd.read_csv(esc3+'.R.csv', engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1',
    →decimal='.')

for file in Archivos:
    cont = file.replace('_FE.csv','').replace('C_','')
    dfFE = pd.read_csv(file, engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='.'
    →)
    dfN = multiplicar_df(dfFE,dfFP)
    dfN.to_csv(file.replace('_FE.csv','_FEFP_3.csv'),sep=',',index = False, decimal='.')

```

```

[ ]: # Emisiones

Archivos = ['C_EC_FEFP_3.csv', 'C_CO2_FEFP_3.csv','C_SOx_FEFP_3.csv','C_VOC_FEFP_3.
    →csv','C_CH4_FEFP_3.csv','C_CO_FEFP_3.csv','C_NOx_FEFP_3.csv','C_BC_FEFP_3.
    →csv','C_PM_FEFP_3.csv','C_N2O_FEFP_3.csv']

```

```

dfA = pd.read_csv('Actividad.csv', engine = 'python', delimiter = ',')
dfA = dfA.loc[:4844,:]
for file in Archivos:
    dfFE = pd.read_csv(file, engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='.'
    →)
    dfFE = dfFE.loc[:4844,:]
    dfN = multiplicar_df(dfFE,dfA)
    if file == 'C_EC_FEFP_3.csv':
        dfN = dfN.loc[ dfN['Unidad'] == '[MJ/km]']
        dfN.loc[i,'Unidad'] = '[MJ/a]'
    else:
        dfN = dfN.loc[ dfN['Unidad'] == '[g/km]']
        dfN.loc[i,'Unidad'] = '[g/a]'
    dfN.to_csv(file.replace('_FEFP_3.csv','_E_3.csv'),sep=',',index = False, decimal='.')

```

A.2 Modo Aéreo

```

[ ]: from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

```

```

[ ]: %cd "/content/drive/MyDrive/Colab Notebooks/STEP3-Colab/3_Aviacion"
!ls

```

```

[ ]: import pandas as pd
import numpy as np

#!pip install geopy
from geopy.distance import geodesic # Calculo de distancias entre aeropuertos
from scipy.interpolate import lagrange # Interpolacion de FE segun distancias

```

```

[ ]: dfA15 = pd.read_excel('2015.xlsx', index_col=None) #Bitacora de vuelos 2015

dfA15 = dfA15.loc[dfA15['ADW'] == 'D'] #Se consideran solo departures / A:Arrival, D:
→Departures, W:Sobrevuelo
dfA15 = dfA15.reset_index(drop=True)

xls = pd.ExcelFile('A_EF-1 copy.xlsx')
dfaero = pd.read_excel(xls, 'Aeropuertos', index_col=None)

aero = dfaero['Aeropuerto'].unique()
dfA15['DISTANCIA'] = 0.0

```

```

[ ]: k=0
for i, row in dfA15.iterrows():
    if row['PROC_DEST'] in aero and row['OACI'] in aero:
        lat_i = float(dfaero.loc[dfaero['Aeropuerto'] == row['OACI'], 'Lat'])
        lon_i = float(dfaero.loc[dfaero['Aeropuerto'] == row['OACI'], 'Lon'])
        cord_i = lat_i,lon_i
        lat_f = float(dfaero.loc[dfaero['Aeropuerto'] == row['PROC_DEST'], 'Lat'])
        lon_f = float(dfaero.loc[dfaero['Aeropuerto'] == row['PROC_DEST'], 'Lon'])
        cord_f = lat_f,lon_f

```

```

    dfA15.loc[i, 'DISTANCIA'] = geodesic(cord_i, cord_f).nm
else:
    k+=1
dfA15.to_excel('A_2015.xlsx', index=False)

```

A.2.1 Vuelos Comerciales Nacionales

```
[ ]: dfA15 = pd.read_excel('A_2015.xlsx', index_col=None)
```

```
[ ]: tipos = ['A320', 'A321', 'A319', 'B732',
             → 'B763', 'B733', 'B788', 'B789', 'A320neo', 'A321neo'] # Tipos considerados hasta 0.1% de
             → participacion
contaminantes = ['Fuel burn', 'CO', 'HC', 'NOx', 'CO2', 'PM non vol', 'PM vol',
                → (org+sul), 'PM tot', 'SOx', 'H2O']

dfA15 = dfA15.loc[(dfA15['ADW'] == 'D') & (dfA15['N_I'] == 'N')] #Se consideran solo
             → departures / A:Arrival, D:Departures, W:Sobrevuelo / Operaciones nacionales
dfA15 = dfA15.reset_index(drop=True)
x =
    → (125,200,250,500,750,1000,1500,2000,2500,3000,3500,4000,4500,5000,5500,6000,6500,7000,7500,8000)
    → # Distancias estandar de EMEP/EEA

d = {'Type' : tipos*2}
dfFE_VCN = pd.DataFrame(data=d)
dfFE_VCN['Unit'] = 'kg'
dfFE_VCN['LTO_CCD'] = 'CCD'
dfFE_VCN.loc[10:, 'LTO_CCD'] = 'LTO'
dfFE_VCN['Distance'] = 0

for con in contaminantes:
    dfFE_VCN[con] = 0

for tip in tipos:
    dftip = dfA15.loc[dfA15['TIPO'] == tip]
    dftip = dftip.reset_index(drop=True)
    dffe = dfAFE.loc[(dfAFE['Type'] == tip)]
    sD = dftip['DISTANCIA'].value_counts() # Pesos de distancias (Rutas comunes)
    tot = dftip['DISTANCIA'].value_counts().sum() # Total de vuelos de este tipo
    dfD = pd.DataFrame(sD) # DF con distancias como indices y pesos en una columna
    for con in contaminantes:
        dfD[con] = 0
        dfccd = dffe.loc[(dffe['LTO_CCD'] == 'CCD')]
        feccd = list(dfccd.loc[:, con])
        p = lagrange(x, feccd) # Interpolacion de lagrange para encontrar FE [kg]
        → correspondiente a cada distancia
        dflto = dffe.loc[(dffe['LTO_CCD'] == 'LTO')] # Agregar valores LTO por tipo
        dfFE_VCN.loc[(dfFE_VCN['Type'] == tip) & (dfFE_VCN['LTO_CCD'] == 'LTO'), con] =
        → float(dflto[con])
        for i, row in dfD.iterrows():
            peso = dfD.loc[i, 'DISTANCIA']
            dfD.loc[i, con] = p(i) * peso / tot # FE interpolado por distancia y multiplicado
            → por % de participacion

```

```

dfFE_VCN.loc[(dfFE_VCN['Type']==tip) & (dfFE_VCN['LTO_CCD']=='CCD') &
→(dfFE_VCN['Unit']=='kg'),con] = dfD.loc[:,con].sum() #FE de cada tipo de aeronave
→corresponde al promedio por distancias
dfFE_VCN = dfFE_VCN.sort_values(by=['Type'])
dfFE_VCN.to_excel('FE_VCN.xlsx', index=False)

```

```

[ ]: tipos = ['A320','A321', 'A319', 'B732',
→'B763','B733','B788','B789','A320neo','A321neo'] # Tipos considerados hasta 0.1% de
→participacion
contaminantes = ['Fuel burn', 'CO', 'HC', 'NOx', 'CO2', 'PM non vol', 'PM vol
→(org+sul)', 'PM tot', 'SOx', 'H2O']

dfA15 = dfA15.loc[(dfA15['ADW'] == 'D') & (dfA15['N_I'] == 'N')] #Se consideran solo
→departures / A:Arrival, D:Departures, W:Sobrevuelo / Operaciones nacionales
dfA15 = dfA15.reset_index(drop=True)
x =
→(125,200,250,500,750,1000,1500,2000,2500,3000,3500,4000,4500,5000,5500,6000,6500,7000,7500,8000)
→# Distancias estandar de EMEP/EEA

xls = pd.ExcelFile('A_FE-1 copy.xlsx')
dfAFE = pd.read_excel(xls, 'EF EMEP EEA 2019 kg km', index_col=None)

d = {'Type' : tipos*2}
dfFE_VCN = pd.DataFrame(data=d)
dfFE_VCN['Unit'] = 'kg/km'
dfFE_VCN['LTO_CCD'] = 'CCD'
dfFE_VCN.loc[10:,'LTO_CCD'] = 'LTO'
dfFE_VCN['Distance'] = 0

for con in contaminantes:
    dfFE_VCN[con] = 0
print(dfFE_VCN)

for tip in tipos:
    dftip = dfA15.loc[dfA15['TIPO'] == tip]
    dftip = dftip.reset_index(drop=True)
    dffe = dfAFE.loc[(dfAFE['Type'] == tip)]
    sD = dftip['DISTANCIA'].value_counts() # Pesos de distancias (Rutas comunes)
    tot = dftip['DISTANCIA'].value_counts().sum() # Total de vuelos de este tipo
    dfD = pd.DataFrame(sD) # DF con distancias como indices y pesos en una columna
    for con in contaminantes:
        dfD[con] = 0
        # dfFE_VCN[con] = 0
        dfccd = dffe.loc[(dffe['LTO_CCD'] == 'CCD')]
        feccd = list(dfccd.loc[:,con])
        p = lagrange(x,feccd) # Interpolacion de lagrange para encontrar FE [kg]
        →correspondiente a cada distancia
        dflto = dffe.loc[(dffe['LTO_CCD'] == 'LTO')] # Agregar valores LTO por tipo
        dfFE_VCN.loc[(dfFE_VCN['Type']==tip) & (dfFE_VCN['LTO_CCD']=='LTO'),con] =
        →float(dflto[con])
        for i, row in dfD.iterrows():
            peso = dfD.loc[i, 'DISTANCIA']

```

```

dfD.loc[i,con] = p(i) * peso / tot # FE interpolado por distancia y multiplicado
→por % de participacion
dfFE_VCN.loc[(dfFE_VCN['Type']==tip) & (dfFE_VCN['LTO_CCD']=='CCD') &
→(dfFE_VCN['Unit']=='kg/km'),con] = dfD.loc[:,con].sum() #FE de cada tipo de aeronave
→corresponde al promedio por distancias
dfFE_VCN = dfFE_VCN.sort_values(by=['Type'])
dfFE_VCN.to_excel('FE_VCNpkm.xlsx', index=False)

```

A.2.2 Vuelos Comerciales Internacionales

```

[ ]: tipos = ['A320', 'A321', 'A319', 'B763', 'B788', 'B789', 'B738', 'B772', 'B773',
→'B744', 'A346', 'A320neo', 'A321neo', 'A350']
contaminantes = ['Fuel burn', 'CO', 'HC', 'NOx', 'CO2', 'PM non vol', 'PM vol
→(org+sul)', 'PM tot', 'SOx', 'H2O']

dfA15 = pd.read_excel('A_2015.xlsx', index_col=None)
dfA15 = dfA15.loc[dfA15['ADW'] == 'D'] #Se consideran solo departures / A:Arrival, D:
→Departures, W:Sobrevuelo
dfA15 = dfA15.reset_index(drop=True)
x =
→(125,200,250,500,750,1000,1500,2000,2500,3000,3500,4000,4500,5000,5500,6000,6500,7000,7500,8000)
→# Distancias estandar de EMEP/EEA

d = {'Type' : tipos*2}
dfFE_VCI = pd.DataFrame(data=d)
dfFE_VCI['Unit'] = 'kg'
dfFE_VCI['LTO_CCD'] = 'CCD'
dfFE_VCI.loc[8:,'LTO_CCD'] = 'LTO'

for con in contaminantes:
    dfFE_VCI[con] = 0

for tip in tipos:
    dftip = dfA15.loc[(dfA15['TIPO'] == tip) & (dfA15['N_I'] == 'I')]
    dftip = dftip.reset_index(drop=True)
    dffe = dfAFE.loc[(dfAFE['Type'] == tip)]
    sD = dftip['DISTANCIA'].value_counts() # Pesos de distancias (Rutas comunes)
    tot = dftip['DISTANCIA'].value_counts().sum() # Total de vuelos de este tipo
    dfD = pd.DataFrame(sD) # DF con distancias como indices y pesos en una columna
    for con in contaminantes:
        dfD[con] = 0
        dfccd = dffe.loc[(dffe['LTO_CCD'] == 'CCD')]
        feccd = list(dfccd.loc[:,con])
        p = lagrange(x,feccd) # Interpolacion de lagrange para encontrar FE [kg]
        →correspondiente a cada distancia
        dflto = dffe.loc[(dffe['LTO_CCD'] == 'LTO')] # Agregar valores LTO por tipo
        dfFE_VCI.loc[(dfFE_VCI['Type']==tip) & (dfFE_VCI['LTO_CCD']=='LTO'),con] =
        →float(dflto[con])
        for i, row in dfD.iterrows():
            peso = dfD.loc[i,'DISTANCIA']
            dfD.loc[i,con] = p(i) * peso / tot # FE interpolado por distancia y multiplicado
            →por % de participacion

```

```

dfFE_VCI.loc[(dfFE_VCI['Type']==tip) & (dfFE_VCI['LTO_CCD']=='CCD') &
→(dfFE_VCI['Unit']=='kg'),con] = dfD.loc[:,con].sum() #FE de cada tipo de aeronave
→corresponde al promedio por distancias
dfFE_VCI = dfFE_VCI.sort_values(by=['Type'])
dfFE_VCI.to_excel('FE_VCI.xlsx', index = False)
#dfFE_VCI

```

```

[ ]: # Concatenacion de FE nacionales e internacionales
dfFE_VCI['N_I'] = 'I'
dfFE_VCN['N_I'] = 'N'
dfFE_VC = dfFE_VCN.append(dfFE_VCI)
dfFE_VC = dfFE_VC.reset_index(drop=True)
dfFE_VC.to_excel('FE_VC.xlsx', index=False)

```

A.2.3 Análisis de flota aérea

```

[ ]: dfA15 = pd.read_excel('A_2015.xlsx', index_col=None)
dfA14 = pd.read_excel('A_2014.xlsx', index_col=None)
dfA13 = pd.read_excel('A_2013.xlsx', index_col=None)
dfA12 = pd.read_excel('A_2012.xlsx', index_col=None)
dfA11 = pd.read_excel('A_2011.xlsx', index_col=None)

```

```

[ ]: # Flota Nacional Vuelos Comerciales (U)
tipos = ['A320', 'A321', 'A319', 'B732', 'B763', 'B733', 'B788', 'B789']
years = ['2011', '2012', '2013', '2014', '2015'] # '2011', '2012', '2013', '2014',
d = {'Tipo' : tipos}
dfF = pd.DataFrame(data=d) # Flota
for y in years:
    dfF[y] = 0
    dfA = pd.read_excel(y+'.xlsx', index_col=None)
    dfA = dfA.loc[(dfA['ADW'] == 'D') & (dfA['N_I'] == 'N') & (dfA['ACT'] == 'U') ] #Se
→consideran solo departures / A:Arrival, D:Departures, W:Sobrevuelo / U:Pasajeros / N:
→Nacional
    dfA = dfA.reset_index(drop=True)
    tot = dfA.count()[0]
    print(tot)
    for tip in tipos:
        dftip = dfA.loc[(dfA['TIPO'] == tip)]
        count = dftip.count()[0]
        dfF.loc[(dfF['Tipo'] == tip),y] = count/tot*100 #Porcentaje de participación por
→tipo

```

```

[ ]: #Flota Internacional Vuelos Comerciales (U)
tipos = ['A320', 'A321', 'A319', 'B763', 'B788', 'B789', 'B738', 'B772', 'B773',
→'B744', 'A346']
years = ['2011', '2012', '2013', '2014', '2015'] # '2011', '2012', '2013', '2014',
d = {'Tipo' : tipos}
dfFI = pd.DataFrame(data=d) # Flota
for y in years:
    dfFI[y] = 0
    dfA = pd.read_excel(y+'.xlsx', index_col=None)

```

```

dfA = dfA.loc[(dfA['ADW'] == 'D') & (dfA['N_I'] == 'I') & (dfA['ACT'] == 'U') ] #Se
→consideran solo departures / A:Arrival, D:Departures, W:Sobrevuelo / U:Pasajeros / I:
→Internacional
dfA = dfA.reset_index(drop=True)
tot = dfA.count()[0]
for tip in tipos:
    dftip = dfA.loc[(dfA['TIPO'] == tip)]
    count = dftip.count()[0]
    dfFI.loc[(dfFI['Tipo'] == tip),y] = count/tot*100 #Porcentaje de participación por
→tipo

```

```

[ ]: dfF['N_I'] = 'N'
dfFI['N_I'] = 'I'
dfFNI = dfF.append(dfFI)
dfFNI = dfFNI.reset_index(drop=True)
dfFNI.to_excel('A_Flota_NI.xlsx', index=False)

```

A.3 Modo Marítimo

```

[ ]: from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

```

```

[ ]: %cd "/content/drive/MyDrive/Colab Notebooks/STEP3-Colab/2_Maritimo/2_Maritimo_R"
!ls

```

```

[ ]: import pandas as pd
import numpy as np

#!pip install geopy
#from geopy.distance import geodesic

```

```

[ ]: xls = pd.ExcelFile('M_FE_Caract.xlsx')
dfFE = pd.read_excel(xls, 'SMED2002', index_col=None)
dfCa = pd.read_excel(xls, 'Caracteristicas', index_col=None)

```

```

[ ]: #Actividad / C: Crucero M: Maniobra P: Puerto
#Completando con caracteristicas para cada tipo de nave
df = pd.read_excel('R_Emisiones_Maritimo.xlsx', index_col=None)
for i, row in df.iterrows(): # i posicion, row objeto en esa posicion en este caso la
→fila del DF
    Cnst = dfCa.loc[ (dfCa['Codigo'] == row['Tipo']) & (dfCa['Actividad'] ==
→row['Actividad']) & (dfCa['Engine'] == row['Motor'])]
    if not Cnst.empty:
        df.loc[i, 'Combustible'] = Cnst.iloc[0]['Fuel']
        df.loc[i, 'Tipo motor'] = Cnst.iloc[0]['Engine type']
        df.loc[i, 'v/T'] = Cnst.iloc[0]['Activity factor']
        df.loc[i, 'P 1997'] = Cnst.iloc[0]['P 1997']
        df.loc[i, 'P 2010'] = Cnst.iloc[0]['P 2010']
df.to_excel('M_Base.xlsx', index=False)

```

A.3.1 Factores de emisión SMED en [g/kWh]

```
[ ]: df = pd.read_excel('M_Base.xlsx', index_col=None)
dfNOx = df.copy()
dfSOx = df.copy()
dfNH3 = df.copy()
dfCO = df.copy()
dfVOC = df.copy()
dfPM = df.copy()
dfCO2 = df.copy()
dfN2O = df.copy()
dfsfcc = df.copy()
```

```
[ ]: #NOx
df = pd.read_excel('M_Base.xlsx', index_col=None)
dfNOx = df.copy()
xls = pd.ExcelFile('M_FE_Caract.xlsx')
dfFE = pd.read_excel(xls, 'SMED2002', index_col=None)
for i, row in df.iterrows(): # i posicion, row objeto (fila del DF)
    Cpre = dfFE.loc[(dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
    →row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
    →row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'pre')]
    Cpost = dfFE.loc[(dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
    →row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
    →row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'post')]
    for j in df.columns[-61:-50]: #1990 - 2000
        if not Cpre.empty:
            dfNOx.loc[i,j] = Cpre.iloc[0]['NOx']
    k = 1 #k representa años desde 2000 al 2025
    for j in df.columns[-50:-26]: #2001-2025 4% de renovacion de flota anual
        if not Cpost.empty:
            Cnox = (1-0.04*k)*Cpre.iloc[0]['NOx'] + (0.04*k)*Cpost.iloc[0]['NOx']
            dfNOx.loc[i,j] = Cnox
            k+=1
    for j in df.columns[-26:]: #2025-2050
        if not Cpost.empty:
            dfNOx.loc[i,j] = Cpost.iloc[0]['NOx']
dfNOx.to_csv('M_NOx_FE.csv', sep=',', index=False)
#dfNOx.to_csv('M_NOx_prueba.csv', sep=',', index=False)
```

```
[ ]: #SOx
df = pd.read_excel('M_Base.xlsx', index_col=None)
xls = pd.ExcelFile('M_FE_Caract.xlsx')
dfFE = pd.read_excel(xls, 'SMED2002', index_col=None)
dfSOx = df.copy()
for i, row in df.iterrows(): # i posicion, row objeto en esa posicion en este caso la
    →fila del DF
    if not row.empty:
        Cpre = dfFE.loc[(dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
    →row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
    →row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'pre')]
```

```

    Cpost = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
→row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
→row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'post')]
    for j in df.columns[-61:-51]: #1990 - 2000
        if not Cpre.empty:
            dfSOx.loc[i,j] = Cpre.iloc[0]['SOx']
    for j in df.columns[-51:]: #2000-2050
        if not Cpost.empty:
            dfSOx.loc[i,j] = Cpost.iloc[0]['SOx']
dfSOx.to_csv('M_SOx_FE.csv', sep=',', index=False)

```

```

[ ]: #NH3
df = pd.read_excel('M_Base.xlsx', index_col=None)
xls = pd.ExcelFile('M_FE_Caract.xlsx')
dfFE = pd.read_excel(xls, 'SMED2002', index_col=None)
dfNH3 = df.copy()
for i, row in df.iterrows(): # i posicion, row objeto en esa posicion en este caso la
→fila del DF
    if not row.empty:
        Cpre = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
→row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
→row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'pre')]
        Cpost = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
→row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
→row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'post')]
        for j in df.columns[-61:-51]: #1990 - 2000
            if not Cpre.empty:
                dfNH3.loc[i,j] = Cpre.iloc[0]['NH3']
        for j in df.columns[-51:]:
            if not Cpost.empty:
                dfNH3.loc[i,j] = Cpost.iloc[0]['NH3']
dfNH3.to_csv('M_NH3_FE.csv', sep=',', index=False)

```

```

[ ]: #CO
df = pd.read_excel('M_Base.xlsx')
xls = pd.ExcelFile('M_FE_Caract.xlsx')
dfFE = pd.read_excel(xls, 'SMED2002', index_col=None)
dfCO = df.copy()
for i, row in df.iterrows(): # i posicion, row objeto en esa posicion en este caso la
→fila del DF
    if not row.empty:
        Cpre = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
→row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
→row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'pre')]
        Cpost = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
→row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
→row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'post')]
        for j in df.columns[-61:-51]: #1990 - 2000
            if not Cpre.empty:
                dfCO.loc[i,j] = Cpre.iloc[0]['CO']
        for j in df.columns[-51:]:
            if not Cpost.empty:

```

```

dfCO.loc[i,j] = Cpost.iloc[0]['CO']
dfCO.to_csv('M_CO_FE.csv', sep=',', index=False)

```

```

[ ]: #CO2
df = pd.read_excel('M_Base.xlsx')
xls = pd.ExcelFile('M_FE_Caract.xlsx')
dfFE = pd.read_excel(xls, 'SMED2002', index_col=None)
dfCO2 = df.copy()
for i, row in df.iterrows(): # i posicion, row objeto en esa posicion en este caso la
    ↪fila del DF
    if not row.empty:
        Cpre = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
    ↪row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
    ↪row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'pre')]
        Cpost = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
    ↪row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
    ↪row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'post')]
        for j in df.columns[-61:-51]: #1990 - 2007
            if not Cpre.empty:
                dfCO2.loc[i,j] = Cpre.iloc[0]['CO2']
        for j in df.columns[-51:]:
            if not Cpost.empty:
                dfCO2.loc[i,j] = Cpost.iloc[0]['CO2']
dfCO2.to_csv('M_CO2_FE.csv', sep=',', index=False)

```

```

[ ]: #VOC
df = pd.read_excel('M_Base.xlsx')
xls = pd.ExcelFile('M_FE_Caract.xlsx')
dfFE = pd.read_excel(xls, 'SMED2002', index_col=None)
dfVOC = df.copy()
for i, row in df.iterrows(): # i posicion, row objeto en esa posicion en este caso la
    ↪fila del DF
    if not row.empty:
        Cpre = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
    ↪row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
    ↪row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'pre')]
        Cpost = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
    ↪row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
    ↪row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'post')]
        for j in df.columns[-61:-51]: #1990 - 2007
            if not Cpre.empty:
                dfVOC.loc[i,j] = Cpre.iloc[0]['NMVOC']
        for j in df.columns[-51:]:
            if not Cpost.empty:
                dfVOC.loc[i,j] = Cpost.iloc[0]['NMVOC']
dfVOC.to_csv('M_VOC_FE.csv', sep=',', index=False)

```

```

[ ]: #PM
df = pd.read_excel('M_Base.xlsx')
xls = pd.ExcelFile('M_FE_Caract.xlsx')
dfFE = pd.read_excel(xls, 'SMED2002', index_col=None)
dfPM = df.copy()

```

```

for i, row in df.iterrows(): # i posicion, row objeto en esa posicion en este caso la
    ↪fila del DF
    if not row.empty:
        Cpre = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
    ↪row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
    ↪row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'pre')]
        Cpost = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
    ↪row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
    ↪row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'post')]
        for j in df.columns[-61:-51]: #1990 - 2007
            if not Cpre.empty:
                dfPM.loc[i,j] = Cpre.iloc[0]['PM10']
        for j in df.columns[-51:]:
            if not Cpost.empty:
                dfPM.loc[i,j] = Cpost.iloc[0]['PM10']
dfPM.to_csv('M_PM_FE.csv', sep=',', index=False)

```

```

[ ]: #N20
df = pd.read_excel('M_Base.xlsx')
xls = pd.ExcelFile('M_FE_Caract.xlsx')
dfFE = pd.read_excel(xls, 'SMED2002', index_col=None)
dfN20 = df.copy()
for i, row in df.iterrows(): # i posicion, row objeto en esa posicion en este caso la
    ↪fila del DF
    if not row.empty:
        Cpre = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
    ↪row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
    ↪row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'pre')]
        Cpost = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
    ↪row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
    ↪row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'post')]
        for j in df.columns[-61:-51]: #1990 - 2007
            if not Cpre.empty:
                dfN20.loc[i,j] = Cpre.iloc[0]['N20']
        for j in df.columns[-51:]:
            if not Cpost.empty:
                dfN20.loc[i,j] = Cpost.iloc[0]['N20']
dfN20.to_csv('M_N20_FE.csv', sep=',', index=False)

```

```

[ ]: #sfc
df = pd.read_excel('M_Base.xlsx')
xls = pd.ExcelFile('M_FE_Caract.xlsx')
dfFE = pd.read_excel(xls, 'SMED2002', index_col=None)
dfsfc = df.copy()
for i, row in df.iterrows(): # i posicion, row objeto en esa posicion en este caso la
    ↪fila del DF
    if not row.empty:
        Cpre = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
    ↪row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
    ↪row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'pre')]

```

```

Cpost = dfFE.loc[ (dfFE['Type'] == row['Actividad']) & (dfFE['Engine'] ==
→row['Motor']) & (dfFE['Engine type'] == row['Tipo motor']) & (dfFE['Fuel type'] ==
→row['Combustible']) & (dfFE['NOx Reduction'] == 'post')]
for j in df.columns[-61:-51]: #1990 - 2007
    if not Cpre.empty:
        dfsfc.loc[i,j] = Cpre.iloc[0]['sfc']
for j in df.columns[-51:]:
    if not Cpost.empty:
        dfsfc.loc[i,j] = Cpost.iloc[0]['sfc']
dfsfc.to_csv('M_sfc_FE.csv', sep=',', index=False)

```

```

[ ]: #Nuevos combustibles
#Methanol producido a partir de biomasa (no GN)
#Emisiones NOx de NH3 dependen de la temperatura, podría necesitar SCR
#Valores para H2 cambian en mezcla, se considera 100% H2 o electrico

#Porcentajes de reduccion con respecto a RO para Metanol
FE_NC = {'Combustible':['Metanol', 'H2', 'LNG'],
         'SOx':[0.01, 0, 0],
         'NOx':[0.4,0,0.7],
         'CO2':[0,0,428],
         'PM': [0.05,0,0.0003],
         'CO': [0,0,2.3],
         'VOC': [0,0,2.4],
         'sfc' : [0,0,428]}
df_NC = pd.DataFrame(data=FE_NC, index=None)

```

```

[ ]: #Nuevos combustibles

Archivos = ['M_NOx_FE.csv', 'M_CO2_FE.csv', 'M_SOx_FE.csv', 'M_PM_FE.csv', 'M_CO_FE.
→csv', 'M_VOC_FE.csv', 'M_sfc_FE.csv']
for file in Archivos:
    df = pd.read_csv(file,engine='python',delimiter = ',', encoding = 'latin1',
→index_col = None)
    cont = file.replace('_FE.csv', '').replace('M_', '')
    for i, row in df.loc[df['Tipo'] == 'TEC1'].iterrows(): # Metanol
        if not row.empty:
            Aux = df_NC.loc[df_NC['Combustible'] == 'Metanol']
            RO_row = df.loc[ (df['Tipo'] == 'GRL') & (df['Motor'] == row['Motor']) &
→(df['Actividad'] == row['Actividad'])& (df['Ambito'] == row['Ambito'])] # &
→(df['Combustible'] == 'RO')
            if not RO_row.empty:
                for j in df.columns[-61:]:
                    Metfactor = Aux.iloc[0][cont]
                    Met = Metfactor * float(RO_row[j])
                    df.at[i,j] = Met
    for i, row in df.loc[df['Tipo'] == 'TEC2'].iterrows(): # H2
        for j in df.columns[-61:]:
            df.at[i,j] = 0
    for i, row in df.loc[df['Tipo'] == 'TEC3'].iterrows(): # LNG
        Aux = df_NC.loc[df_NC['Combustible'] == 'LNG']
        for j in df.columns[-61:]:
            LNGfactor = Aux.iloc[0][cont]

```

```
df.at[i,j] = LNGfactor
df.to_csv(file,sep=',',index = False)
```

```
[ ]: #SOx Reduction
Archivos = ['M_PM_FE.csv', 'M_CO2_FE.csv', 'M_SOx_FE.csv', 'M_NOx_FE.csv']

for file in Archivos:
    dfF = pd.read_csv(file, engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1')
    cont_SOxRed = file.replace('_FE', '_SOxRed')
    dfDeg = pd.read_csv(cont_SOxRed, engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1')

    #Se extraen columnas 1990-2050 para poder cross-multiply dfs
    colsf = list(dfF.columns)
    dfi = dfF[colsf[:10]] # se extrae formato
    dfF = dfF[colsf[-61:]]
    colsd = list(dfDeg.columns)
    dfDeg = dfDeg[colsd[-61:]]
    dfN = dfF.mul(dfDeg, axis='columns') # multiplicacion
    dfN = pd.concat([dfi, dfN], axis=1) # se vuelve al formato

    dfN.to_csv(file,sep=',',index = False)
```

```
[ ]: #Reducción de sfc se comporta igual que CO2
dfF = pd.read_csv('M_sfc_FE.csv', engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1')
dfDeg = pd.read_csv('M_CO2_SOxRed.csv', engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1')

colsf = list(dfF.columns)
dfi = dfF[colsf[:10]]
dfF = dfF[colsf[-61:]]
colsd = list(dfDeg.columns)
dfDeg = dfDeg[colsd[-61:]]
dfN = dfF.mul(dfDeg, axis='columns')
dfN = pd.concat([dfi, dfN], axis=1)

dfN.to_csv(file,sep=',',index = False)
```

A.3.2 Factores en [g/km] y [g]

```
[ ]: #Definicion de funciones para calcular emisiones
#Se toma ME y AE por separado

def E_C(v,P,EF,LF) -> float: #Crucero
    if v == 0:
        return 0
    else:
        return (P * LF * EF * v) #v como 1/v

def E_MP (t, P, EF, LF) -> float: #Maniobra / Puerto
    return (t * P * LF * EF)
```

```

[ ]: # Emisiones sin actividad
      # Factores de carga (LF) de Entec UK

Archivos = ['M_PM_FE.csv', 'M_CO2_FE.csv', 'M_CO_FE.csv', 'M_SOx_FE.csv', 'M_NOx_FE.csv',
            → 'M_NH3_FE.csv', 'M_VOC_FE.csv', 'M_N2O_FE.csv', 'M_sfc_FE.csv']
dfP = pd.read_csv('M_Potencia.csv', engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1',
            → decimal='.')
dfV = pd.read_csv('M_Velocidad.csv', engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1',
            → decimal='.')

for file in Archivos:
    cont = file.replace('_FE.csv', '')
    dfFE = pd.read_csv(file, engine='python', sep = ',', encoding = 'latin1', decimal='.'
            →)
    dfE = dfFE.copy()
    for i, row in dfFE.iterrows():
        if i < 217:
            if row['Motor'] == 'ME' and row['Actividad'] == 'C':
                LF_ME_C = 0.8
                for j in dfFE.columns[-61:]:
                    FE = dfFE.at[i, j]
                    #p = P.iloc[0][j]
                    p = dfP.at[i, j]
                    v = float(dfV.at[i, j])
                    Emision_ME_C = E_C(v, p, FE, LF_ME_C)
                    dfE.at[i, j] = Emision_ME_C
            elif row['Motor'] == 'AE' and row['Actividad'] == 'C':
                LF_AE_C = 0.3
                for j in dfFE.columns[-61:]:
                    Emision_AE_C = E_C(dfV.at[i, j], dfP.at[i, j], dfFE.at[i, j], LF_AE_C)
                    dfE.at[i, j] = Emision_AE_C
            elif row['Motor'] == 'ME' and row['Actividad'] == 'M':
                t = row['v/T']
                LF_ME_M = 0.2
                for j in dfFE.columns[-61:]:
                    Emision_ME_M = E_MP(t, dfP.at[i, j], dfFE.at[i, j], LF_ME_M)
                    dfE.at[i, j] = Emision_ME_M
            elif row['Motor'] == 'AE' and row['Actividad'] == 'M':
                t = row['v/T']
                LF_AE_M = 0.5
                for j in dfFE.columns[-61:]:
                    Emision_AE_M = E_MP(t, dfP.at[i, j], dfFE.at[i, j], LF_AE_M)
                    dfE.at[i, j] = Emision_AE_M
            elif row['Motor'] == 'ME' and row['Actividad'] == 'P':
                t = row['v/T']
                LF_ME_P = 0.2
                for j in dfFE.columns[-61:]:
                    Emision_ME_P = E_MP(t, dfP.at[i, j], dfFE.at[i, j], LF_ME_P)
                    dfE.at[i, j] = Emision_ME_P
            elif row['Motor'] == 'AE' and row['Actividad'] == 'P':
                t = row['v/T']
                LF_AE_P = 0.4
                for j in dfFE.columns[-61:]:

```

```
Emission_AE_P = E_MP(t, dfP.at[i,j], dfFE.at[i,j],LF_AE_P)
dfE.at[i,j] = Emission_AE_P
dfE.to_csv(cont+'_FER.csv',sep=',',index=False)
```

```
[ ]: Archivos = ['M_PM_FER.csv', 'M_CO2_FER.csv', 'M_CO_FER.csv', 'M_SOx_FER.csv', 'M_NOx_FER.
→csv', 'M_NH3_FER.csv', 'M_VOC_FER.csv', 'M_N2O_FER.csv', 'M_sfc_FER.csv']
for file in Archivos:
df = pd.read_csv(file, engine='python', delimiter = ',', encoding = 'latin1')
df = df.loc[
    ((df['Actividad'] == 'C' ) & (df['Motor'] == 'ME')) |
    ((df['Actividad'] == 'M' ) & (df['Motor'] == 'ME')) |
    ((df['Actividad'] == 'P' ) & (df['Motor'] == 'AE')) ]

df.to_csv('STEP_'+file, index=False)
```

Apéndice B

Proyección de flota vehicular

Las siguientes figuras muestran las proyecciones de flotas para los escenarios base y de electromovilidad acelerada en el modo caminero. Para cada categoría, a menos que se señale algo distinto se representa el combustible más utilizado, por ejemplo, diésel para vehículos pesados como camiones y buses y gasolina para taxis. Los gráficos presentados representan las categorías en el ámbito urbano, en la tabla B.1 se encuentran los factores por el cual se debe multiplicar el número de vehículos para obtener el ámbito interurbano, las proporciones se mantienen iguales.

Table B.1: Factores Interurbano/Urbano

Categoría	Factor
VLP	0,154
VLC	0,244
CAM PES	28,4
MOT	0,01
CAM LIV	0
CAM MED	0

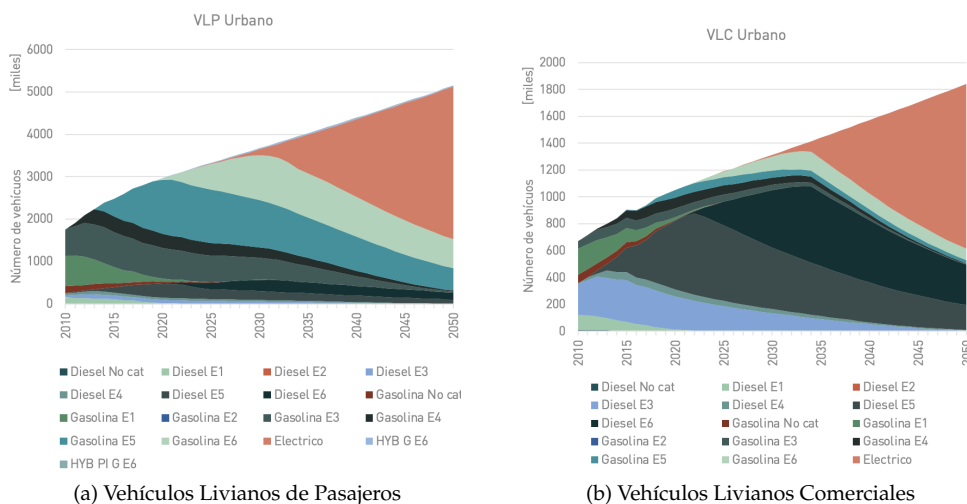
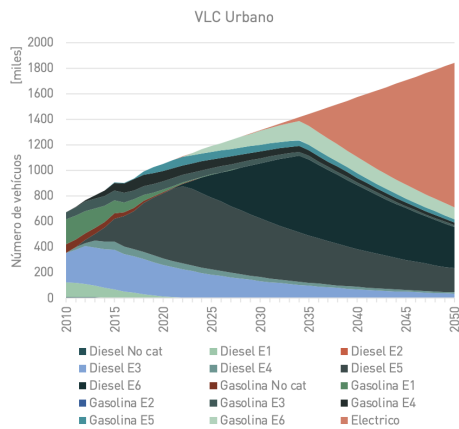
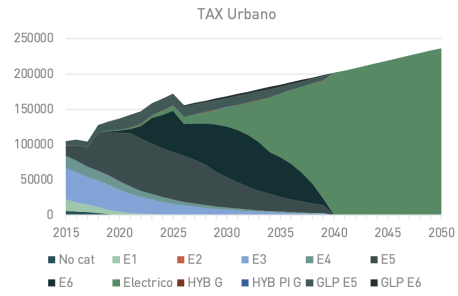


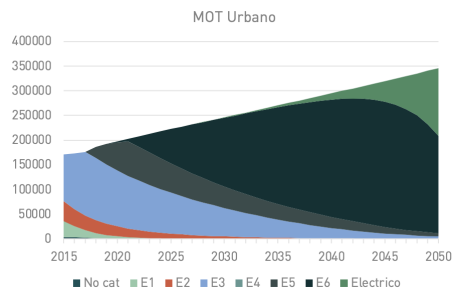
Figure B.1: Número de vehículos por categoría Escenario Electromovilidad Acelerada



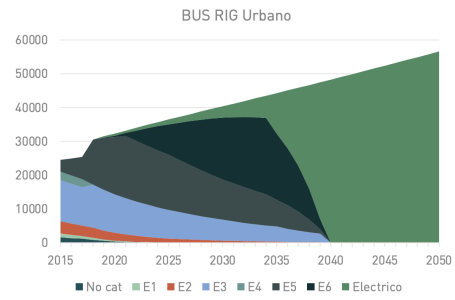
(a) Vehículos Livianos Comerciales



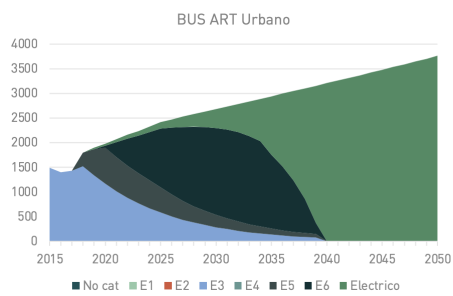
(b) Taxis



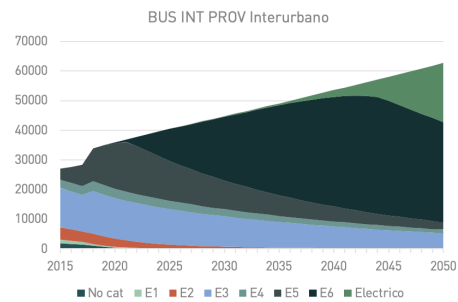
(c) Motos



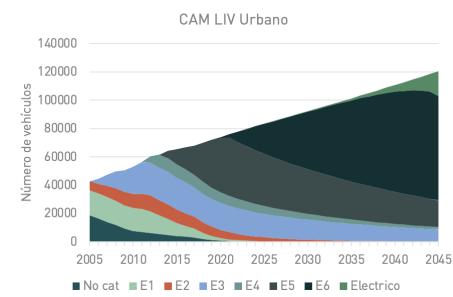
(d) Buses Rígidos



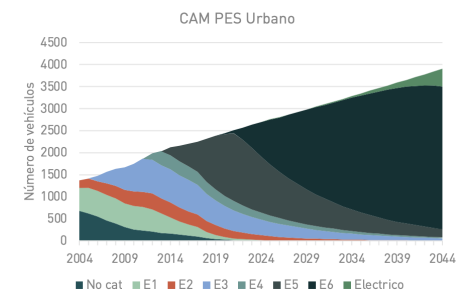
(e) Buses Articulados



(f) Buses Interprovinciales



(g) Camiones Livianos Urbanos



(h) Camiones Pesados Urbanos

Figure B.2: Número de vehículos por categoría Escenario Base

Bibliografía

- [1] Richard Martínez et al. Informe del Inventario Nacional de Chile 2020: Inventario nacional de gases de efecto invernadero y otros contaminantes climáticos 1990-2018. Santiago, Chile, 2020. Área de Mitigación e Inventarios de Contaminantes, Climáticos Oficina de Cambio Climático, Ministerio del Medio Ambiente.
- [2] IRENA. Reaching zero with renewables: Eliminating CO2 emissions from industry and transport in line with the 1.5C climate goal. Abu Dhabi, 2020. International Renewable Energy Agency.
- [3] Ministerio de Energía. Estrategia Nacional de Electromovilidad. Santiago, Chile, 2017.
- [4] Ministerio de Energía. Estrategia Nacional de Electromovilidad. Santiago, Chile, Octubre 2021.
- [5] Ministerio de Energía. Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. Santiago, Chile, Noviembre 2020.
- [6] K. Basoa D. Benavente C. Benavides B. Campos N. de la Maza L. Farías L. Gallardo M. J. García L. E. Gonzales Carrasco F. Guarda R. Guzmán A. Jofré J. Mager R. Martínez M. Montedónico L. Morán L. Muñoz M. Osses A. Pica M. Rojas A. Rudnick J. P. San Martín A. Santander C. Silva S. Tolvett R. Torres A. Urquiza P. Valdivia S. Vicuña Palma Behnke R., C. Barría. Chilean NDC Mitigation Proposal: Methodological Approach and Supporting Ambition. Mitigation and Energy Working Group Report. Santiago, 2019. COP25 Scientific Committee; Ministry of Science, Technology, Knowledge and Innovation.
- [7] Diego Mendoza Benavente. Impacto de la norma Euro 6/VI y desafíos del sector automotriz frente al cambio climático. ANAC, 2020.
- [8] J. Dornoff P. Mock F. Rodríguez, Y. Bernard. Recommendations for post-Euro 6 standards for light-duty vehicles in the European Union. The International Council on Clean Transportation, 2019.

- [9] European Commission AGVES. Euro 7 development (presentaciones variadas). Advisory Group on Vehicle Emission Standards, 2021.
- [10] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones and Junta de Aeronáutica Civil. Resolución 970 Exenta: Esquema de Reducción y Compensación de Carbono para la Aviación internacional. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 13 de diciembre 2017.
- [11] IEA. Tracking Reports for Transport. Technical report, International Energy Agency, 2021.
- [12] Susan van Dyk, Jack Saddler, Francisco Boshell, Deger Saygin, Alessandra Salgado, and Amr Seleem. Biofuels for aviation: Technology Brief. Technical report, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017.
- [13] IRENA. Navigating to a renewable future: Solutions for decarbonising shipping, preliminary findings. Technical report, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2019.
- [14] David Cooper and Tomas Gustafsson (SMED). Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors. Suecia, 2004. Swedish Environmental Protection Agency.
- [15] OMI. Initial IMO Strategy on Reduction of GHG emissions from ships. Organización Marítima Internacional, 2018.
- [16] ITF OECD. Decarbonising maritime transport: Pathways to zero-carbon shipping by 2035. Technical report, International Transport Forum, Francia, 2018.
- [17] EEA. *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook*. European Environment Agency, 2019.
- [18] IEA. The Future of Rail: Opportunities for energy and the environment. Technical report, International Energy Agency, en colaboración con UIC, 2019.
- [19] Ministerio del Medio Ambiente. Escenarios referenciales para la mitigación del cambio climático en Chile – resultados fase 1. Santiago, Chile, 2013. MAPS Chile.
- [20] Ministerio del Medio Ambiente. Opciones de mitigación para enfrentar el cambio climático y lograr un desarrollo bajo en carbono; síntesis de resultados de fase 3. Santiago, Chile, 2013. MAPS Chile.
- [21] Directemar. Boletín de estadísticas portuarias. 2021.

- [22] Airbus. Global Market Forecast, 2019-2038. 2019.
- [23] BloombergNEF. Zero-Emission Vehicles Factbook. Noviembre, 2021.
- [24] Gobierno de Chile. Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile. Santiago, Octubre 2021.
- [25] IPCC. *Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2019 refinement edition, 2006.
- [26] Entec. UK ship emission inventory, final report. Reino Unido, 2010. Entec and Department for Environment, Food & Rural Affairs.
- [27] Maria Anderson, Kent Salo, and Erik Fridell. Particle- and gaseous emissions from a LNG powered ship. *Environmental Science and Technology*, Septiembre 2015.
- [28] Gobierno de Chile. Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) de Chile, actualización 2020. Abril 2020.
- [29] IRENA. *Reaching zero with renewables: Biojet Fuels*. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2021.
- [30] Benjamín Gómez Osorio. Modelación y proyección de las emisiones generadas por vehículos terrestres en el periodo 2020-2050 en Chile. Tesis Ingeniería Civil Mecánica, 2020. UTFSM.
- [31] Constanza Bustamante Figueroa. Estimación de las emisiones contaminantes producidas por el sector de transporte aéreo en Chile para el año 2015. Tesis Ingeniería Civil Mecánica, Noviembre 2018. UTFSM.
- [32] Matías Concha Palacios. Modelo para estimar la distribución espacial y temporal de emisiones contaminantes generadas en Chile por sector transporte, modos aéreo y marítimo. Tesis Ingeniería Civil Mecánica, Enero 2020. UTFSM.
- [33] Alberto Pino Riquelme. Estimación de emisiones contaminantes atmosféricas producidas por embarcaciones marítimas en Chile. Tesis Ingeniería Civil Mecánica, Octubre 2017. UTFSM.