

ASESORÍA TÉCNICA

Consultoría para la cuantificación de emisiones del Plan Nacional de Infraestructura para la Movilidad 2020-2050 de Chile

INFORME FASE 3

IDENTIFICACIÓN DEL DOCUMENTO : Tercer Informe (FASE 3)
FECHA : 28 abril 2020
ELABORADO POR : Mauricio Osses A.
PREPARADO PARA : Banco Interamericano de Desarrollo
CONTRAPARTE TÉCNICA : MOP - DIRPLAN

EQUIPO DE TRABAJO

MAURICIO OSSES

BENJAMIN GOMEZ

MATIAS CONCHA

ADOLFO GAETE

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	7
2	ESCENARIOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES	8
2.1	Transporte vial	9
2.2	Transporte marítimo	13
2.3	Transporte aéreo	19
2.4	Transporte ferroviario	23
2.5	Resumen escenarios propuestos.....	24
3	FACTORES DE EMISIÓN.....	26
3.1	Metodologías seleccionadas para la estimación de emisiones	27
3.2	Factores de emisión transporte vial	28
3.3	Factores de emisión transporte marítimo	31
3.4	Factores de emisión transporte aéreo.....	32
3.5	Factores de emisión transporte ferroviario.....	33
4	EMISIONES ANUALES 2017-2050	35
4.1	Emisiones de dióxido de carbono CO ₂	35
4.2	Emisiones de material particulado MP2.5	39
4.3	Emisiones de óxidos de nitrógeno NO _x	44
4.4	Emisiones de carbono negro CN	48
4.5	Análisis de resultados.....	53
5	CONCLUSIONES.....	59
6	BIBLIOGRAFÍA.....	63

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Factor de crecimiento capacidad de carga escenario Bajo Carbono.	15
Tabla 2: Factor de crecimiento capacidad de carga escenario Conservador.	15
Tabla 3: Escenario Bajo Carbono de la flota marítima en Chile 2020-2050.	15
Tabla 4: Escenario Conservador de la flota marítima en Chile 2020-2050.	16
Tabla 5: Capacidad de carga por tipo de buque.	18
Tabla 6: Factores de ocupación estimados para el periodo 2020-2050 por tipo de buque.	18
Tabla 7: Escenario Bajo Carbono de la flota aérea en Chile 2020-2050.	20
Tabla 8: Escenario Conservador de la flota aérea en Chile 2020-2050.	21
Tabla 9: Factores de ocupación estimados para el periodo 2020-2050.	23
Tabla 10: Proyecciones de participación por tecnología en el transporte ferroviario.	24
Tabla 11: Compuestos para los cuales se reporta factor de emisión.	26
Tabla 12: Factores de emisión transporte vial CO ₂	28
Tabla 13: Factores de emisión transporte vial interzonal CO ₂ escenario Bajo Carbono.	28
Tabla 14: Factores de emisión transporte vial interzonal CO ₂ escenario Conservador.	30
Tabla 15: Factores de emisión transporte marítimo.	31
Tabla 16: Reducción factores de emisión transporte marítimo.	32
Tabla 17: Factores de emisión transporte aéreo.	32
Tabla 18: Reducción factores de emisión transporte aéreo.	33
Tabla 19: Factores de emisión transporte ferroviario.	33
Tabla 20: Reducción factores de emisión transporte ferroviario.	34
Tabla 21: Emisiones CO ₂ en miles de toneladas anuales.	35
Tabla 22: Emisiones CO ₂ transporte vial en miles de toneladas anuales.	37
Tabla 23: Emisiones CO ₂ transporte vial en miles de toneladas anuales.	37
Tabla 24: Emisiones CO ₂ transporte ferroviario en miles de toneladas anuales.	38
Tabla 25: Emisiones CO ₂ transporte aéreo en miles de toneladas anuales.	38
Tabla 26: Emisiones CO ₂ transporte marítimo en miles de toneladas anuales.	39
Tabla 27: Emisiones MP _{2.5} en toneladas anuales.	40
Tabla 28: Emisiones MP _{2.5} transporte vial en toneladas anuales.	41
Tabla 29: Emisiones MP _{2.5} transporte vial en toneladas anuales.	42
Tabla 30: Emisiones MP _{2.5} transporte ferroviario en toneladas anuales.	43
Tabla 31: Emisiones MP _{2.5} transporte aéreo en toneladas anuales.	43
Tabla 32: Emisiones MP _{2.5} transporte marítimo en toneladas anuales.	43
Tabla 33: Emisiones NO _x en toneladas anuales.	44

Tabla 34: Emisiones NOx transporte vial en toneladas anuales	46
Tabla 35: Emisiones NOx transporte vial en toneladas anuales	46
Tabla 36: Emisiones NOx transporte ferroviario en toneladas anuales.....	47
Tabla 37: Emisiones NOx transporte aéreo en toneladas anuales.....	47
Tabla 38: Emisiones NOx transporte marítimo en toneladas anuales.....	48
Tabla 39: Emisiones CN en toneladas anuales	49
Tabla 40: Emisiones CN transporte vial en toneladas anuales	50
Tabla 41: Emisiones CN transporte vial en toneladas anuales	51
Tabla 42: Emisiones CN transporte ferroviario en toneladas anuales.....	52
Tabla 43: Emisiones CN transporte aéreo en toneladas anuales.....	52
Tabla 44: Emisiones CN transporte marítimo en toneladas anuales.....	52
Tabla 45: Emisiones anuales CO2	60

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Escenario Bajo Carbono de la flota marítima en Chile 2020-2050.....	16
Figura 2: Escenario Conservador de la flota marítima en Chile 2020-2050.	17
Figura 3: Escenario Bajo Carbono de la flota aérea en Chile 2020-2050.....	21
Figura 4: Escenario Conservador de la flota aérea en Chile 2020-2050.	22
Figura 5: Emisiones totales de CO ₂	36
Figura 6: Proporción emisiones de CO ₂ año 2017 y 2050 por modo de transporte	36
Figura 7: Proporción emisiones de CO ₂ año 2017 modos de transporte vial.	38
Figura 8: Proporción entre modos de transporte para CO ₂	39
Figura 9: Emisiones totales de MP _{2.5}	40
Figura 10: Proporción emisiones de MP _{2.5} año 2017 y 2050, por modo de transporte.	41
Figura 11: Proporción emisiones de MP _{2.5} año 2017 modos de transporte vial	42
Figura 12: Proporción entre modos de transporte para MP _{2.5}	44
Figura 13: Emisiones totales de NOx	45
Figura 14: Proporción emisiones de NOx año 2017 y 2050, por modo de transporte.....	45
Figura 15: Proporción emisiones de NOx año 2017 modos de transporte vial.....	47
Figura 16: Proporción entre modos de transporte para NOx.....	48
Figura 17: Emisiones totales de CN	49
Figura 18: Proporción emisiones de CN año 2017 y 2050, por modo de transporte.....	50
Figura 19: Proporción emisiones de CN año 2017 modos de transporte vial.....	51
Figura 20: Proporción entre modos de transporte para CN.....	53
Figura 21: Tendencias en la reducción de factores de emisión promedio.....	54
Figura 22: Tasas de crecimiento 2017-2050 de movilidad y emisiones anuales.....	55
Figura 23: Diferencia porcentual entre situación Plan Bajo Carbono 2050 y caso base 2017. 57	
Figura 24: Emisiones anuales CO ₂	59
Figura 25: Emisiones anuales MP _{2.5}	61
Figura 26: Emisiones anuales NOx	62

1 Introducción

El presente Informe corresponde al estudio “**Consultoría para la cuantificación de emisiones del Plan Nacional de Infraestructura para la Movilidad 2020-2050**”, el cual responde al requerimiento del Banco Interamericano del Desarrollo (BID). Este estudio apoya la iniciativa en materia de planificación estratégica del Ministerio de Obras Públicas (MOP), para evaluar diferentes alternativas de provisión de infraestructura de movilidad para cargas y personas, con énfasis en la conectividad interurbana con un horizonte al 2050, que conformará el denominado Plan Nacional de Infraestructura para la Movilidad 2020-2050 (PNIM 2050).

En conformidad con los Términos de Referencia asociados, los objetivos de la consultoría son los siguientes:

Objetivo general

Definir la metodología a emplear y aplicarla para cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al Plan Nacional de Infraestructura para la Movilidad 2050.

Objetivos específicos

- Identificar escenarios tecnológicos/regulatorios que impactarían en la movilidad y metas de descarbonización en Chile, y que inciden en la sostenibilidad del Plan.
- Definir una metodología para cuantificar las emisiones de los proyectos planteados en el Plan, lo cual implica establecer el procedimiento e identificar las variables y/o parámetros a utilizar como funciones y/o atributos para estimar las emisiones de contaminantes (CO₂, NO_x, PM_{2.5}, COV, etc.) según distintas alternativas de planes a evaluar. Aplicar la metodología considerando que la formulación del PNIM 2050 se apoya en un modelo de redes de transporte multimodal.
- Establecer criterios de decisión, indicaciones y recomendaciones específicas a tener presentes para la posterior implementación del PNIM 2050, en relación con el control y/o regulaciones en el ámbito de las emisiones.

Este Tercer Informe reporta las actividades correspondientes a la FASE 3 del estudio: establecer criterios de decisión y recomendaciones al Plan. La tercera fase comprende la propuesta de criterios de decisión, indicaciones, recomendaciones específicas en relación con el ámbito de las emisiones, teniendo en cuenta los compromisos a largo plazo asumidos por el país en materia de desarrollo sostenible y cambio climático.

Los criterios de decisión, indicaciones y recomendaciones específicas para la implementación del PNIM 2050, surgen del análisis de escenarios tecnológicos y regulatorios, de la cuantificación de emisiones y del análisis comparado de las opciones evaluadas.

2 Escenarios de reducción de emisiones

El Ministerio de Obras Públicas (MOP) está llevando adelante una iniciativa en materia de planificación estratégica que identificará diferentes alternativas de provisión de infraestructura de movilidad para carga y personas con énfasis en la conectividad interurbana, ello con un horizonte al 2050, que conforma el denominado Plan Nacional de Infraestructura para la Movilidad 2020-2050 (PNIM 2050). [1]

Una primera etapa, basada en experiencias de países de la Unión Europea, señala una imagen-objetivo preliminar de la demanda de servicios de movilidad nacional al 2050, considerando que estos países han pasado por el mismo proceso de crecimiento de la economía que se estima para Chile en los próximos 30 años.

La metodología en ejecución tiene como propósito seleccionar, entre diferentes planes de infraestructura para la movilidad al 2050, aquel de mayor conveniencia en función de los diferentes elementos considerados para su evaluación.

Para cada uno de los planes de movilidad se han generado dos escenarios de reducción de emisiones contaminantes:

1. Escenario Bajo Carbono
2. Escenario Conservador

El **escenario Bajo Carbono** se encuentra alineado con las políticas de carbono neutralidad de Chile para el sector transporte, las que se especifican en el Proyecto Ley Marco de Cambio Climático, que establece: “*Neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero: estado de equilibrio entre las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero antropógenas en un periodo específico, considerando que las emisiones son iguales o menores a las absorciones*”. El Artículo 4º del mismo Proyecto de Ley de Cambio Climático establece como meta que al año 2050 se deberá alcanzar la neutralidad de emisiones de gases de efecto invernadero. [2]

El **escenario Conservador** considera una adopción tardía o con menor penetración de las medidas de reducción de emisiones en el sector transporte, comparada con aquellas adoptadas en el caso más ambicioso de neutralidad al 2050.

Las medidas seleccionadas tienen como requisito contar con iniciativas oficiales de respaldo, sean estas nacionales o internacionales, tales como: planes oficiales de gobierno, estrategias de electromovilidad y descarbonización, implementación de nuevas y estrictas normas de emisión, planes de descontaminación, compromisos de cambio climático tales como NDC, regulaciones internacionales en sectores aéreo y marítimo, etc.

Con relación a las NDC, el Artículo 7º del Proyecto Ley Marco de Cambio Climático indica lo siguiente: “*La Contribución Determinada a Nivel Nacional, es el instrumento que contiene los compromisos de Chile ante la comunidad internacional para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero e implementar medidas*

de adaptación, de conformidad con lo dispuesto por el Acuerdo de París y la Convención". [2]

Los escenarios incluyen **medidas de carácter regulatorio y de fomento tecnológico**. Las medidas de carácter regulatorio corresponden a aquellas en las cuales existe un marco jurídico que permita asignar responsabilidades específicas para su implementación en todo el territorio nacional. Las medidas de fomento tecnológico son aquellas que forman parte de una política de Estado de difusión del uso de una tecnología, siendo su implementación de carácter voluntario.

Los escenarios, medidas y parámetros de implementación han sido definidos en común acuerdo con la contraparte ministerial (MOP-DIRPLAN) y considerando proyecciones proporcionadas por otros ministerios (Energía, Medioambiente, Transporte).

La identificación de escenarios con horizonte 2050, correspondientes a tendencias tecnológicas y/o normativas, se aplica a todos los modos de transporte incluidos en los planes de movilidad. Estos modos corresponden a transporte vial en ruta, marítimo, aéreo y ferroviario. Maquinaria fuera de ruta y movimientos internacionales no se incluyen en el presente análisis.

2.1 Transporte vial

Para la proyección de contaminantes terrestres de vehículos en ruta se consideran los siguientes paquetes de medidas, relevantes para el análisis:

- Medidas de carácter regulatorio: incorporación de estándares de emisión más estrictos, en particular la norma EURO 6 para vehículos livianos y EURO VI para vehículos pesados.
- Medidas de fomento tecnológico: introducción de vehículos eléctricos a la flota nacional, tanto para transporte público como privado, de pasajeros y carga.

2.1.1 Medida TV1: norma de emisiones EURO/EPA

El Decreto 211/1991 del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones (DTO 211/1991 MTT) [3], recibió una actualización mediante la resolución N° 114 exenta emitida el 13 de febrero del 2019 [4], donde se aprueba el anteproyecto de revisión de las normas de emisión aplicables a vehículos motorizados livianos. En el artículo N° 4 del DTO 211/1991 MTT se entregan los valores aplicables a los vehículos livianos durante el proceso de homologación. Los valores que se presentan entrarán en vigor una vez se publique en el diario oficial el nuevo decreto de emisiones.

Estos límites de emisión serán exigibles a partir de septiembre del 2020, esto se determina en el artículo N° 16 del Decreto 31/2016 del Ministerio del Medio

Ambiente (DTO 31/2016 MMA) [5]. Para su implementación se establecen dos fases, la primera de ella abarca los primeros 12 meses desde la publicación en el diario oficial para todos los nuevos modelos que se incorporen y 24 meses, contados de la misma forma, para todos los modelos de vehículos nuevos que realicen su primera inscripción en el registro de vehículos motorizados del Servicio de Registro Civil e Identificación. Solo podrán circular por el territorio nacional aquellos vehículos nuevos que cumplan con los valores de emisión estipulados en la normativa Euro 6b bajo el ciclo NEDC.

La segunda fase contempla los 36 meses desde la publicación en el diario oficial para todos los nuevos modelos que se incorporen y 48 meses, contados de la misma forma, para todos los modelos de vehículos nuevos que realicen su primera inscripción en el registro de vehículos motorizados del Servicio de Registro Civil e Identificación. Solo podrán circular por el territorio nacional aquellos vehículos nuevos que cumplan con los valores de emisión estipulados en la normativa EURO 6c bajo el ciclo WLTP.

Bajo el artículo N° 4 se exponen los nuevos límites de emisión a aplicar para vehículos homologados bajo normativa estadounidense EPA. Al igual que con la implementación de la normativa europea presentada en el anteproyecto, se considerarán 2 fases a partir de septiembre del 2020 [5], manteniendo las fechas de aplicación de 12 y 24 meses para la primera fase, y 36 y 48 meses para la segunda fase. La forma de aplicación difiere ya que cada fase contiene límites diferentes, la primera aplicando el Bin 125 y la segunda el Bin 70 de la normativa EPA.

Ambas normativas exigen que para iniciar la segunda fase se requiere que a nivel nacional exista un suministro de combustible con un contenido de azufre menor a 10 ppm. De no darse dicha condición, se extiende el plazo en 12 meses. La verificación del combustible corresponderá al Ministerio de Energía.

En términos de compuestos contaminantes, las normas EURO/EPA exigen estándares de emisión muy estrictos para óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado fino (MP_{2.5}). En el caso de la norma europea, la reducción entre EURO 5 y EURO 6 para vehículos livianos es de 44% para NOx y en el caso de vehículos pesados es de 66% para MP_{2.5}. Además, se incluye la medición del número de partículas por primera vez en el proceso de homologación. También se establece una reducción importante para compuestos orgánicos volátiles (COVs).

La resolución exenta de la norma data del 21 de marzo del 2019, dejando un periodo de 24 meses hasta la revisión de los límites máximos aplicables a vehículos livianos para establecer los límites de emisión de la norma EURO 6d y sus equivalentes en la norma EPA [5]. Debido a la naturaleza de estos procedimientos, la estimación más optimista es que se establece la incorporación de la EURO 6 o su equivalente en Chile para el año 2023, que corresponde al escenario Bajo Carbono. Por el contrario, suponiendo que la tramitación e implementación tarda mucho más de lo esperado, se considera que el trámite de la norma se demore seis años más, incorporándose definitivamente el año 2030, siendo este el caso más conservador.

2.1.2 Medida TV2: electromovilidad

Una tecnología relevante que ya se identifica con claridad en la discusión nacional es una penetración importante de la electromovilidad en todo el país. Ello se encuentra específicamente planteado en varios documentos oficiales, destacando la Ruta Energética 2018-2022 [7] y la Estrategia Nacional de Electromovilidad [8], publicados por el Ministerio de Energía. Los casos propuestos utilizan como punto de partida las metas de gobierno, ya que esto ofrece una línea base, permitiendo así conocer el impacto en la tasa de emisión de contaminantes si se superan o no las expectativas del gobierno.

Las metas de corto plazo establecidas por el gobierno son:

- Para el año 2020 multiplicar por 10 el número de vehículos eléctricos en Chile existentes al año 2018, es decir, pasar de 243 a 2430 unidades.
- A fines de 2019 contar con 150 electrolineras públicas en Chile.

Las metas de largo plazo establecidas por el gobierno:

- Para el año 2040 el 100% de los vehículos de transporte público en Chile deberán ser eléctricos.
- Para el año 2050 el 40% de los vehículos privados en Chile deberán ser eléctricos.

Para respaldar la viabilidad de estas metas, el Ministerio de Energía utiliza la distribución de ventas por vehículos a nivel mundial y compara con las proyecciones de un 25% y 40% de vehículos eléctricos vendidos sobre el total, tomando la decisión de utilizar el valor del 40%, al ser la más agresiva. Para el transporte público se considera un crecimiento lineal, hasta alcanzar el 100% de electromovilidad para el 2040. Estos análisis son respaldados con proyecciones de las demandas energética y vehicular.

La penetración de la electromovilidad no solamente está ligada a la venta vehicular y renovación del parque, sino que al ser una tecnología disruptiva exige diversos cambios en el sistema donde está inserta. Es necesario generar cambios de infraestructura, normativos, intersectoriales, educacionales, matriz energética, etc., para soportar la entrada de vehículos eléctricos. El análisis de estas variables no se considera en el presente estudio, pero deben tomarse en cuenta durante la discusión para la definición de los escenarios que incluyan la movilidad eléctrica como parámetro relevante.

Como la penetración de vehículos del transporte público está principalmente designada por las licitaciones del gobierno, que se ajustan a las políticas de transporte, se considera pertinente y posible la meta de 100% de vehículos de transporte público el año 2040.

La penetración en el transporte privado posee mayor incertidumbre. Principalmente, su desarrollo estará condicionado por tres desafíos ampliamente

reconocidos a nivel internacional: el precio de los vehículos eléctricos, la autonomía que ofrecen y la capacidad de contar con una red de carga adecuada a nivel nacional.

Considerando lo anterior, se proponen dos escenarios para la penetración de electromovilidad en vehículos privados. El escenario Bajo Carbono considera que para el año 2050 se tendrá un 50% de vehículos privados eléctricos, el escenario Conservador asume un 30% de vehículos privados eléctricos para el 2050.

La propuesta para el escenario Bajo Carbono se encuentra respaldada por la proyección de Bloomberg NEF en su reporte “Electric Vehicle Outlook 2019” [9], la cual considera que para el 2040 el porcentaje de ventas de vehículos eléctricos para países como Chile es del 50%. Esta estimación incluye a Chile como RoW (Rest of the World). Debido a la posición de Chile como pionero respecto a la adaptación a esta tecnología, se puede asumir el cumplimiento de esta proyección, lo cual es más que el caso considerado por el Ministerio de Energía (40%).

La proyección de electromovilidad en transporte vial no solo considera vehículos eléctricos con baterías químicas, sino que también se considera el uso de celdas de combustible que usan hidrógeno como combustible. Esta opción es especialmente importante en el caso de vehículos pesados de carga, donde la superioridad de densidad energética del hidrógeno sobre las baterías es un factor determinante. De acuerdo con la propuesta desarrollada por el gobierno, a través de la “Contribución Determinada a nivel Nacional (NDC) de Chile. Actualización 2020” [10], se considera como una medida importante para el sector transporte que el 85% de los vehículos con capacidad de carga superior a 5 toneladas se impulsarán con celdas de combustible en base a hidrógeno. Sin embargo, la implementación de esta tecnología a nivel comercial dependerá fuertemente de avances tecnológicos que reduzcan su costo de producción como hidrógeno verde, formación de capital humano y el desarrollo de inversiones asociadas a su producción, transporte, almacenamiento y distribución.

Considerando lo anterior, en este estudio se consideran dos niveles de penetración de hidrógeno en camiones pesados: Conservador con 10% al año 2050 y Bajo Carbono con 50% al año 2050. Las emisiones asociadas a la generación eléctrica para producir hidrógeno se consideran nulas, asumiendo que se utilizará “hidrógeno verde”, es decir a través de un proceso de electrólisis con electricidad proveniente exclusivamente de fuentes renovables.

De esta manera, los escenarios propuestos para transporte vial en ruta son los siguientes:

- **Bajo Carbono:** implementación norma EURO/EPA en Chile el 2023 junto con una penetración de electromovilidad designada por un 100% de transporte público eléctrico para el 2040 y un 50% de vehículos privados para el 2050. En adición se considera un 50% de camiones pesados a hidrógeno para el 2050.

- **Conservador:** implementación norma EURO/EPA en Chile el 2030 junto con una penetración de electromovilidad designada por un 100% de transporte público eléctrico para el 2040 y un 30% de vehículos privados para el 2050. En adición se considera un 10% de camiones pesados a hidrógeno para el 2050.

2.2 Transporte marítimo

En el caso del transporte marítimo existen cambios regulatorios, de fomento tecnológico y operacionales a considerar.

2.2.1 Medida TM1: combustible bajo contenido azufre

Con respecto a la normativa, se debe destacar la regulación que limita el contenido de azufre en el combustible al año 2020. Desde el primero de enero del 2020, las navieras deberán cumplir con una nueva normativa de emisiones, que busca reducir el máximo de óxido de azufre que sus buques podrán emitir a la atmósfera. La Organización Marítima Internacional (OMI) establece que el límite mundial de azufre para la navegación en aguas internacionales descenderá de 3.5% a 0.5% a comienzos de 2020 [11], obligando a la mayoría de los armadores a pasar de la quema de combustible con alto contenido de azufre a alternativas más limpias y, posiblemente, más costosas.

Esta normativa está orientada a las emisiones de carácter internacional, pero de todas maneras influye en la actividad de acercamiento a los puertos. Un bajo contenido de azufre produce menor cantidad de emisiones de material particulado, lo que debiese ser considerado en el análisis del presente estudio [12, 13].

En términos de tonelaje, el 96% de la flota mundial está registrada en un país que se ha suscrito al Anexo VI de MARPOL, documento de la OMI que establece las normas sobre contaminación atmosférica del transporte marítimo. Aquellas embarcaciones que no cumplan podrían perder su certificación internacional, impidiéndoles operar como buque comercial. Considerando lo anterior, esta normativa se incluye como una de las nueve medidas basadas en el océano para las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional de Chile [14].

El cumplimiento de esta normativa, para las embarcaciones que naveguen en aguas chilenas, se modela con dos horizontes de implementación. Un caso Bajo Carbono de adopción el año 2020 y un caso Conservador, con adopción tardía al año 2023.

2.2.2 Medida TM2: embarcaciones de carga propulsados con hidrógeno

En relación con cambios tecnológicos, el horizonte es más incierto y con pocas opciones en el corto y mediano plazo. MAERSK, la compañía de contenedores más grande del mundo, anunció el año pasado que intentará llegar a tener operaciones libres de carbono al año 2050, pero sin especificar como lograrlas [15].

A nivel mundial, una de las opciones con mayor potencial de desarrollo en este sector es la utilización de gas natural líquido (GNL) como combustible, especialmente para buques utilizados para transporte de gas. Actualmente, la flota mundial de buques propulsados por GNL alcanza las 200 unidades [16]. No obstante, no se vislumbra un desplazamiento importante del combustible fósil actual hacia el GNL en el horizonte 2050, por lo que no se sugieren cambios tecnológicos relevantes en el rubro transporte marítimo para Chile en este sentido.

En el mediano/largo plazo se vislumbra la posibilidad de utilizar celdas de combustible con hidrógeno para energizar embarcaciones marítimas. El uso de hidrógeno como combustible forma parte de las políticas de carbono neutralidad en el horizonte 2050 para el caso de Chile. En la elaboración de los escenarios se contempla la incorporación de un tipo de buque equipado con hidrógeno como fuente de alimentación. Se considera que este tipo de buque tendrá una capacidad de 100.000 [ton] y se encuentra en el grupo de buques que tienen una mayor capacidad de carga. Para diferenciar los escenarios, la incorporación de este tipo de buques en la flota será más alta para el escenario Bajo Carbono y menor para el Conservador.

2.2.3 Medida TM3: mayor capacidad de carga

Considerando las tendencias a nivel mundial [17] y los reportes nacionales entregados por DIRECTEMAR [18], se estima que la flota de embarcaciones marítimas tendrá un alza hacia naves de mayor capacidad de carga.

Se aplica un coeficiente de crecimiento de flota para la capacidad de carga de cada uno de los tipos de buques presentes en las flotas del periodo 2020-2050, lo que indica que va aumentando la capacidad de carga del total de la flota. Para diferenciar los escenarios Bajo Carbono y Conservador se utilizan diferentes valores, para el caso Bajo Carbono el factor crece a razón de 0,15 por década y para el caso del escenario Conservador este crece a 0,05 por década.

Tabla 1: Factor de crecimiento capacidad de carga escenario Bajo Carbono.

Año	Factor de Crecimiento Capacidad de Carga
2020	1,00
2030	1,15
2040	1,30
2050	1,45

Tabla 2: Factor de crecimiento capacidad de carga escenario Conservador.

Año	Factor de Crecimiento Capacidad de Carga
2020	1,00
2030	1,05
2040	1,10
2050	1,15

En base a los antecedentes anteriores se realiza una proyección de la participación de los tipos de buques en las flotas del periodo 2020-2050, para los escenarios Bajo Carbono y Conservador.

Tabla 3: Escenario Bajo Carbono de la flota marítima en Chile 2020-2050.

Tipo de Nave	2020 %	2030 %	2040 %	2050 %
Granelero	15	14	13	12
Gasero	1	1	1	1
Petrolero	15	13	12	10
Carga general hidrógeno	0	3	5	7
Carga general	27	29	31	33
Portacontenedor	20	18	16	15
Carga refrigerada	1	1	1	1
Pasaje cabotaje	1	1	1	1
Carga rodada	4	4	4	4
Pasaje de transbordo rodado	1,5	1,5	1,5	1,5
Wellboat	1,5	1,5	1,5	1,5
Tanque quimiquero	7	7	7	7
Pasaje	1	1	1	1
Pesquero de arrastre	1	1	1	1
Pesquero de cerco	1	1	1	1
Remolcador de altamar	1,5	1,5	1,5	1,5
Transbordador	1,5	1,5	1,5	1,5

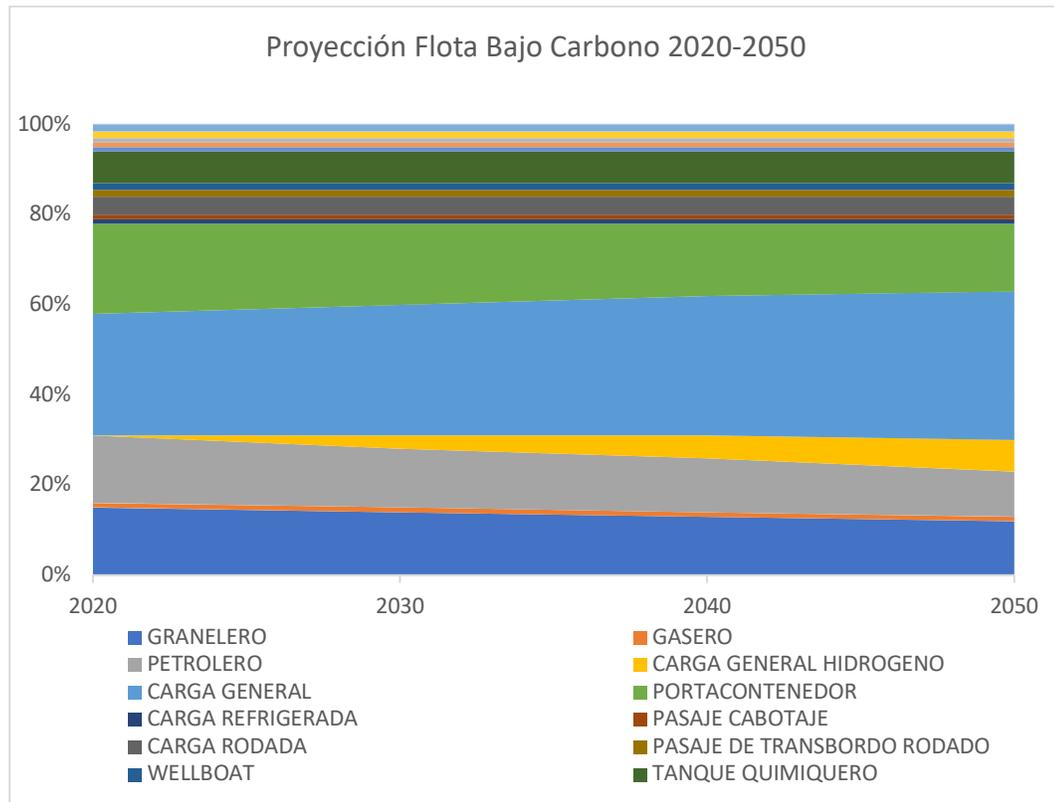


Figura 1: Escenario Bajo Carbono de la flota marítima en Chile 2020-2050.

Tabla 4: Escenario Conservador de la flota marítima en Chile 2020-2050.

Tipo de Nave	Participación 2020 %	Participación 2030 %	Participación 2040 %	Participación 2050 %
Granelero	15	15	14	13
Gasero	1	1	1	1
Petrolero	15	15	15	15
Carga general hidrogeno	0	1	3	4
Carga general	27	26,5	26	25
Portacontenedor	20	19,5	19	18
Carga refrigerada	1	1	1	1
Pasaje cabotaje	1	1	1	1
Carga rodada	4	4	4	4
Pasaje de transbordo rodado	1,5	1,5	1,5	2
Wellboat	1,5	1,5	1,5	2
Tanque quimiquero	7	7	7	7
Pasaje	1	1	1	1

Pesquero de arrastre	1	1	1	1
Pesquero de cerco	1	1	1	1
Remolcador de altamar	1,5	1,5	1,5	2
Transbordador	1,5	1,5	1,5	2

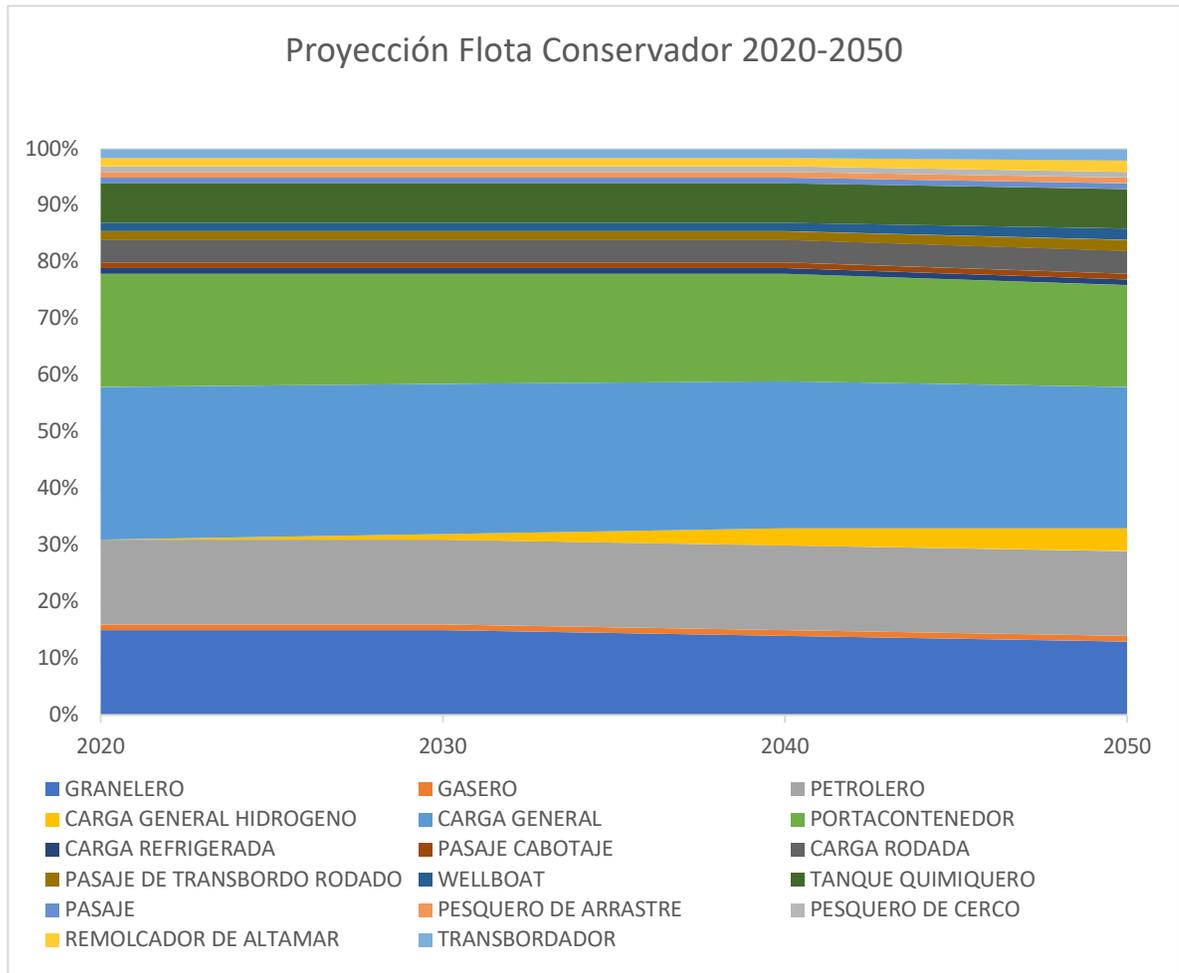


Figura 2: Escenario Conservador de la flota marítima en Chile 2020-2050.

Para poder llevar los resultados de emisiones desde emisiones por movimiento a emisiones por tonelada es necesario conocer la capacidad de carga y el factor de ocupación.

Tabla 5: Capacidad de carga por tipo de buque.

Tipo de Nave	Capacidad de Carga [ton]
Granelero	100.000
Gasero	100.000
Petrolero	80.000
Carga general hidrogeno	100.000
Carga general	80.000
Portacontenedor	10.000
Carga refrigerada	50.000
Pasaje cabotaje	10.000
Carga rodada	10.000
Pasaje de transbordo rodado	10.000
Wellboat	10.000
Tanque quimiquero	25.000
Pasaje	5.000
Pesquero de arrastre	5.000
Pesquero de cerco	5.000
Remolcador de altamar	5.000
Transbordador	10.000

El segundo elemento que es necesario conocer para poder estimar los factores de emisión por tonelada es el factor de ocupación, que corresponde al indicador que muestra la proporción de la capacidad de carga total de los buques que realmente se está utilizando.

Tabla 6: Factores de ocupación estimados para el periodo 2020-2050 por tipo de buque.

Tipo de Nave	Factor de Ocupación
Granelero	0,5
Gasero	0,5
Petrolero	0,5
Carga general hidrogeno	0,5
Carga general	0,3
Portacontenedor	0,4
Carga refrigerada	0,4
Pasaje cabotaje	0,9
Carga rodada	0,9

Pasaje de transbordo rodado	0,9
Wellboat	0,9
Tanque quimiquero	0,5
Pasaje	0,9
Pesquero de arrastre	0,8
Pesquero de cerco	0,8
Remolcador de altamar	1
Transbordador	0,9

2.3 Transporte aéreo

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), organismo especializado de la ONU, tiene como uno de sus cinco objetivos estratégicos la protección del medioambiente [19]. Dentro de este objetivo destacan las iniciativas de combustibles sustentables y el programa de crecimiento neutro de carbono.

Sustainable Aviation Fuels (SAF): en su Resolución A40-18 (2019), la Asamblea OACI pidió a los Estados miembros que adoptaran medidas para garantizar la sostenibilidad de los combustibles alternativos para la aviación, basándose en los enfoques existentes o la combinación de enfoques, y supervisar, a nivel nacional, la sostenibilidad de la producción de combustibles alternativos para la aviación. [20]

Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA): CORSIA se ha adoptado como complemento al paquete más amplio de medidas para ayudar a la OACI a alcanzar su objetivo aspiracional de crecimiento neutro en carbono a partir de 2020. CORSIA se basa en el uso de unidades de emisiones del mercado del carbono para compensar la cantidad de emisiones de CO₂ que no se pueden reducir mediante el uso de mejoras tecnológicas y operativas, y combustibles de aviación sostenibles. [21]

Al realizar una revisión de los antecedentes anteriores, no se vislumbran lineamientos normativos relevantes para la mitigación de emisiones de contaminantes criterio en la actividad aérea de Chile. No se han identificado regulaciones nacionales relacionadas con sistemas de abatimiento, como ocurre con los vehículos terrestres para controlar MP_{2.5} o NO_x generados por el proceso de combustión.

Tampoco se contemplan modificaciones en la composición actual del kerosene de aviación, como es el caso de la experiencia del combustible utilizado en el sector marítimo internacional o transporte vial, donde se regula la cantidad de azufre.

En términos tecnológicos, no se identifican alternativas de propulsión eléctrica en aviones comerciales de gran capacidad, principalmente debido a la restricción de peso que domina al sector aéreo. Existen prototipos de aviones eléctricos, pero solamente en aeronaves pequeñas aún en etapa de pruebas piloto, sin proyecciones de masificación en el mediano plazo.

2.3.1 Medida TA1: renovación de flota con motores más eficientes

La renovación de flota con aviones más eficientes es un cambio que si se ha identificado como una variable de impacto en las emisiones, que también tendría efecto en Chile. Fundamentalmente, se espera un recambio de los modelos comerciales actuales por modelos similares con tecnología *neo* (*new engine option*), que ofrecen motores con menor consumo de combustible y menor CO₂, para la misma capacidad de pasajeros. [22]

Para poder proyectar la demanda de cada modelo de avión para el periodo 2020-2050 se analizaron las estadísticas que entregan los propios fabricantes de aeronaves. Específicamente, se considera el modelo de la aeronave, el número de órdenes de compra de unidades solicitadas, número de entregas realizadas y la estadística de cuantas aeronaves de ese modelo se encuentran en operación a nivel mundial.

Para el caso de Chile, los aviones que circulan en el territorio nacional quedan muy bien representados considerando solo dos fabricantes, que son las empresas Boeing y Airbus.

Como resultado, se estima que en el recambio de flota para los escenarios Bajo Carbono y Conservador los modelos A320Neo y A321Neo aumentan notoriamente su participación, mientras que los modelos A320 y A319 bajan su participación.

Tabla 7: Escenario Bajo Carbono de la flota aérea en Chile 2020-2050.

Modelo	2020	2030	2040	2050
A320	37	32	25	19
A320neo	5	9	13	18
A321neo	1	5	10	14
A321	22	20	15	11
A319	22	15	12	9
A319neo	1	4	7	8
B788	5	6	6,5	7,3
B773	2	2,5	2,8	3
A339	0	1	2	3
B764	2	2,3	2,5	2,8
A350	0	1	1,5	2

A350	0	1	1,8	2
B744	0,7	1	1,6	1,7
A380	0	0	0	0,5
A346	0,4	0,3	0,3	0,3
B737	1	0,5	0,5	0,5
A333	0,4	0,2	0,3	0,3
A332	0,2	0,1	0,2	0,2

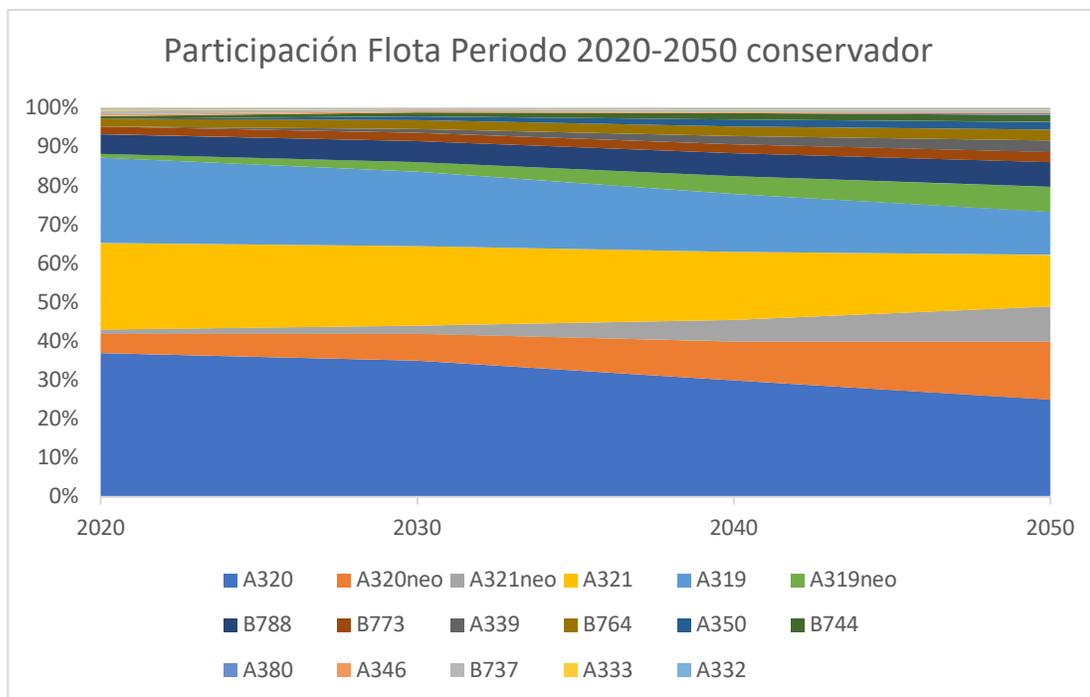


Figura 4: Escenario Conservador de la flota aérea en Chile 2020-2050.

La tasa de recambio de flota tiene distintas tasas de penetración entre los dos escenarios considerados.

2.3.2 Medida TA2: mayor factor de ocupación

Un segundo elemento que permite reducir los factores de emisión de contaminantes por pasajero es el factor de ocupación, que corresponde al indicador que muestra la proporción de la capacidad total de los aviones que realmente se está utilizando, producto de no vender todos los asientos. Para determinar los factores de ocupación a utilizar en este estudio se consultan documentos de la IATA

(International Air Transport Association) y la JAC (Junta de Aeronáutica Civil) [23, 24]. Esta información reporta estadísticas de años anteriores, las que sirven para poder proyectar el comportamiento de este factor en el periodo 2020-2050.

La tabla siguiente muestra el resultado de la proyección del factor de ocupación utilizando la evidencia tanto nacional como internacional.

Tabla 9: Factores de ocupación estimados para el periodo 2020-2050.

Año	Bajo Carbono	Conservador
2020	0,78	0,70
2030	0,83	0,73
2040	0,88	0,76
2050	0,93	0,79

2.4 Transporte ferroviario

Respecto a los escenarios para el transporte ferroviario, la Agencia Internacional de Energía (IEA) estima que para el año 2050 la presencia de locomotoras eléctricas se duplicará respecto al año 2017. Mientras que las locomotoras diésel mantendrán una presencia constante en el tiempo. [25]

En el ámbito nacional, la iniciativa más relevante relacionada con este modo de transporte es “Chile sobre rieles”. Este plan considera 25 iniciativas de infraestructura, 14 servicios, una cobertura superior a los mil kilómetros y la renovación de la flota de trenes. [26]

La flota de trenes para transporte de pasajeros en Chile es principalmente eléctrica. Las estadísticas nacionales proporcionadas por EFE estipulan una proyección del sector ferroviario de pasajero y las tecnologías asociadas a su funcionamiento, estimando que para el año 2026 un 94% de las locomotoras utilizará electricidad como fuente energética. [27]

Al contrario que el caso anterior, el transporte ferroviario de carga opera fundamentalmente con petróleo diésel. No se encontraron documentos oficiales o planes estratégicos que manifiesten modificar esta situación en el corto o mediano plazo, principalmente debido a una limitación con la trocha ferroviaria, que no está electrificada completamente.

2.4.1 Medida TF1: mayor proporción de trenes eléctricos

En la revisión de antecedentes nacionales y entrevistas con especialistas no se identificaron políticas regulatorias o de fomento tecnológico relevantes que tengan impacto en las emisiones de este modo de transporte. Sin embargo, considerando la tendencia internacional, se considera pertinente evaluar la electrificación del sector.

Se considera un 100% de trenes eléctricos para transporte de pasajeros al 2050 para ambos escenarios. Esto es debido a la alta tasa de este sistema de propulsión en la actualidad (93%).

En los trenes para transporte de carga la situación es inversa, con solo un 5% de máquinas eléctricas en la actualidad. En el caso Conservador se estima que un 10% de la flota será eléctrica al 2050, mientras que en el escenario de Bajo Carbono se asume que esta cifra alcanzará un 20%.

En base a lo anterior, se consideran las siguientes proyecciones tecnológicas para el período 2020-2050, según pasajeros y carga, en Chile.

Tabla 10: Proyecciones de participación por tecnología en el transporte ferroviario.

Modo	Año	Bajo Carbono		Conservador	
		Participación por categoría		Participación por categoría	
		% Diesel	% Eléctricas	% Diesel	% Eléctricas
Pasajeros	2020	7%	93%	7%	93%
	2030	6%	94%	6%	94%
	2040	3%	97%	3%	97%
	2050	0%	100%	0%	100%
Carga	2020	95%	5%	95%	5%
	2030	90%	10%	93%	7%
	2040	85%	15%	92%	8%
	2050	80%	20%	90%	10%

2.5 Resumen escenarios propuestos

En base a lo anterior, se proponen dos escenarios, los que corresponden a un paquete de medidas que incluyen los modos vial, marítimo, aéreo y ferroviario.

2.5.1 Escenario Bajo Carbono:

- Transporte vial. Implementación norma EURO 6/VI en Chile el 2023 junto con una penetración de electromovilidad designada por un 100% de transporte público eléctrico para el 2040 y un 50% de vehículos privados para el 2050 además de un 50% de camiones pesados a hidrógeno para el 2050.
- Transporte marítimo. Contenido de azufre de 0.5% para combustible de motores principales al año 2020.
- Transporte aéreo. Recambio acelerado de flota incorporando un mayor número de aviones nuevos a la flota y disminuyendo la participación de aviones más antiguos. Además, se considera un factor de ocupación creciente con una variación de 6 puntos porcentuales en el periodo 2020-2050.
- Ferrocarriles. Crecimiento lineal de la participación de locomotoras eléctricas en el área de transporte de pasajeros y carga hasta llegar a duplicar su proporción para el año 2050.

2.5.2 Escenario Conservador:

- Transporte vial. Implementación norma EURO 6/VI en Chile el 2030 junto con una penetración de electromovilidad designada por un 100% de transporte público eléctrico para el 2040 y un 30% de vehículos privados para el 2050 además de un 10% de camiones pesados a hidrógeno para el 2050.
- Transporte marítimo. Contenido de azufre de 0.5% para combustible de motores principales al año 2023.
- Transporte aéreo. Recambio paulatino de flota incorporando de forma más conservadora los nuevos modelos de avión y reduciendo la salida de aviones más antiguos. Con respecto al factor de ocupación se mantiene constante durante el periodo 2020-2050.
- Ferrocarriles. Crecimiento nulo de la participación de locomotoras eléctricas en el área de transporte de pasajeros y carga hasta el año 2050.

3 Factores de emisión

Los distintos escenarios, con sus respectivas medidas, han sido modelados para cuatro cortes temporales (2020, 2030, 2040, 2050), para determinar la composición de las flotas de transporte en cada uno de los modos de análisis:

- 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 (Climb, Cruise, Descent, CCD); maniobras bajo 3000 pies y en tierra (Landing, Take-Off, LTO); ambos para movilidad de pasajeros
- Transporte marítimo: desplazamientos en océano, maniobras en puerto, ambas para movilidad de carga
- Transporte ferroviario: movilidad de pasajeros, movilidad de carga

Para cada subcategoría vehicular, correspondiente a cada uno de los modos de transporte, se aplican metodologías de asignación de factores de emisión por unidad de actividad para los distintos compuestos químicos considerados. El resumen de cada caso se indica en la tabla siguiente.

Tabla 11: Compuestos para los cuales se reporta factor de emisión

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	✓	✓	✓			✓	✓	

Los compuestos químicos corresponden a los siguientes elementos:

- CO₂: dióxido de carbono, gas efecto invernadero
- MP_{2.5}: material particulado respirable, contaminante criterio
- NO_x: óxidos de nitrógeno, contaminante criterio
- CO: monóxido de carbono, contaminante criterio
- SO_x: óxidos de azufre, contaminante criterio
- CN: carbono negro, forzante vida corta de cambio climático
- HC: hidrocarburos, contaminante criterio
- CH₄: metano, gas efecto invernadero

Las unidades utilizadas tienen la siguiente terminología:

- g/vkm: gramos/vehículo·kilómetro
- g/pkm: gramos/pasajero·kilómetro
- g/tkm: gramos/tonelada·kilómetro
- g/pax: gramos/pasajero
- g/ton: gramos/tonelada

3.1 Metodologías seleccionadas para la estimación de emisiones

- **Transporte Vial:** Para la estimación de emisiones del transporte vial, se considera la metodología TIER 3 de IPCC [27] junto a los factores de emisión por tecnología vehicular reportados por COPERT 4. [29]
- **Transporte Aéreo:** Para la estimación de emisiones del transporte aéreo se utiliza la metodología facilitada por la EEA [30], dentro de la cual se elige el nivel TIER 3-a ya que este nivel proporciona los diferentes factores de emisión para los modelos representativos que se analizan para las flotas del periodo 2020-2050.
- **Transporte Marítimo:** Para la estimación de emisiones del transporte marítimo se utiliza la metodología desarrollada por ENTEK UK [31], en conjunto con el documento de SMED [32], que proporciona los factores de emisión asociados al tipo de movimiento.
- **Ferrocarriles:** Para la estimación de emisiones del transporte ferroviario se considera la metodología desarrollada por el banco de inversiones europeo (EIB) en conjunto a la organización mundial de ferrocarriles (UIC). [33]

Como resultado de los escenarios propuestos y sus medidas respectivas, se obtienen los factores de emisión reportados en las secciones siguientes, para cada modo de transporte, contaminante y corte temporal.

3.2 Factores de emisión transporte vial

A continuación, se reportan los factores de emisión de CO₂ obtenidos para transporte vial interzonal e intrazonal, considerando velocidades medias representativas para cada caso.

Tabla 12: Factores de emisión transporte vial CO₂

Transporte Vial		2020		2030		2040		2050		Unidad
		Bajo Carbono	Conservador							
Interzonal	VL	177	177	177	177	172	174	118	143	g/vkm
	BUS	625	625	619	619	607	610	496	548	
	C2E	598	598	592	592	580	583	469	521	
	CM2	660	660	654	654	642	645	530	583	
Intrazonal	VL	240	240	240	240	232	233	173	192	
	BUS	1171	1171	1093	1093	940	948	832	854	
	C2E	471	471	466	466	456	459	360	405	
	CM2	1113	1113	1096	1097	1057	1081	694	1007	

Para el transporte vial interzonal se reportan los factores de emisión de CO₂ como función de la velocidad media de desplazamiento en carreteras interurbanas, para cada escenario.

Tabla 13: Factores de emisión transporte vial interzonal CO₂ escenario Bajo Carbono.

Ambito	Categoria	Vel [km/h]	CO2 [g/vkm]				
			2017	2020	2030	2040	2050
Interzonal	VL	10	319.37	320.14	320.45	315.88	261.62
		20	277.95	278.72	279.04	274.47	220.21
		30	242.90	243.67	243.99	239.42	185.16
		40	214.21	214.98	215.30	210.72	156.47
		50	191.88	192.65	192.96	188.39	134.14
		60	175.91	176.68	176.99	172.42	118.16
		70	166.29	167.06	167.38	162.81	108.55
		80	163.04	163.81	164.13	159.56	105.30
		90	166.15	166.92	167.24	162.66	108.41
		100	175.62	176.39	176.70	172.13	117.88
		110	191.45	192.22	192.53	187.96	133.70

	120	213.63	214.40	214.72	210.15	155.89
BUS	10	1716.87	1714.26	1708.48	1696.47	1584.99
	20	1418.07	1415.46	1409.68	1397.67	1286.19
	30	1159.73	1157.12	1151.34	1139.33	1027.85
	40	941.85	939.24	933.46	921.45	809.97
	50	764.43	761.82	756.04	744.03	632.55
	60	627.47	624.86	619.08	607.07	495.59
	70	530.97	528.36	522.58	510.57	399.09
	80	474.93	472.32	466.54	454.53	343.05
	90	459.35	456.74	450.96	438.95	327.47
	100	484.23	481.62	475.84	463.83	352.35
	110	549.57	546.96	541.18	529.17	417.69
	120	655.37	652.76	646.98	634.97	523.49
C2E	10	1130.14	1127.52	1121.75	1109.73	998.25
	20	957.46	954.84	949.07	937.05	825.57
	30	818.16	815.54	809.77	797.75	686.27
	40	712.24	709.62	703.85	691.83	580.35
	50	639.70	637.08	631.31	619.29	507.81
	60	600.54	597.92	592.15	580.13	468.65
	70	594.76	592.14	586.37	574.35	462.87
	80	622.36	619.74	613.97	601.95	490.47
	90	683.34	680.72	674.95	662.93	551.45
	100	777.70	775.08	769.31	757.29	645.81
	110	905.44	902.82	897.05	885.03	773.55
	120	1066.56	1063.94	1058.17	1046.15	934.67
CM2	10	1404.60	1401.98	1396.21	1384.19	1272.71
	20	1202.50	1199.88	1194.11	1182.09	1070.61
	30	1027.22	1024.60	1018.83	1006.81	895.33
	40	878.76	876.14	870.37	858.35	746.87
	50	757.12	754.50	748.73	736.71	625.23
	60	662.30	659.68	653.91	641.89	530.41
	70	594.30	591.68	585.91	573.89	462.41
	80	553.12	550.50	544.73	532.71	421.23
	90	538.76	536.14	530.37	518.35	406.87
	100	551.22	548.60	542.83	530.81	419.33
	110	590.50	587.88	582.11	570.09	458.61
	120	656.60	653.98	648.21	636.19	524.71

Tabla 14: Factores de emisión transporte vial interzonal CO₂ escenario Conservador.

Ambito	Categoria	Vel [km/h]	CO2 [g/vkm]				
			2017	2020	2030	2040	2050
Interzonal	VL	10	319.37	320.14	320.52	317.42	286.50
		20	277.95	278.72	279.11	276.01	245.09
		30	242.90	243.67	244.05	240.96	210.03
		40	214.21	214.98	215.36	212.27	181.34
		50	191.88	192.65	193.03	189.94	159.01
		60	175.91	176.68	177.06	173.96	143.04
		70	166.29	167.06	167.45	164.35	133.43
		80	163.04	163.81	164.19	161.10	130.17
		90	166.15	166.92	167.30	164.21	133.28
		100	175.62	176.39	176.77	173.68	142.75
		110	191.45	192.22	192.60	189.50	158.58
		120	213.63	214.40	214.79	211.69	180.77
	BUS	10	1716.87	1714.26	1708.59	1699.47	1637.36
		20	1418.07	1415.46	1409.79	1400.67	1338.56
		30	1159.73	1157.12	1151.45	1142.33	1080.22
		40	941.85	939.24	933.57	924.45	862.34
		50	764.43	761.82	756.15	747.03	684.92
		60	627.47	624.86	619.19	610.07	547.96
		70	530.97	528.36	522.69	513.57	451.46
		80	474.93	472.32	466.65	457.53	395.42
		90	459.35	456.74	451.07	441.95	379.84
		100	484.23	481.62	475.95	466.83	404.72
		110	549.57	546.96	541.29	532.17	470.06
		120	655.37	652.76	647.09	637.97	575.86
	C2E	10	1130.14	1127.52	1121.85	1112.74	1050.63
		20	957.46	954.84	949.17	940.06	877.95
		30	818.16	815.54	809.87	800.76	738.65
		40	712.24	709.62	703.95	694.84	632.73
		50	639.70	637.08	631.41	622.30	560.19
		60	600.54	597.92	592.25	583.14	521.03
		70	594.76	592.14	586.47	577.36	515.25
		80	622.36	619.74	614.07	604.96	542.85
		90	683.34	680.72	675.05	665.94	603.83

		100	777.70	775.08	769.41	760.30	698.19
		110	905.44	902.82	897.15	888.04	825.93
		120	1066.56	1063.94	1058.27	1049.16	987.05
	CM2	10	1404.60	1401.98	1396.31	1387.20	1325.09
		20	1202.50	1199.88	1194.21	1185.10	1122.99
		30	1027.22	1024.60	1018.93	1009.82	947.71
		40	878.76	876.14	870.47	861.36	799.25
		50	757.12	754.50	748.83	739.72	677.61
		60	662.30	659.68	654.01	644.90	582.79
		70	594.30	591.68	586.01	576.90	514.79
		80	553.12	550.50	544.83	535.72	473.61
		90	538.76	536.14	530.47	521.36	459.25
		100	551.22	548.60	542.93	533.82	471.71
		110	590.50	587.88	582.21	573.10	510.99
		120	656.60	653.98	648.31	639.20	577.09

Los factores de emisión de los compuestos MP_{2.5}, NO_x, CO, HC, CH₄ y CN se han calculado con el mismo formato presentado para CO₂. Estos resultados se incluyen como anexo digital, incluyendo las diferencias porcentuales entre años y escenarios.

3.3 Factores de emisión transporte marítimo

A continuación, se reportan los factores de emisión de todos los compuestos obtenidos para transporte marítimo, considerando desplazamientos en océano y maniobras en puerto.

Tabla 15: Factores de emisión transporte marítimo

Ambito	Contaminante	Bajo Carbono				Conservador				Unidad
		2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	
Oceano	CO2	7.5	5.9	4.8	4.0	7.5	7.0	6.4	6.0	[g/tkm]
	NOx	0.153	0.121	0.098	0.082	0.153	0.142	0.131	0.122	
	CO	0.012	0.010	0.008	0.007	0.012	0.011	0.010	0.010	
	SOx	0.026	0.020	0.017	0.014	0.026	0.024	0.022	0.021	
	MP2.5	0.003	0.003	0.002	0.002	0.003	0.003	0.003	0.003	
Maniobras + Puerto	CO2	5603.7	4558.9	3824.8	3311.9	5603.7	5191.5	4748.8	4423.1	[g/ton]
	NOx	109.4	89.0	74.7	64.7	109.4	101.4	92.7	86.4	

CO	7.378	6.001	5.033	4.357	7.378	6.835	6.253	5.824
SOx	13.849	11.266	9.451	8.183	13.849	12.830	11.736	10.932
MP2.5	1.644	1.337	1.121	0.971	1.644	1.523	1.394	1.298

Las diferencias porcentuales entre los escenarios Bajo Carbono y Conservador para cada año se indican en la tabla siguiente:

Tabla 16: Reducción factores de emisión transporte marítimo

Ambito	Contaminante	Porcentaje reducción			
		2020	2030	2040	2050
Oceano	CO2	0%	15%	25%	32%
	NOx	0%	15%	25%	32%
	CO	0%	15%	25%	32%
	SOx	0%	15%	24%	32%
	MP2.5	0%	15%	25%	33%
Maniobras + Puerto	CO2	0%	12%	19%	25%
	NOx	0%	12%	19%	25%
	CO	0%	12%	20%	25%
	SOx	0%	12%	19%	25%
	MP2.5	0%	12%	20%	25%

3.4 Factores de emisión transporte aéreo

A continuación, se reportan los factores de emisión de todos los compuestos obtenidos para transporte aéreo, considerando desplazamientos CCD y LTO.

Tabla 17: Factores de emisión transporte aéreo

Ambito	Compuesto	Bajo Carbono				Conservador				Unidad
		2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	
CCD	CO2	64.143	55.549	47.528	41.147	71.474	65.063	57.1091	50.2594	g/pkm
	HC	0.0082	0.0066	0.0056	0.0047	0.0091	0.0082	0.0070	0.0061	
	NOx	0.3269	0.2798	0.2344	0.1988	0.3643	0.3290	0.2852	0.2467	
	PM	0.0035	0.0031	0.0027	0.0023	0.0039	0.0035	0.0031	0.0028	
	CO	0.0479	0.0398	0.0336	0.0284	0.0533	0.0481	0.0413	0.0358	
LTO	CO2	16489	14482	12530	11010	18373	16810	14904	13284	g/pax
	HC	7.4360	5.9655	4.9766	4.1391	8.2858	7.4417	6.2821	5.4264	
	NOx	71.6440	62.5824	53.0943	45.8332	79.8319	72.5834	63.7565	55.9519	
	PM	0.5515	0.4802	0.4034	0.3431	0.6145	0.5541	0.4841	0.4180	
	CO	47.2315	40.1933	34.6618	30.1928	52.6294	48.0313	41.9931	37.2676	

Las diferencias porcentuales entre los escenarios Bajo Carbono y Conservador para cada año se indican en la tabla siguiente:

Tabla 18: Reducción factores de emisión transporte aéreo

Ambito	Contaminante	Porcentaje reducción			
		2020	2030	2040	2050
CCD	CO2	10%	15%	17%	18%
	HC	10%	19%	20%	23%
	NOx	10%	15%	18%	19%
	MP2.5	10%	12%	15%	16%
	CO	10%	17%	19%	21%
LTO	CO2	10%	14%	16%	17%
	HC	10%	20%	21%	24%
	NOx	10%	14%	17%	18%
	MP2.5	10%	13%	17%	18%
	CO	10%	16%	17%	19%

3.5 Factores de emisión transporte ferroviario

A continuación, se reportan los factores de emisión de todos los compuestos obtenidos para transporte ferroviario, considerando movilidad de pasajeros y carga.

Tabla 19: Factores de emisión transporte ferroviario.

Categoría	Contaminante	Bajo Carbono				Conservador				Unidades
		2020	2030	2040	2050	2020	2030	2040	2050	
Pasajeros	CO2	26.26	12.03	7.27	4.59	26.16	12.70	10.92	9.26	g/pkm
	HC	0.004	0.004	0.002	0.000	0.004	0.004	0.002	0.000	
	NOx	0.050	0.043	0.022	0.000	0.050	0.043	0.022	0.000	
	MP2.5	0.001	0.001	0.001	0.000	0.001	0.001	0.001	0.000	
Carga	CO2	20.69	19.53	18.44	17.38	20.69	20.08	19.88	19.49	g/tkm
	HC	0.061	0.058	0.054	0.051	0.061	0.059	0.059	0.058	
	NOx	0.722	0.683	0.645	0.607	0.722	0.706	0.698	0.683	
	MP2.5	0.019	0.018	0.017	0.016	0.019	0.019	0.018	0.018	

Las diferencias porcentuales entre los escenarios Bajo Carbono y Conservador para cada año se indican en la tabla siguiente:

Tabla 20: Reducción factores de emisión transporte ferroviario

Categoria	Contaminante	Porcentaje reducción			
		2020	2030	2040	2050
Pasajeros	CO2	0%	 5%	 33%	 50%
	HC	0%	0%	0%	
	NOX	0%	0%	0%	
	MP2.5	0%	0%	0%	
Carga	CO2	0%	 3%	 7%	 11%
	HC	0%	 3%	 8%	 11%
	NOX	0%	 3%	 8%	 11%
	MP2.5	0%	 3%	 8%	 11%

4 Emisiones anuales 2017-2050

Se han evaluado dos modelaciones de actividad (movilidad) de transporte nacional para los años 2017 y 2050. Una de las modelaciones corresponde al caso línea base (BASE) y el otro a la situación con paquetes de medidas (PLAN).

Realizando el producto entre los niveles de actividad proporcionados por el modelo de movilidad y los factores de emisión de ambos escenarios, para cada corte temporal, se generan los resultados de emisiones por contaminante en toneladas/año para cada caso.

4.1 Emisiones de dióxido de carbono CO₂

Un resumen de las emisiones anuales de CO₂, para los principales modos de transporte incluidos en la modelación, se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 21: Emisiones CO₂ en miles de toneladas anuales

CO2	2017-BASE	2017-PLAN	2050-BASE-BCARB	2050-BASE-CONS	2050-PLAN-BCARB	2050-PLAN-CONS
VIAL-INTER	12,764	11,847	26,418	29,731	22,948	26,069
VIAL-INTRA	5,506	5,506	11,269	12,422	11,269	12,422
FERROVIARIO	50	208	118	147	219	283
AEREO	2,142	1,931	5,068	6,169	4,476	5,449
MARITIMO	1,417	1,914	1,579	2,289	2,487	3,496
TOTAL	21,879	21,407	44,452	50,759	41,399	47,719

Los resultados de la tabla anterior se presentan gráficamente en la figura siguiente:

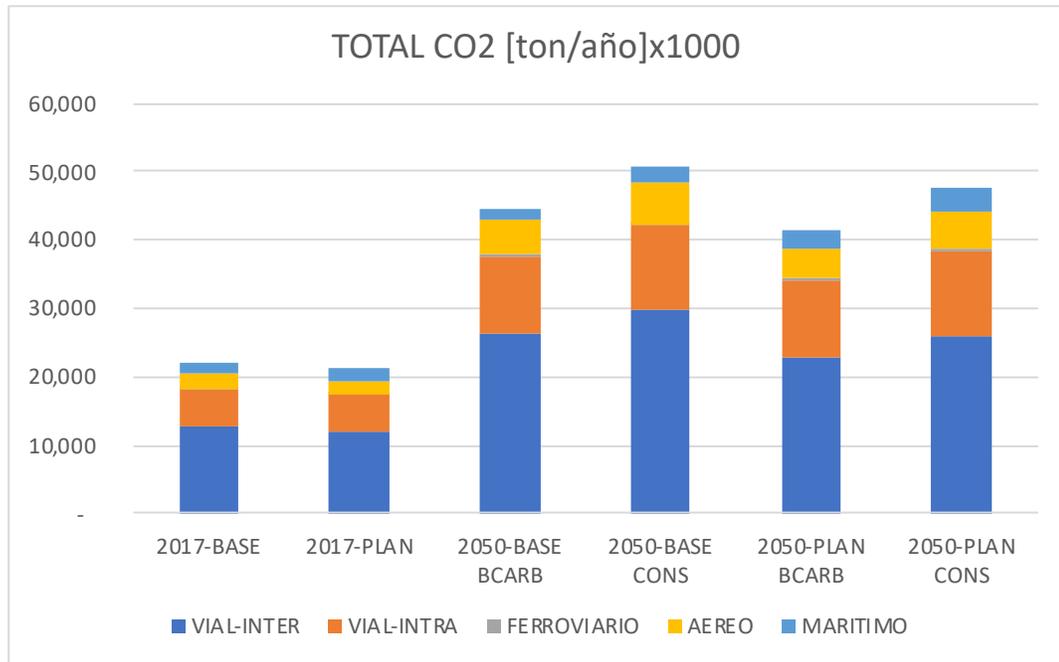


Figura 5: Emisiones totales de CO₂

La proporción de participación entre los distintos modos de transporte, para la situación 2017-BASE y 2050-PLAN con escenario Bajo Carbono, se indica comparativamente a continuación:

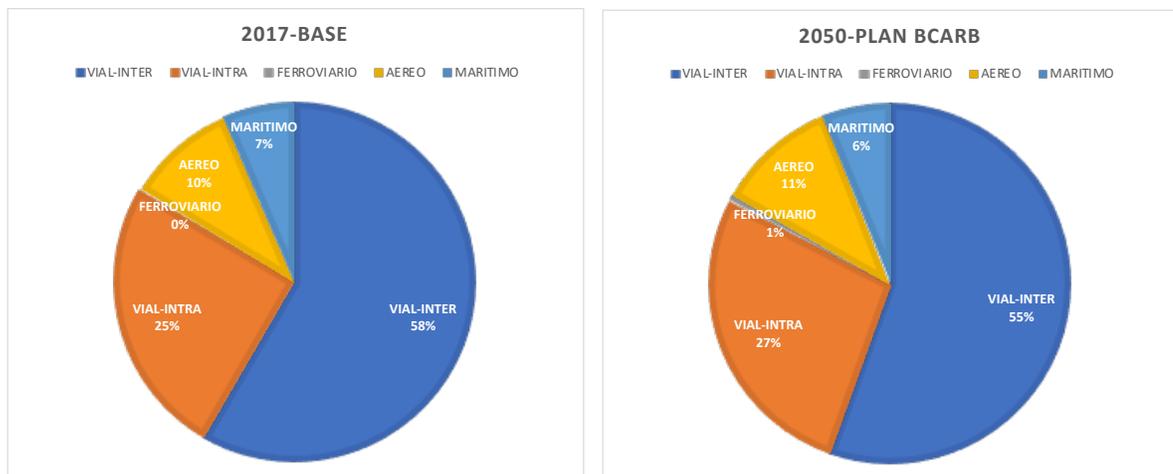


Figura 6: Proporción emisiones de CO₂ año 2017 y 2050 por modo de transporte

Se analiza separadamente el modo transporte vial, dividido entre interzonal e intrazonal, considerando en cada caso vehículos livianos (VL), buses (BUS), camiones de dos ejes (C2E) y camiones con más de dos ejes (CM2).

Tabla 22: Emisiones CO₂ transporte vial en miles de toneladas anuales

Categoría		2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
		CNeutral	Cons	CNeutral	Cons	CNeutral	Cons	CNeutral	Cons
Interzonal	VL	7,150	7,150	6,844	6,844	17,626	20,151	15,889	18,349
	BUS	2,238	2,238	1,881	1,881	991	1,055	724	777
	C2E	939	939	1,015	1,015	1,830	1,992	1,894	2,056
	CM2	2,437	2,437	2,107	2,107	5,971	6,534	4,441	4,886
Intrazonal	VL	4,055	4,055	4,055	4,055	9,140	10,122	9,140	10,122
	BUS	1,078	1,078	1,078	1,078	951	977	951	977
	C2E	373	373	373	373	1,177	1,323	1,177	1,323
	CM2	-	-	-	-	-	-	-	-

Considerando que las emisiones del año 2017 son muy similares para los dos escenarios considerados (BCarbono y Cons), se considera el promedio de ambos:

Tabla 23: Emisiones CO₂ transporte vial en miles de toneladas anuales

	2017-BASE-PROM	2017-PLAN-PROM	2050-BASE-BCARB	2050-BASE-CONS	2050-PLAN-BCARB	2050-PLAN-CONS
VIAL-INTER-VL	7,150	6,844	17,626	20,151	15,889	18,349
VIAL-INTER-BUS	2,238	1,881	991	1,055	724	777
VIAL-INTER-C2E	939	1,015	1,830	1,992	1,894	2,056
VIAL-INTER-CM2	2,437	2,107	5,971	6,534	4,441	4,886
VIAL-INTRA-VL	4,055	4,055	9,140	10,122	9,140	10,122
VIAL-INTRA-BUS	1,078	1,078	951	977	951	977
VIAL-INTRA-C2E	373	373	1,177	1,323	1,177	1,323
TOTAL	18,269	17,353	37,687	42,153	34,217	38,491

Gráficamente, la proporción en emisiones de CO₂ para las categorías de transporte vial se indica en la figura siguiente:

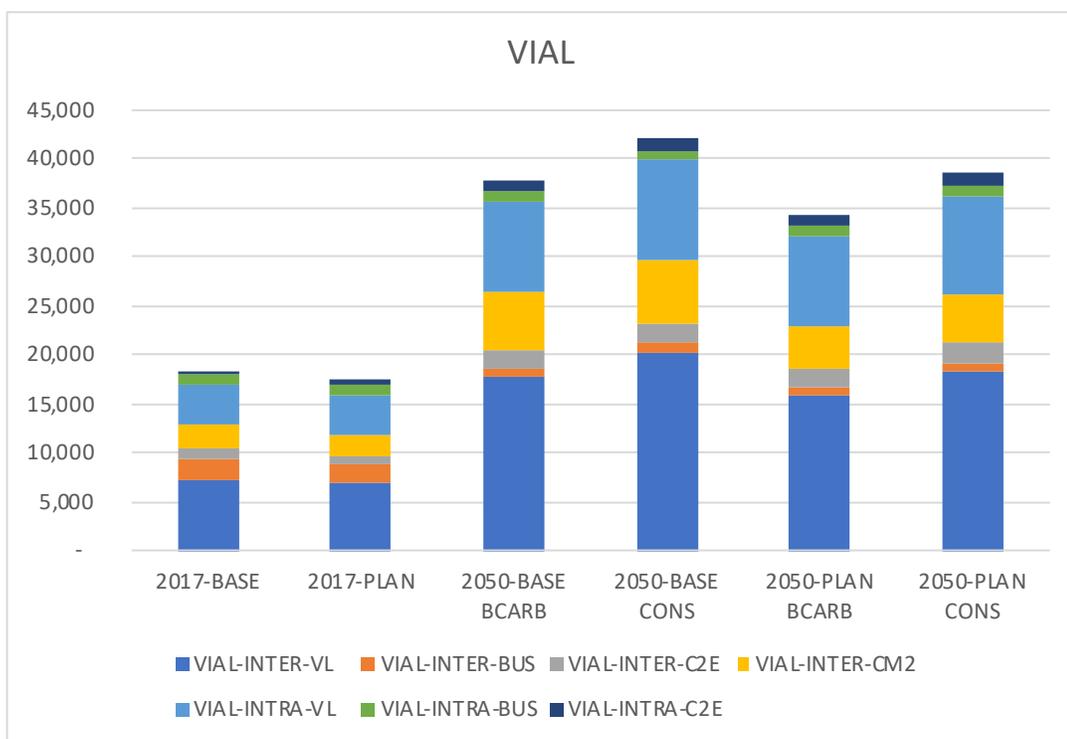


Figura 7: Proporción emisiones de CO₂ año 2017 modos de transporte vial.

Para los modos correspondientes a transporte ferroviario, aéreo y marítimo, se reportan los resultados siguientes:

Tabla 24: Emisiones CO₂ transporte ferroviario en miles de toneladas anuales

Categoría	2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
Carga	28	28	91	91	101	114	177	198
Pasajeros	23	22	117	117	17	34	42	85

Tabla 25: Emisiones CO₂ transporte aéreo en miles de toneladas anuales

Categoría	2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
CCD	1,505	1,677	1,388	1,546	3,608	4,407	3,274	3,999
LTO	521	581	439	490	1,461	1,762	1,202	1,450

Tabla 26: Emisiones CO₂ transporte marítimo en miles de toneladas anuales

Categoría	2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
Océano	1,048	1,048	1,008	1,008	1,279	1,888	1,235	1,824
Maniobras + Puerto	369	369	906	906	300	401	1,252	1,672

La proporción entre los modos ferroviario, aéreo y marítimo, para los distintos escenarios de CO₂, es la siguiente:

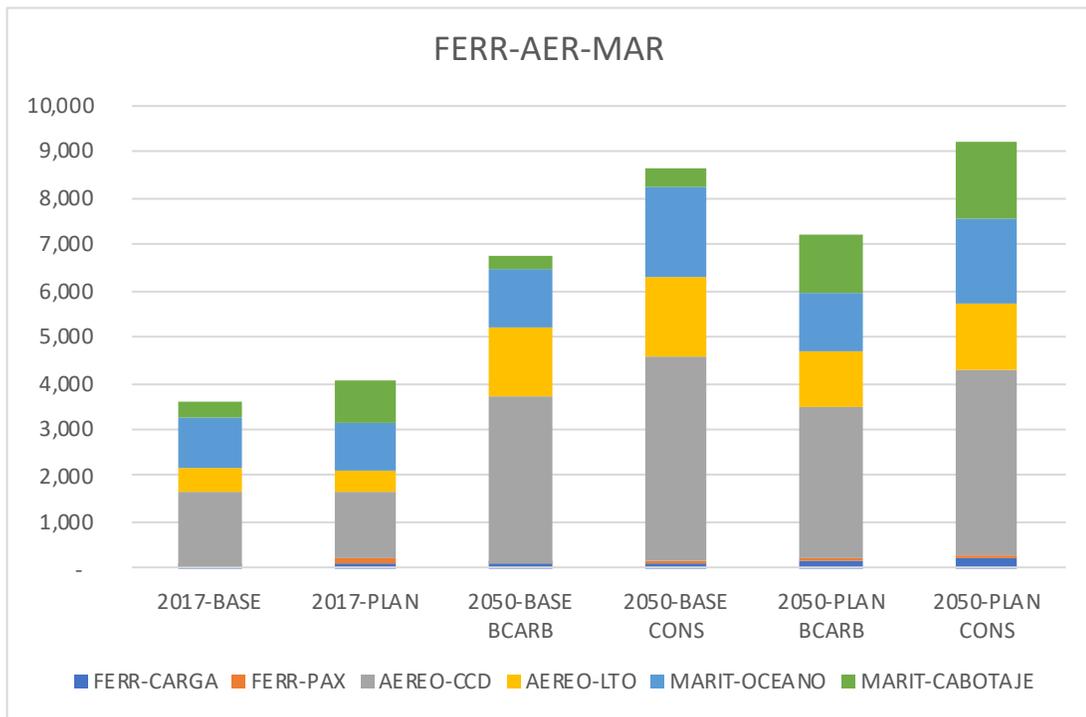


Figura 8: Proporción entre modos de transporte para CO₂

4.2 Emisiones de material particulado MP2.5

Un resumen de las emisiones anuales de MP_{2.5}, producto de la combustión, para los principales modos de transporte incluidos en la modelación, se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 27: Emisiones MP_{2.5} en toneladas anuales

MP2.5	2017-BASE	2017-PLAN	2050-BASE-BCARB	2050-BASE-CONS	2050-PLAN-BCARB	2050-PLAN-CONS
VIAL-INTER	1,133	1,043	222	268	201	243
VIAL-INTRA	322	322	89	104	89	104
FERROVIARIO	27	89	93	105	163	183
AEREO	105	95	250	299	223	266
MARITIMO	555	696	627	922	888	1,268
TOTAL	2,142	2,246	1,281	1,698	1,564	2,065

Los resultados de la tabla anterior se presentan gráficamente en la figura siguiente:

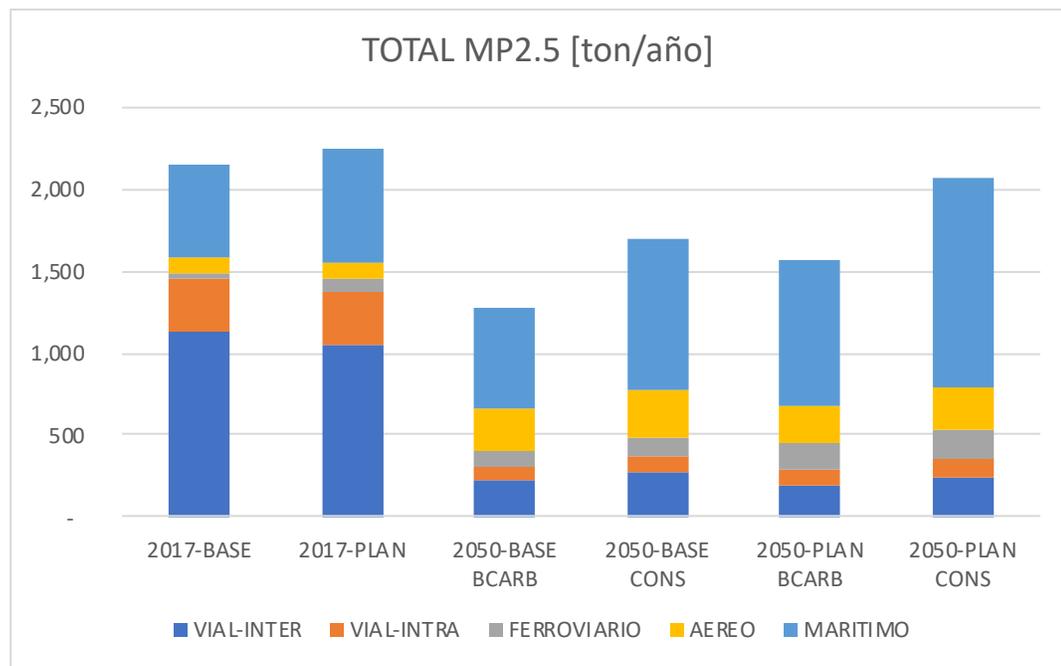


Figura 9: Emisiones totales de MP_{2.5}

La proporción de participación entre los distintos modos de transporte, para la situación 2017-BASE y 2050-PLAN con escenario Bajo Carbono, se indica comparativamente a continuación:

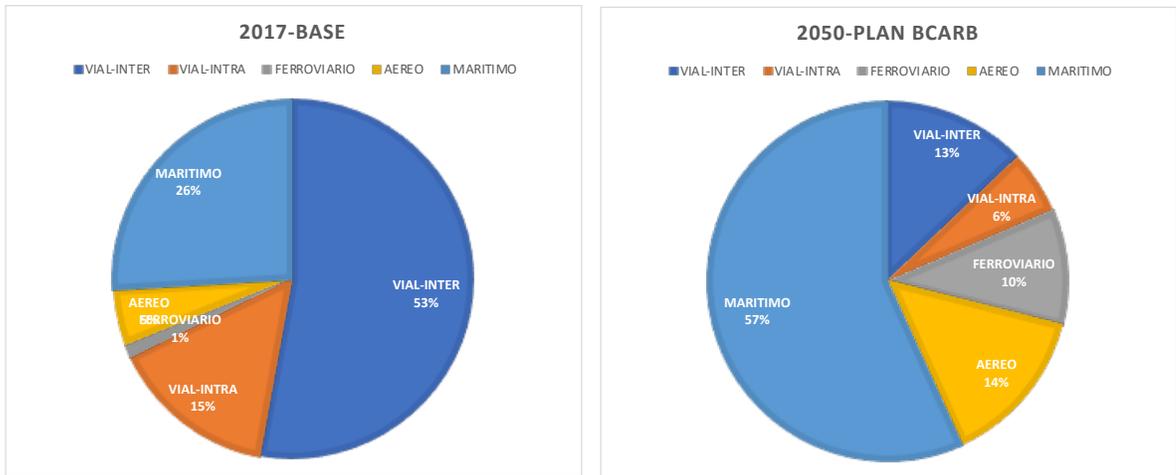


Figura 10: Proporción emisiones de MP_{2.5} año 2017 y 2050, por modo de transporte.

Se analiza separadamente el modo transporte vial, dividido entre interzonal e intrazonal, considerando en cada caso vehículos livianos (VL), buses (BUS), camiones de dos ejes (C2E) y camiones con más de dos ejes (CM2).

Tabla 28: Emisiones MP_{2.5} transporte vial en toneladas anuales

Categoría		2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
		BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
Interzonal	VL	443	443	434	434	155	182	145	171
	BUS	246	246	220	220	15	17	11	13
	C2E	64	64	63	63	14	18	13	17
	CM2	379	379	325	325	38	52	31	42
Intrazonal	VL	159	159	159	159	58	66	58	66
	BUS	113	113	113	113	9	11	9	11
	C2E	50	50	50	50	21	27	21	27
	CM2	-	-	-	-	-	-	-	-

Considerando que las emisiones del año 2017 son muy similares para los dos escenarios considerados (BajoCarb y Cons), se considera el promedio de ambos:

Tabla 29: Emisiones MP_{2.5} transporte vial en toneladas anuales

	2017-BASE-PROM	2017-PLAN-PROM	2050-BASE-BCARB	2050-BASE-CONS	2050-PLAN-BCARB	2050-PLAN-CONS
VIAL-INTER-VL	443	434	155	182	145	171
VIAL-INTER-BUS	246	220	15	17	11	13
VIAL-INTER-C2E	64	63	14	18	13	17
VIAL-INTER-CM2	379	325	38	52	31	42
VIAL-INTRA-VL	159	159	58	66	58	66
VIAL-INTRA-BUS	113	113	9	11	9	11
VIAL-INTRA-C2E	50	50	21	27	21	27
TOTAL	1,455	1,365	310	372	289	348

Gráficamente, la proporción en emisiones de MP_{2.5} para las categorías de transporte vial se indica en la figura siguiente:

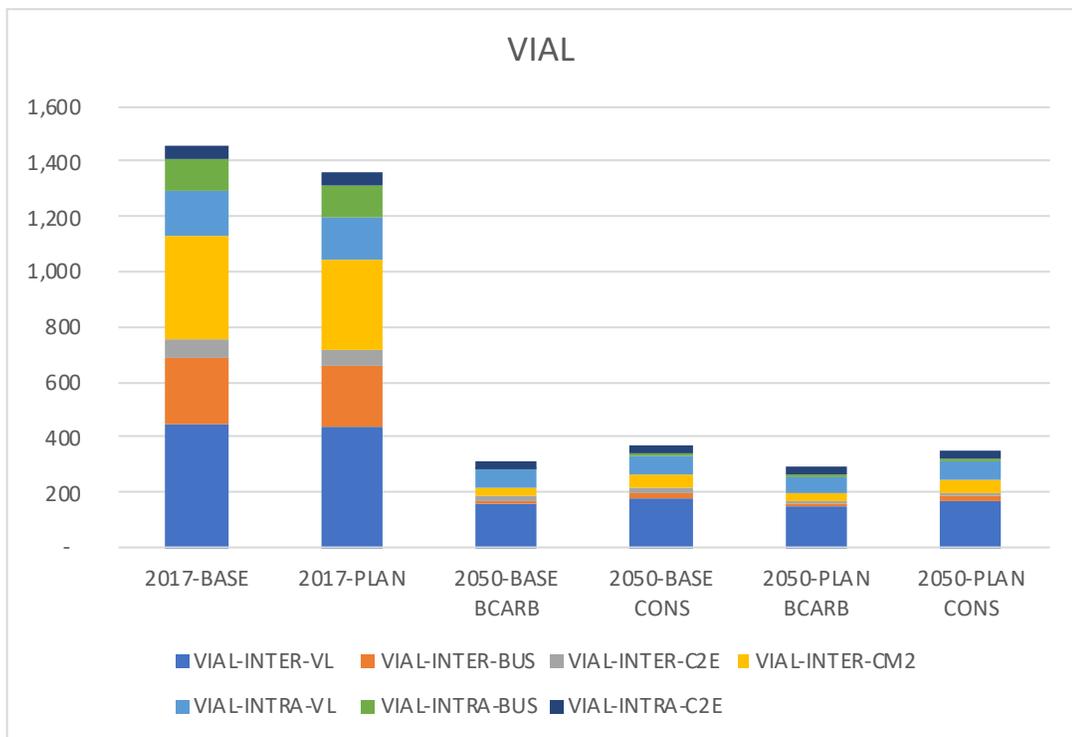


Figura 11: Proporción emisiones de MP_{2.5} año 2017 modos de transporte vial

Para los modos correspondientes a transporte ferroviario, aéreo y marítimo, se reportan los resultados siguientes:

Tabla 30: Emisiones MP_{2.5} transporte ferroviario en toneladas anuales

Categoría	2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
Carga	26	26	83	83	93	105	163	183
Pasajeros	1	1	6	6	-	-	-	-

Tabla 31: Emisiones MP_{2.5} transporte aéreo en toneladas anuales

Categoría	2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
CCD	82	91	75	84	205	243	186	221
LTO	17	19	15	16	46	55	37	46

Tabla 32: Emisiones MP_{2.5} transporte marítimo en toneladas anuales

Categoría	2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
Océano	447	447	430	430	539	804	521	777
Maniobras + Puerto	108	108	266	266	88	118	367	491

La proporción entre los modos ferroviario, aéreo y marítimo, para los distintos escenarios de MP_{2.5}, es la siguiente:

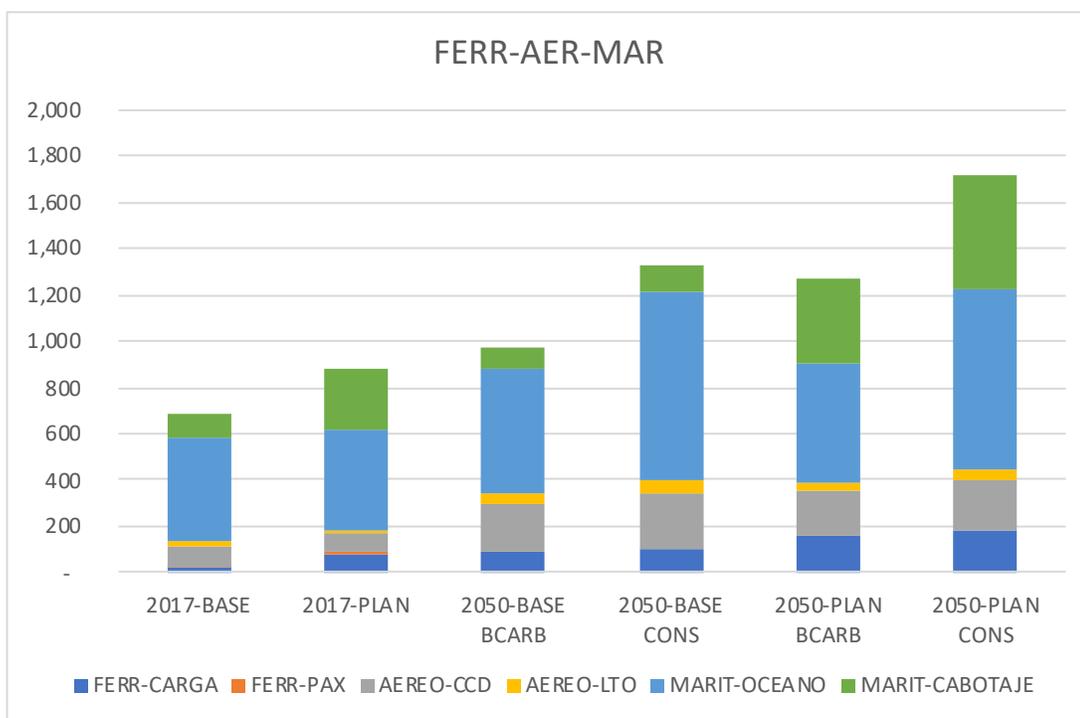


Figura 12: Proporción entre modos de transporte para MP_{2.5}

4.3 Emisiones de óxidos de nitrógeno NO_x

Un resumen de las emisiones anuales de NO_x, para los principales modos de transporte incluidos en la modelación, se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 33: Emisiones NO_x en toneladas anuales

NO _x	2017-BASE	2017-PLAN	2050-BASE-BCARB	2050-BASE-CONS	2050-PLAN-BCARB	2050-PLAN-CONS
VIAL-INTER	24,481	22,559	15,686	21,486	13,556	18,742
VIAL-INTRA	8,271	8,271	7,578	9,700	7,578	9,700
FERROVIARIO	1,017	3,394	3,542	3,985	6,180	6,953
AEREO	10,502	9,494	23,511	29,050	20,822	25,736
MARITIMO	28,589	38,261	31,900	46,327	49,608	69,846
TOTAL	72,860	81,980	82,217	110,548	97,744	130,976

Los resultados de la tabla anterior se presentan gráficamente en la figura siguiente:

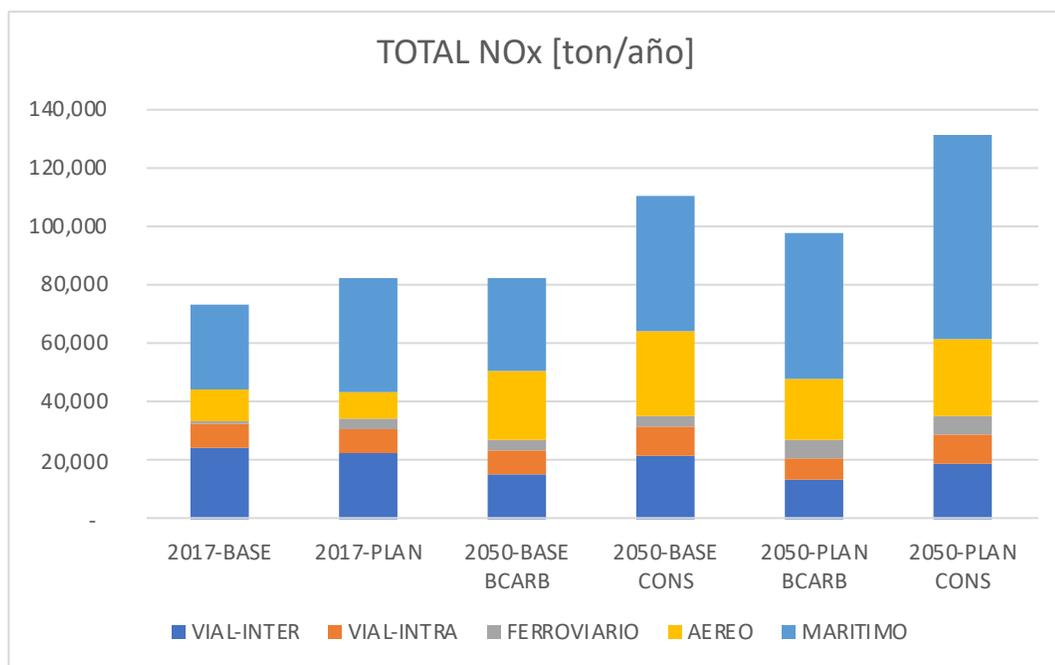


Figura 13: Emisiones totales de NOx

La proporción de participación entre los distintos modos de transporte, para la situación 2017-BASE y 2050-PLAN con escenario Bajo Carbono, se indica comparativamente a continuación:

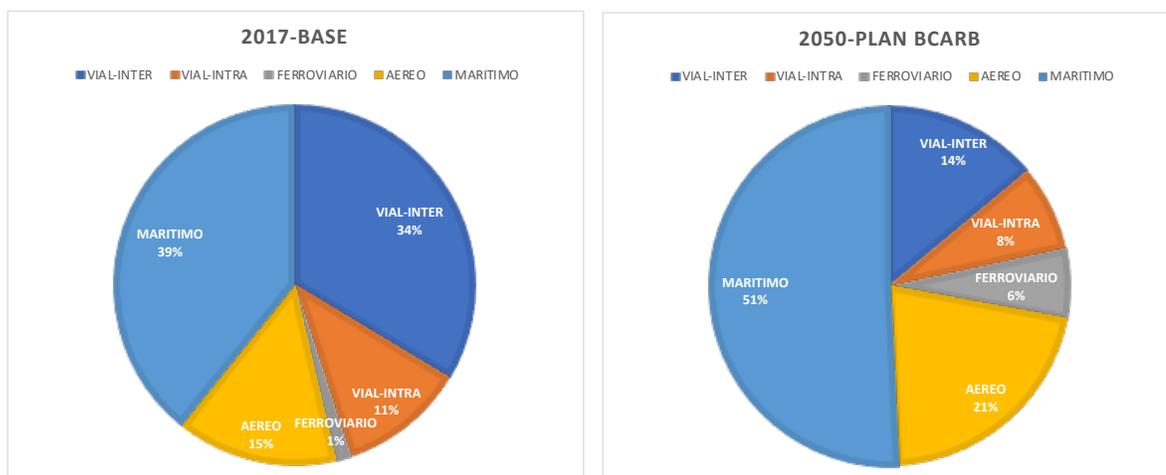


Figura 14: Proporción emisiones de NOx año 2017 y 2050, por modo de transporte

Se analiza separadamente el modo transporte vial, dividido entre interzonal e intrazonal, considerando en cada caso vehículos livianos (VL), buses (BUS), camiones de dos ejes (C2E) y camiones con más de dos ejes (CM2).

Tabla 34: Emisiones NOx transporte vial en toneladas anuales

Categoría		2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
		BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
Interzonal	VL	10,357	10,357	10,022	10,022	8,335	10,751	7,313	9,667
	BUS	1,754	1,754	1,615	1,615	537	567	447	471
	C2E	4,048	4,048	4,121	4,121	3,384	4,104	3,273	3,997
	CM2	20,251	20,251	17,336	17,336	3,430	6,064	2,523	4,607
Intrazonal	VL	5,163	5,163	5,163	5,163	3,874	5,154	3,874	5,154
	BUS	565	565	565	565	436	463	436	463
	C2E	2,543	2,543	2,543	2,543	3,268	4,082	3,268	4,082
	CM2	-	-	-	-	-	-	-	-

Considerando que las emisiones del año 2017 son muy similares para los dos escenarios considerados (BajoCarb y Cons), se considera el promedio de ambos:

Tabla 35: Emisiones NOx transporte vial en toneladas anuales

	2017-BASE-PROM	2017-PLAN-PROM	2050-BASE-BCARB	2050-BASE-CONS	2050-PLAN-BCARB	2050-PLAN-CONS
VIAL-INTER-VL	10,357	10,022	8,335	10,751	7,313	9,667
VIAL-INTER-BUS	1,754	1,615	537	567	447	471
VIAL-INTER-C2E	4,048	4,121	3,384	4,104	3,273	3,997
VIAL-INTER-CM2	20,251	17,336	3,430	6,064	2,523	4,607
VIAL-INTRA-VL	5,163	5,163	3,874	5,154	3,874	5,154
VIAL-INTRA-BUS	565	565	436	463	436	463
VIAL-INTRA-C2E	2,543	2,543	3,268	4,082	3,268	4,082
TOTAL	44,681	41,364	23,264	31,186	21,134	28,442

Gráficamente, la proporción en emisiones de NO_x para las categorías de transporte vial se indica en la figura siguiente:

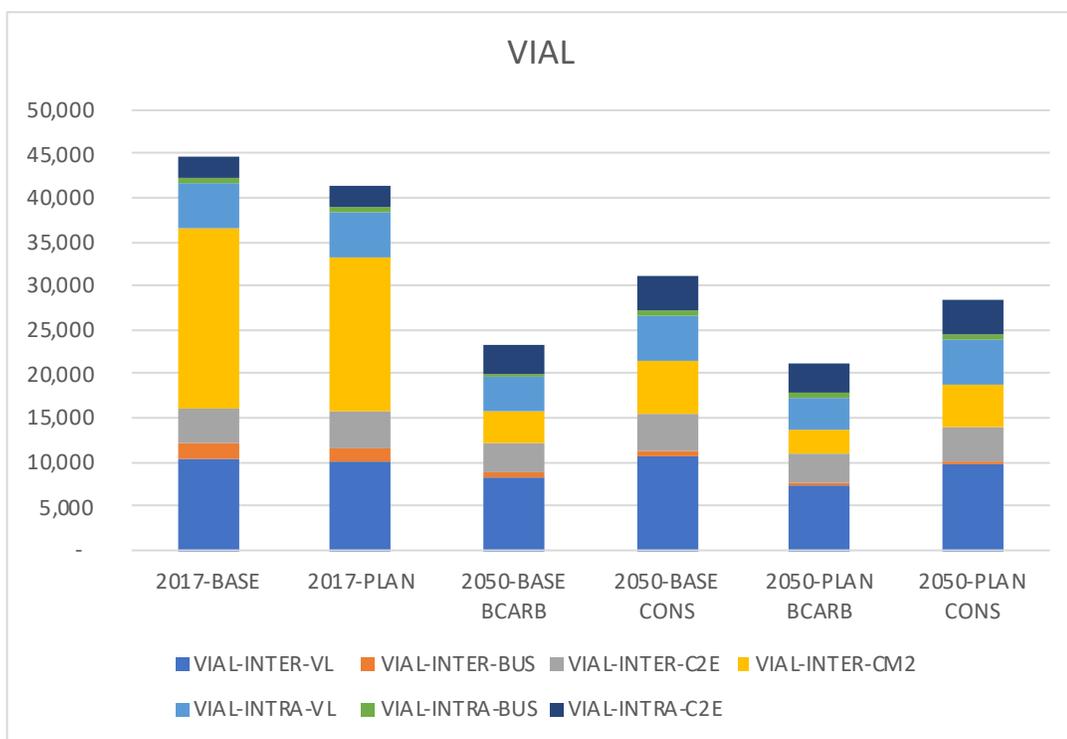


Figura 15: Proportión emisiones de NOx año 2017 modos de transporte vial

Para los modos correspondientes a transporte ferroviario, aéreo y marítimo, se reportan los resultados siguientes:

Tabla 36: Emisiones NOx transporte ferroviario en toneladas anuales

Categoría	2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
Carga	974	974	3,170	3,170	3,542	3,985	6,180	6,953
Pasajeros	43	43	224	224	-	-	-	-

Tabla 37: Emisiones NOx transporte aéreo en toneladas anuales

Categoría	2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
CCD	7,668	8,545	7,072	7,880	17,431	21,628	15,819	19,629
LTO	2,266	2,525	1,909	2,127	6,080	7,423	5,003	6,107

Tabla 38: Emisiones NOx transporte marítimo en toneladas anuales

Categoría	2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
Océano	21,379	21,379	20,557	20,557	26,036	38,496	25,152	37,189
Maniobras + Puerto	7,211	7,211	17,704	17,704	5,864	7,830	24,456	32,656

La proporción entre los modos ferroviario, aéreo y marítimo, para los distintos escenarios de NO_x, es la siguiente:

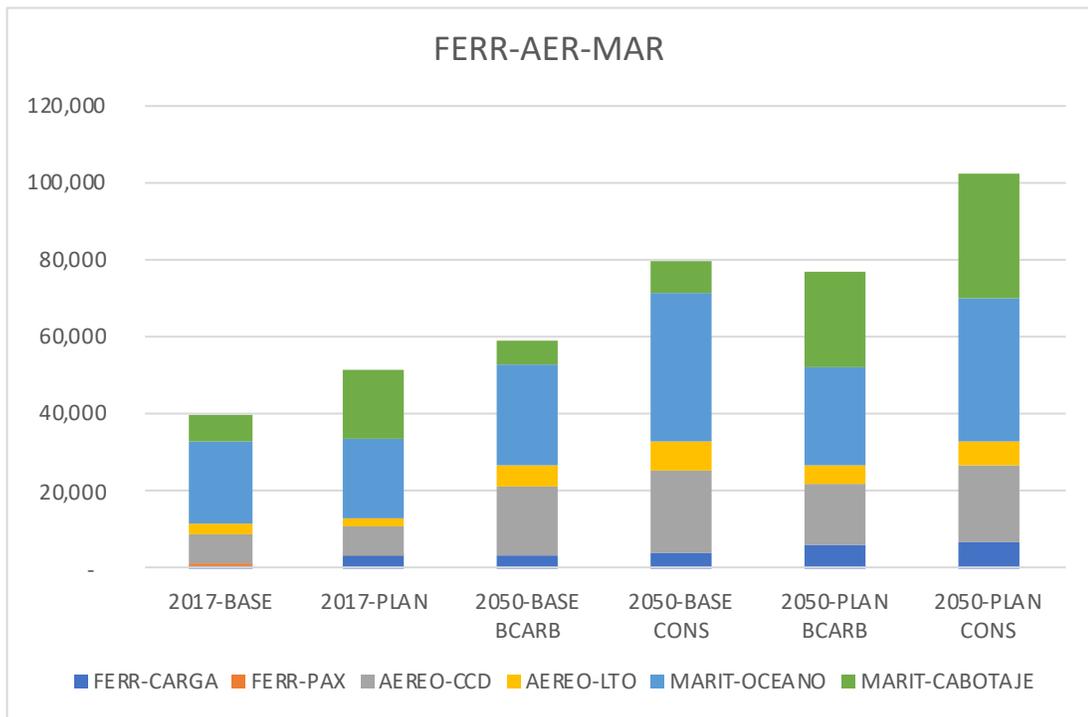


Figura 16: Proporción entre modos de transporte para NOx

4.4 Emisiones de carbono negro CN

Un resumen de las emisiones anuales de CN, para los principales modos de transporte incluidos en la modelación, se presenta en la tabla siguiente:

Tabla 39: Emisiones CN en toneladas anuales

CN	2017-BASE	2017-PLAN	2050-BASE-BCARB	2050-BASE-CONS	2050-PLAN-BCARB	2050-PLAN-CONS
VIAL-INTER	738	679	133	149	116	130
VIAL-INTRA	204	204	89	50	89	50
FERROVIARIO	16	52	54	61	94	106
AEREO	76	69	183	218	163	194
MARITIMO	322	404	364	535	515	735
TOTAL	1,356	1,407	822	1,012	977	1,216

Los resultados de la tabla anterior se presentan gráficamente en la figura siguiente:

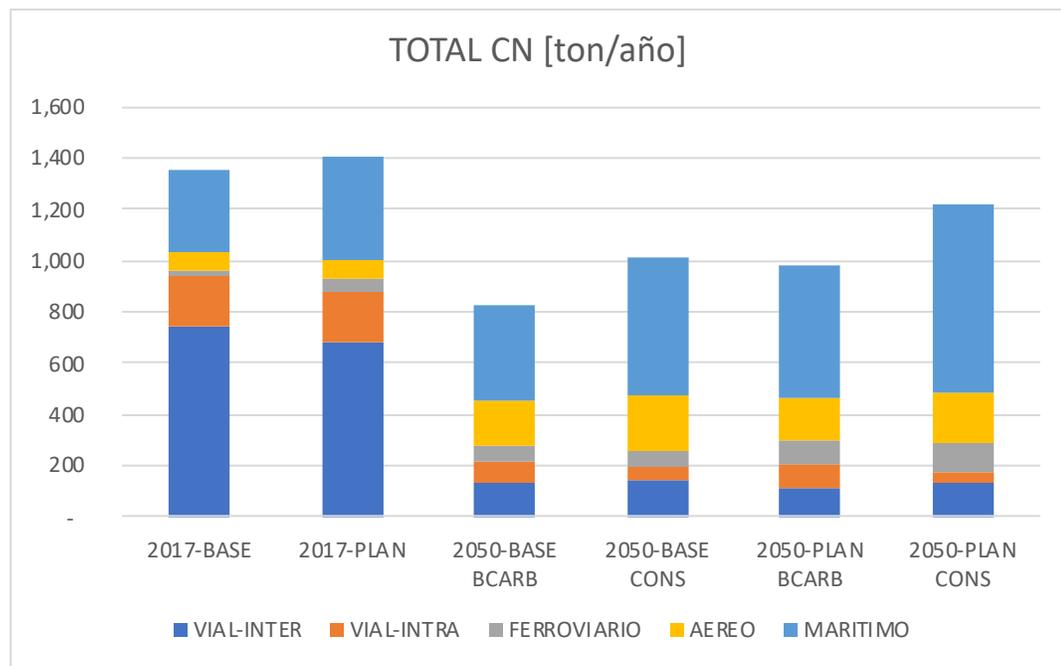


Figura 17: Emisiones totales de CN

La proporción de participación entre los distintos modos de transporte, para la situación 2017-BASE y 2050-PLAN con escenario Bajo Carbono, se indica comparativamente a continuación:

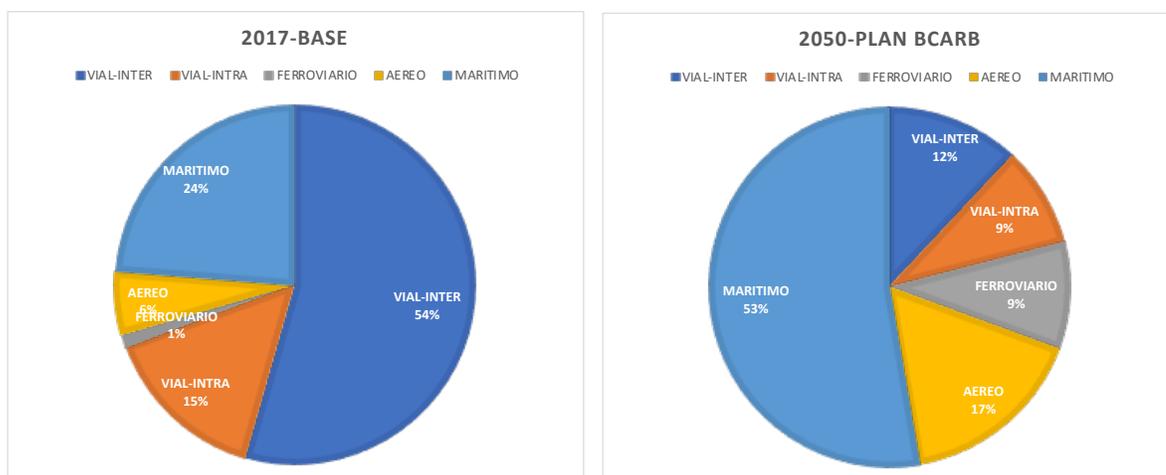


Figura 18: Proporción emisiones de CN año 2017 y 2050, por modo de transporte

Se analiza separadamente el modo transporte vial, dividido entre interzonal e intrazonal, considerando en cada caso vehículos livianos (VL), buses (BUS), camiones de dos ejes (C2E) y camiones con más de dos ejes (CM2).

Tabla 40: Emisiones CN transporte vial en toneladas anuales

Categoría		2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
		BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
Interzonal	VL	281	281	275	275	86	92	79	84
	BUS	164	164	146	146	10	12	8	9
	C2E	43	43	43	43	7	8	6	7
	CM2	251	251	215	215	29	38	24	31
Intrazonal	VL	96	96	96	96	58	30	58	30
	BUS	75	75	75	75	9	9	9	9
	C2E	33	33	33	33	21	11	21	11
	CM2	-	-	-	-	-	-	-	-

Considerando que las emisiones del año 2017 son muy similares para los dos escenarios considerados (BajoCarb y Cons), se considera el promedio de ambos:

Tabla 41: Emisiones CN transporte vial en toneladas anuales

	2017-BASE-PROM	2017-PLAN-PROM	2050-BASE-BCARB	2050-BASE-CONS	2050-PLAN-BCARB	2050-PLAN-CONS
VIAL-INTER-VL	281	275	86	92	79	84
VIAL-INTER-BUS	164	146	10	12	8	9
VIAL-INTER-C2E	43	43	7	8	6	7
VIAL-INTER-CM2	251	215	29	38	24	31
VIAL-INTRA-VL	96	96	58	30	58	30
VIAL-INTRA-BUS	75	75	9	9	9	9
VIAL-INTRA-C2E	33	33	21	11	21	11
TOTAL	942	883	222	199	205	180

Gráficamente, la proporción en emisiones de CN para las categorías de transporte vial se indica en la figura siguiente:

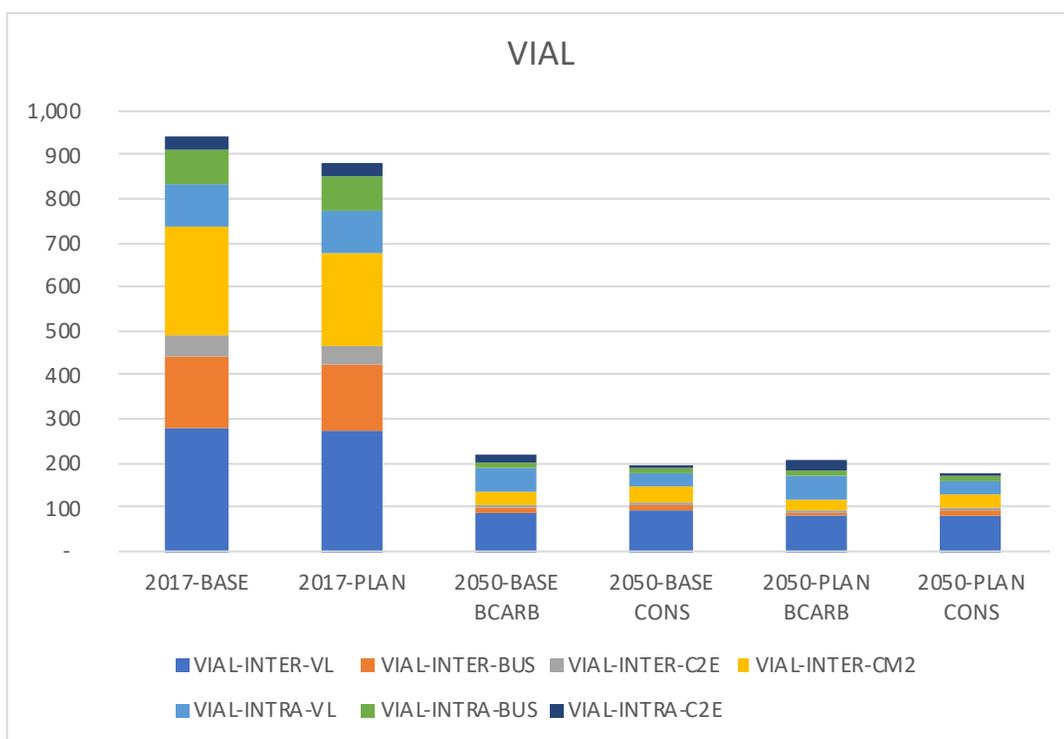


Figura 19: Proporción emisiones de CN año 2017 modos de transporte vial

Para los modos correspondientes a transporte ferroviario, aéreo y marítimo, se reportan los resultados siguientes:

Tabla 42: Emisiones CN transporte ferroviario en toneladas anuales

Categoría	2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
Carga	15	15	48	48	54	61	94	106
Pasajeros	1	1	3	3	-	-	-	-

Tabla 43: Emisiones CN transporte aéreo en toneladas anuales

Categoría	2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
CCD	60	66	55	61	150	178	136	161
LTO	13	14	11	12	33	40	27	33

Tabla 44: Emisiones CN transporte marítimo en toneladas anuales

Categoría	2017-BASE		2017-PLAN		2050-BASE		2050-PLAN	
	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons	BajoCarb	Cons
Océano	259	259	249	249	313	466	302	451
Maniobras + Puerto	63	63	154	154	51	68	213	285

La proporción entre los modos ferroviario, aéreo y marítimo, para los distintos escenarios de CN, es la siguiente:

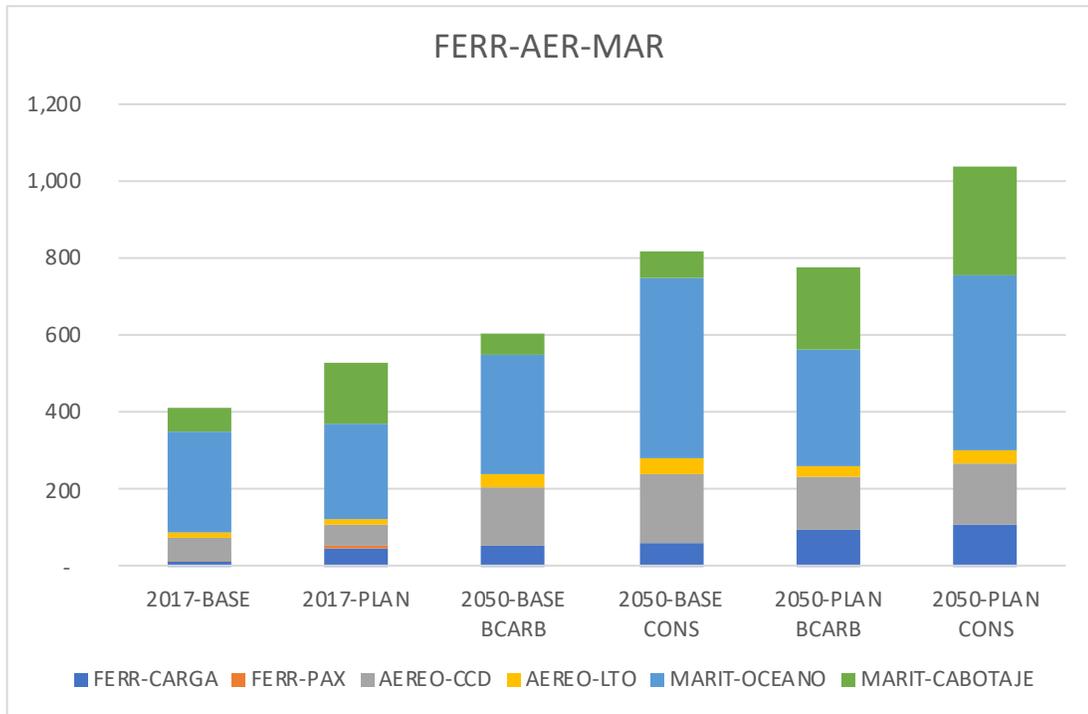


Figura 20: Proporción entre modos de transporte para CN

4.5 Análisis de resultados

Un análisis global de los resultados permite inferir que los dos escenarios considerados ofrecen reducciones importantes de compuestos contaminantes y CO₂. En todos los casos se observa una tendencia de menor crecimiento para las emisiones que el aumento en movilidad, comparando entre los años 2017 y 2050. Para facilitar el análisis, en esta sección se muestran los resultados del escenario de Bajo Carbono, dado que es el de mayor potencial.

Considerando el promedio de los factores de emisión utilizados para los distintos tipos de modos y tecnologías vehiculares, se obtienen tendencias de reducción en el período 2017-2050. Cada compuesto tiene un comportamiento diferente, como resultado de la implementación gradual de las distintas medidas consideradas. En el caso del Escenario Bajo Carbono, al año 2050, se obtienen reducciones en el factor promedio de emisión de 22% para CO₂, 69% para NO_x y 92% para MP_{2.5} y CN. La figura siguiente indica las tendencias para cada caso.

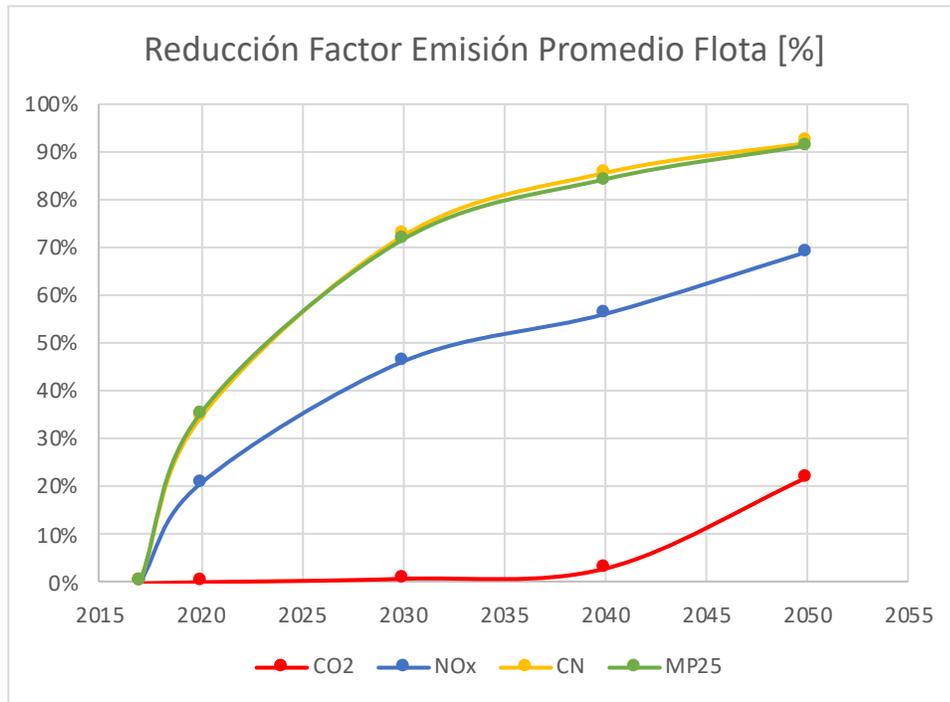


Figura 21: Tendencias en la reducción de factores de emisión promedio.

Las curvas de MP_{2.5} y CN siguen la misma tendencia, debido a su dependencia fisicoquímica, y muestran la tasa de reducción más alta, llegando a 91% y 91.9% el año 2050, respectivamente. En segundo lugar, se encuentra la curva de los factores de emisión de NO_x, donde son los vehículos terrestres de carretera los que mayoritariamente aportan a esta reducción que llega a 68.8% el año 2050. Ambos comportamientos se deben principalmente a la aplicación de la norma EURO/EPA y posteriormente a la penetración de la electromovilidad en el sector.

El factor promedio de CO₂ solo comienza a presentar cambios notorios a partir del año 2038, llegando a una reducción de 21.8% el 2050. Este comportamiento se explica fundamentalmente por el criterio de adopción de electromovilidad, que pasa a ser una tecnología realmente importante en la flota en el período 2035-2050 (incluyendo los camiones a hidrógeno). En segundo lugar, influyen las medidas de optimización operacional en los modos aéreo y marítimo, que reducen el consumo específico de combustible y por ende CO₂.

Aplicando las tendencias de los factores promedio de emisión por tecnología vehicular al plan de movilidad 2050, se obtienen las tasas de emisiones anuales totales, tomando como referencia el año 2017.

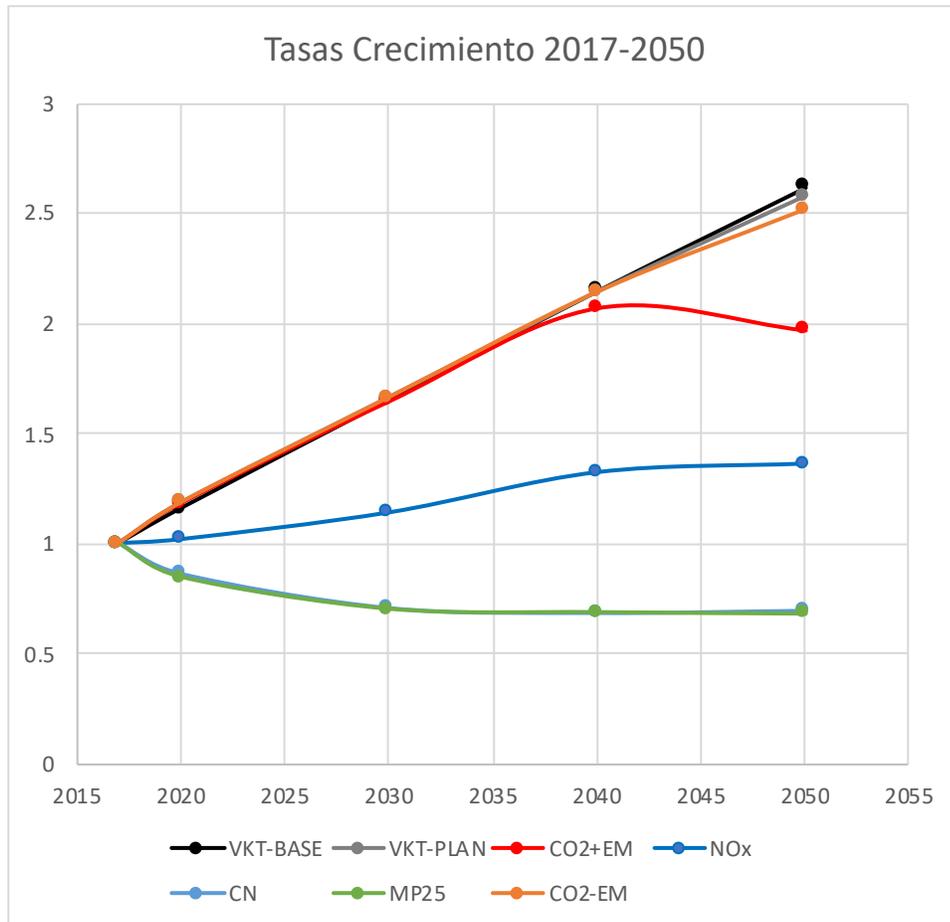


Figura 22: Tasas de crecimiento 2017-2050 de movilidad y emisiones anuales.

La figura anterior asume lineal el crecimiento en movilidad, medido como vehículos kilómetro (VKT), tanto para la Línea Base como para la situación con Plan. Las curvas de CO₂ muestran dos situaciones: CO2-EM es un caso hipotético sin electromovilidad al 2050, mientras que CO2+EM es el escenario Bajo Carbono con todas las medidas de electromovilidad incorporadas en el cálculo (vial, marítimo, ferroviario). La diferencia entre ambas curvas de CO₂ muestra el impacto aislado de la electromovilidad, que baja de 2.52 a 1.97 al año 2050.

NO_x tiene una curva que se separa desde el primer momento del comportamiento lineal de movilidad, llegando a un crecimiento de 1.36 el año 2050; mucho más bajo que el crecimiento en movilidad, que alcanza una tasa de 2.58 en el mismo período. Es decir, a pesar del crecimiento en demanda de transporte, las emisiones de NO_x se mantienen bajo control gracias a las distintas medidas normativas y tecnológicas adoptadas.

Las emisiones anuales de MP_{2.5} y CN muestran un desacoplamiento total con el aumento de demanda, manteniéndose a la baja gracias al efecto de las normas EURO/EPA con sus filtros de material particulado y la incursión de vehículos

eléctricos cero emisiones en la flota. Las emisiones calculadas tienen 31% de reducción al comparar la situación 2017 con el escenario Bajo Carbono el 2050.

La reducción general de emisiones indicada en la figura anterior es el resultado del efecto combinado de los distintos modos de transporte. El gráfico a continuación muestra la reducción porcentual de emisiones anuales y de movilidad (VKT), separadamente para cada uno de los modos de transporte considerados en este estudio.

El valor de referencia (0%) corresponde a la situación al año 2017. Los valores positivos representan un aumento de cada variable al año 2050, mientras que los negativos una reducción. Cada grupo de barras corresponde a uno de los modos de transporte (vial interzonal, vial intrazonal, ferroviario, aéreo, marítimo y finalmente el total promedio). Las columnas representan los compuestos considerados y se comparan con el aumento de movilidad correspondiente a cada modo (VKT: barra azul oscuro).

El modo que muestra un mayor aumento en la modelación de movilidad es el ferroviario, que crece 775%. No obstante, su participación en las emisiones totales de CO₂ es inferior al 1%, por lo que este importante aumento individual de demanda no tiene gran efecto en el total. Además, las emisiones de CO₂ solo crecen la mitad del aumento en demanda (334%) y los otros contaminantes llegan a 508%.

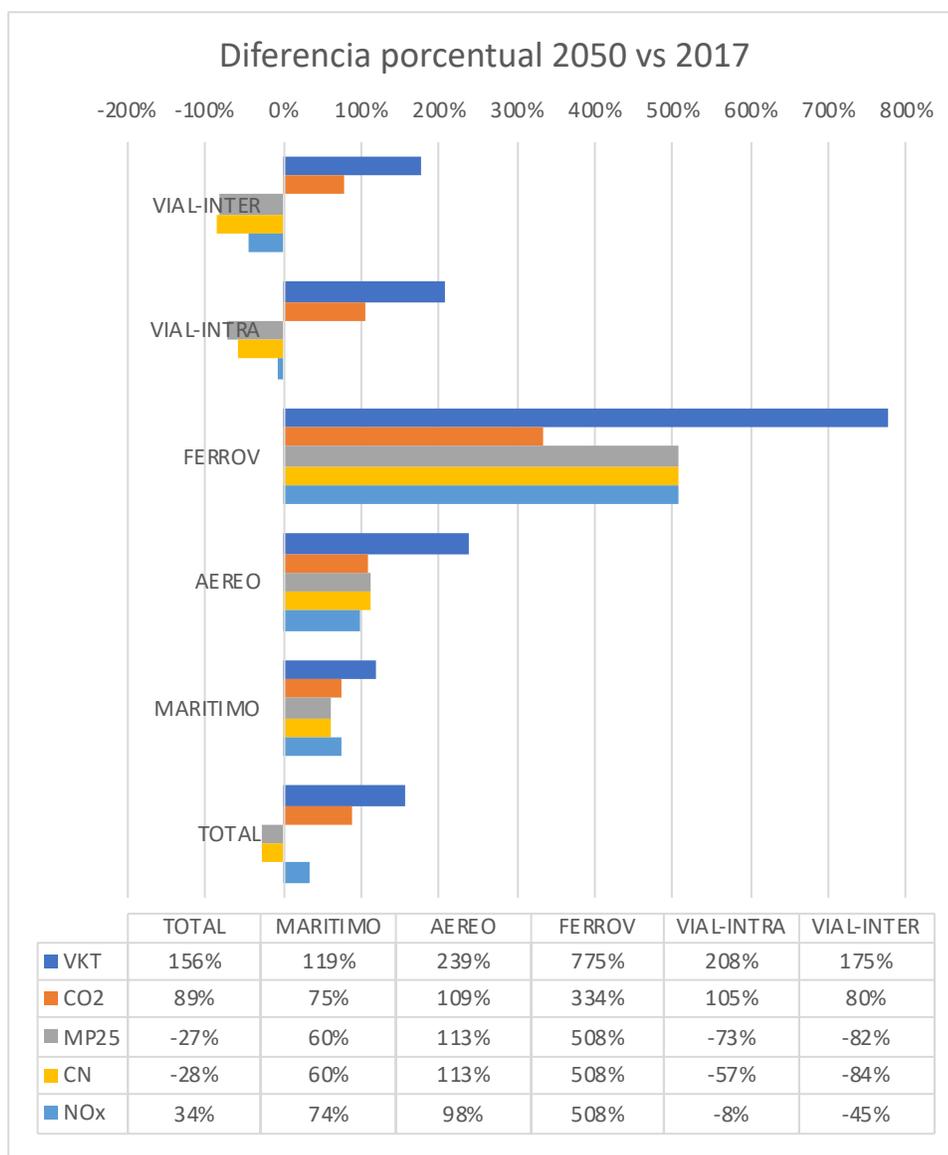


Figura 23: Diferencia porcentual entre situación Plan Bajo Carbono 2050 y caso base 2017.

Los modos aéreo y marítimo tienen comportamientos similares entre sí, en términos de emisiones. Ambos casos muestran aumento de actividad, especialmente el modo aéreo, mientras que sus emisiones ofrecen una tendencia más moderada de crecimiento. En el caso del modo aéreo las tasas de crecimiento de emisiones son prácticamente la mitad del aumento en movilidad, mientras que en caso del modo marítimo son la mitad para MP_{2.5} y CN y dos tercios para CO₂ y NO_x.

Los modos de transporte vial, tanto intrazonal como interzonal, tienen resultados similares. En ambos casos el crecimiento de CO₂ es la mitad de la demanda de movilidad. Con respecto a MP_{2.5} y CN, se observa una reducción en la

tasa de emisiones a pesar del aumento de demanda. NO_x disminuye en el caso de transporte vial interzonal y se mantiene prácticamente constante para el transporte vial intrazonal. Como la actividad del modo vial domina la actividad de todo el sector transporte, estas tendencias también se reflejan en el grupo de barras que representan el total de la flota (todos los modos integrados).

5 Conclusiones

El crecimiento de la actividad económica en Chile demandará mayor movilidad de vehículos para transporte de pasajeros y carga, estimándose un crecimiento general para la actividad del sector transporte de 162% entre los años 2017 y 2050, para la línea base de modelación (BASE). Al considerar el paquete de medidas de la modelación de transporte (PLAN), el crecimiento de actividad vehicular para transportar la misma cantidad de pasajeros y carga es optimizado, generando un crecimiento de 158%.

Este comportamiento de la actividad vehicular se traduce en un aumento de 132% y 118% para las emisiones nacionales de CO₂, comparando el año 2017 con las emisiones 2050 Conservador Base y con Plan, respectivamente. Esto indica que, aún cuando la movilidad crece bastante (158%), las emisiones no aumentan al mismo ritmo. En consecuencia, el paquete de medidas del plan contribuye a controlar las potenciales emisiones de CO₂.

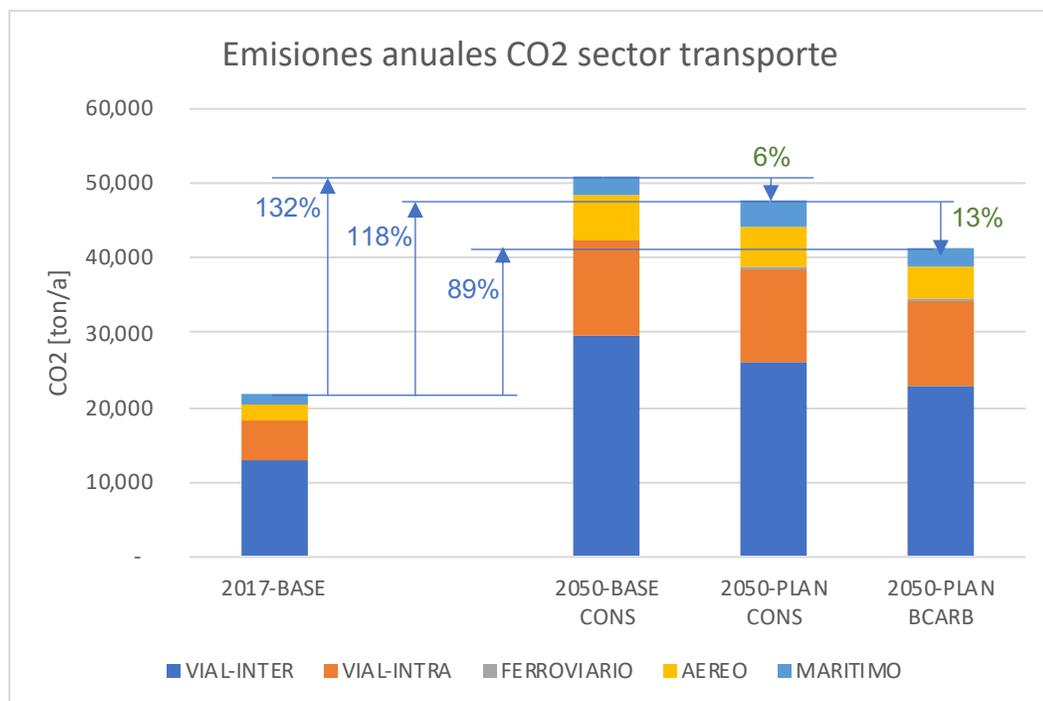


Figura 24: Emisiones anuales CO₂

Considerando la modelación del año 2050 Base Conservador como referencia, se obtiene un 6% de reducción de CO₂ al pasar a la modelación Plan Conservador.

Esto corresponde al efecto de los planes de infraestructura contenidos en el paquete de medidas. Adicionalmente, al incorporar las medidas del Escenario Bajo Carbono, se obtiene un 13% adicional de reducción en CO₂. Ambos efectos generan un resultado combinado de 19% como reducción de CO₂ el año 2050 para el sector transporte, o bien, 89% de crecimiento entre 2017 y 2050.

Los valores utilizados para construir el gráfico anterior se muestran en la tabla siguiente, en toneladas por año de CO₂.

Tabla 45: Emisiones anuales CO₂

CO ₂ [Gg/a]	2017-BASE	2050-BASE CONS	2050-PLAN CONS	2050-PLAN BCARB
VIAL-INTER	12,764	29,731	26,069	22,948
VIAL-INTRA	5,506	12,422	12,422	11,269
FERROVIARIO	50	147	283	219
AEREO	2,142	6,169	5,449	4,476
MARITIMO	1,417	2,289	3,496	2,487
TOTAL	21,879	50,759	47,719	41,399

A diferencia del CO₂, que es un contaminante global, las emisiones de material particulado fino (MP_{2.5}) tienen impacto local, en el entorno en el cual son emitidas. Por esta razón se separan de los resultados las emisiones locales de aviones y buques, ya que su principal aporte se produce en las operaciones a más de 3000 pies de altura (CCD) o en océano abierto.

Considerando las emisiones de transporte terrestre, vial y ferroviario, se observa una considerable reducción de emisiones entre los años 2017 y 2050, atribuible al paquete de medidas del Plan y a los escenarios de tecnologías con bajas emisiones. Es decir, pese a que la actividad vehicular del sector transporte terrestre prácticamente se duplica en este período, el material particulado baja en 68%, 64% y 69% para los distintos escenarios analizados. En particular, la reducción de 69% corresponde a bajar de 1,133 [ton/a] el 2017 a 201 [ton/a] el 2050 con Plan Escenario Bajo Carbono.

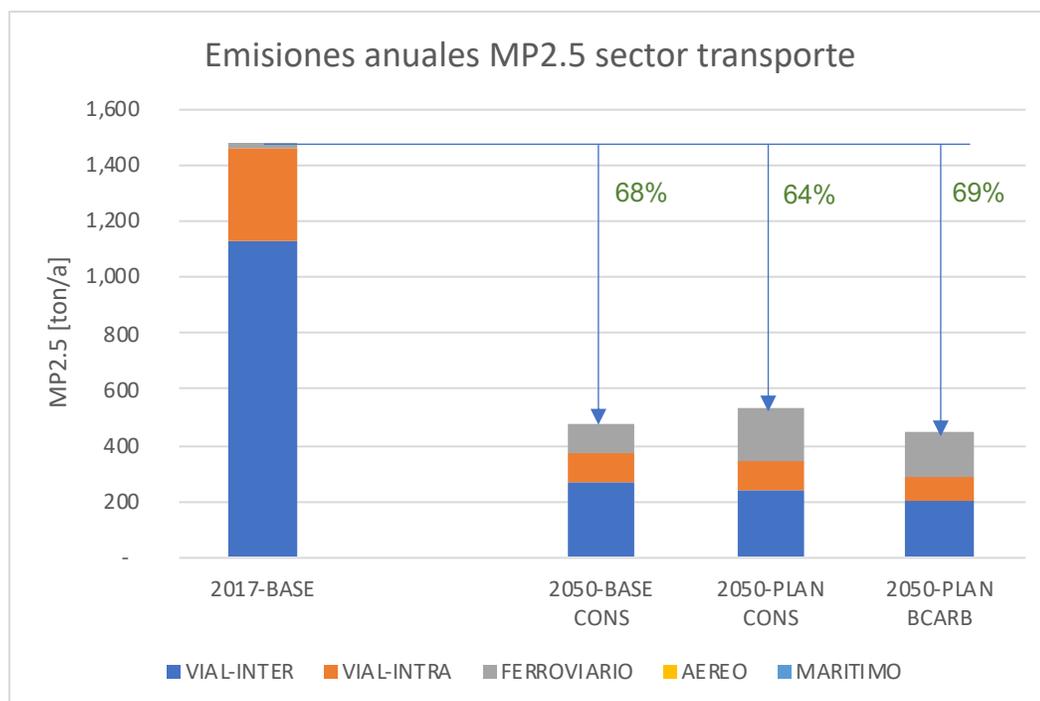


Figura 25: Emisiones anuales MP2.5

Las emisiones de carbono negro tienen la misma distribución porcentual de $MP_{2.5}$. En este caso, el año 2017 se emiten 958 [ton/a] y estas se reducen a 299 [ton/a] el 2050, correspondientes a modelación con Plan y Escenario Bajo Carbono.

En el caso de NO_x , que también es un contaminante de acción local, se observa un comportamiento intermedio a los dos casos anteriores. Las emisiones de transporte terrestre se mantienen prácticamente constantes al comparar el período 2017-2050, situación sin plan y Escenario Conservador. Sin embargo, debido a las medidas incluidas en el Escenario de Bajo Carbono se logra mejorar esta tendencia, llegando a una reducción de 23% en el período. Esto significa bajar de 35,171 [ton/a] el 2017 a 27,314 [ton/a] el 2050.

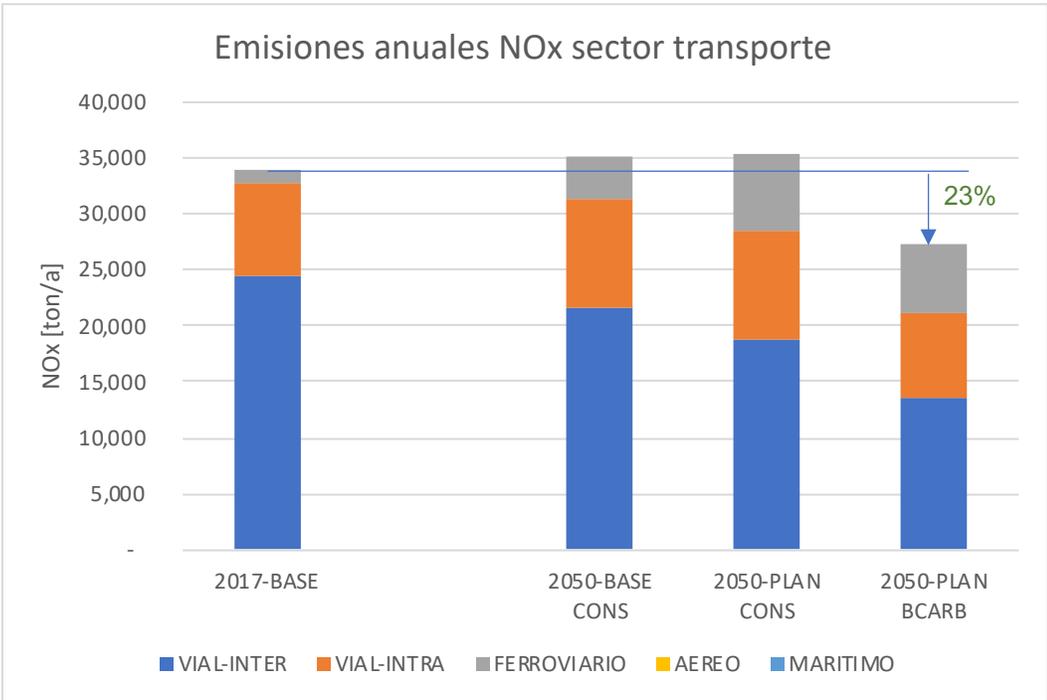


Figura 26: Emisiones anuales NOx

6 Bibliografía

1. **Ministerio de Obras Públicas** (2020) Plan Nacional de Infraestructura para la Movilidad 2020-2050. Santiago de Chile. (Documento en elaboración).
2. **Senado de Chile**. *Proyecto de ley que fija Ley Marco de Cambio Climático*. Boletín 13191-12. Disponible en línea: https://www.senado.cl/appsenado/templates/tramitacion/index.php?boletin_ini=13191-12
3. **Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones**. *DTO-211 11-DIC-1991*, Ley Chile, Biblioteca del Congreso Nacional, 11-dic-1991. Disponible en línea: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=11031&idParte=&idVersion=>
4. **Ministerio del Medio Ambiente**. *RES-114 EXENTA 21-MAR-2019*, Ley Chile, Biblioteca del Congreso Nacional, 21-mar-2019. Disponible en línea: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1129868&buscar=euro+6>
5. **Ministerio del Medio Ambiente**. *DTO-31 24-NOV-2017*, Ley Chile, Biblioteca del Congreso Nacional, 24-nov-2017. Disponible en línea: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1111283>
6. **Ministerio del Medio Ambiente**. *Aprueba anteproyecto de revisión de las normas de emisión aplicables a vehículos motorizados livianos*. Núm. 114 exenta. Santiago, 13 de febrero de 2019. Disponible en Biblioteca del Congreso Nacional de Chile en línea: <http://bcn.cl/29195>
7. **Ministerio de Energía**. *Ruta Energética 2018-2022*. Chile. Disponible en línea: <https://www.energia.gob.cl/rutaenergetica2018-2022.pdf>
8. **Ministerio de Energía, Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, Ministerio del Medio Ambiente**. *Estrategia Nacional de Electromovilidad*. Chile. Chile. Disponible en línea: https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia_electromovilidad-8dic-web.pdf
9. **BNEF**. *Electric Vehicle Outlook 2019*. Disponible en línea: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>
10. **Gobierno de Chile**. *“Contribución Determinada a nivel Nacional (NDC) de Chile. Actualización 2020”*. Disponible en línea: https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/NDC_Chile_2020_espan%CC%83ol-1.pdf
11. **OMI**. *OMI 2020: el límite de azufre en el combustible entra en vigor el 1 de enero*. Briefing sala de prensa 34-20/12/2019. Disponible en línea: <http://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/Paginas/34-IMO-2020-sulphur-limit.aspx>
12. **Wunderlich, C**. *Análisis de la contaminación atmosférica provocada por barcos en base a las exigencias del Anexo VI del MARPOL 73/78*. Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile, 2005.
13. **Sin, Mihaela**. *Análisis de la implementación de combustibles con bajo contenido en azufre en el tráfico marítimo en el Mar del Norte*. Barcelona, España, 2012. Disponible en línea: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/19594/TFC_MihaelaSin_DMN.pdf
14. **Fariás, L., Ubilla K., C. Aguirre, L. Bedriñana, R. Cienfuegos, V. Delgado, C. Fernández, M. Fernández, A. Gaxiola, H. González, R. Hucke-Gaete, P. Marquet, Vivian Montecino, C. Morales, D. Narváez, M. Osses, B. Peceño, E. Quiroga, L. Ramajo, H. Sepúlveda, D. Soto, E. Vargas, F. Viddi, J. Valencia**. *Nueve medidas basadas en el océano para las Contribuciones Determinadas a nivel Nacional de Chile*. Comité científico COP25, mesa Océanos, 93 páginas, 2019. Medida 5, Reducir paulatinamente las emisiones de gases provenientes del transporte marítimo chileno, pp. 39-42. Disponible en línea: <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2019/12/Nueve-soluciones-para-NDC.pdf>
15. **SEAONET**. *El itinerario de Maersk ante los múltiples desafíos de la industria marítima*. Diciembre 6, 2019. Disponible en línea: <https://seaonet.com/el-itinerario-de-maersk-ante-los-multiples-desafios-de-la-industria-maritima/>

16. **Nautica Digital.** *La flota a nivel mundial de barcos propulsados por GNL alcanza las 200 unidades.* Marzo 2020. Disponible en línea: <http://www.nauticadigital.com/marina/la-flota-a-nivel-mundial-de-barcos-propulsados-por-gnl-alcanza-las-200-unidades/>
17. **UNCTAD.** *Review of Maritime Transport (Series).* United Nations, Trade and Development. Disponible en línea: [https://unctad.org/en/Pages/Publications/Review-of-Maritime-Transport-\(Series\).aspx](https://unctad.org/en/Pages/Publications/Review-of-Maritime-Transport-(Series).aspx)
18. **DIRECTEMAR.** *Análisis Estadísticas Portuarias.* Armada de Chile. Disponible en línea: https://www.directemar.cl/directemar/site/tax/port/fid_adjunto/taxport_38_206__1.html
19. **ICAO.** *Environmental protection.* Disponible en línea: <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/default.aspx>
20. **ICAO.** *Sustainable aviation fuels.* ICAO-UNDP-GEF assistance project Transforming the Global Aviation Sector: Emissions Reductions from International Aviation. Disponible en línea: <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/SAF.aspx>
21. **CORSIA.** *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation.* Disponible en línea: <https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Pages/default.aspx>
22. **AIRBUS.** Our commitment to environmental protection. Disponible en línea: <https://www.airbus.com/company/sustainability/environment.html>
23. **IATA.** *Air Passenger Market Analysis.* December 2019. Disponible en línea: <https://www.iata.org/en/iata-repository/publications/economic-reports/air-passenger-monthly---dec-2019/>
24. **JAC.** *Anuario del transporte aéreo 2018.* Junta de Aeronáutica Civil, Chile. Disponible en línea: <http://www.jac.gob.cl/el-anuario-de-transporte-aereo/>
25. **International Energy Agency.** *The Future of Rail 2050.* France, IEA, 2019. Disponible en línea: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail>
26. **Biobio Chile.** *Chile sobre rieles: Gobierno presenta plan que incorpora nuevos servicios ferroviarios.* Disponible en línea: <https://www.biobiochile.cl/noticias/nacional/chile/2019/09/03/chile-sobre-rieles-gobierno-presenta-plan-que-incorpora-nuevos-servicios-ferroviarios.shtml>
27. **EFE.** *Sistemas de propulsión trenes de pasajeros y de carga en Chile.* Documento interno de trabajo.
28. **IPCC.** *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.* Chapter 3 Mobile combustion, Volume 2 Energy.
29. **EEA.** *Methodology for the calculation of exhaust emissions.* EMISIA Copert Documentation, SNAPs 070100-070500, NFRs 1A3bi-iv, European Environment Agency, 2018. Disponible en línea: <https://www.emisia.com/utilities/copert/documentation/>
30. **European Environment Agency.** *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 (1.A.3.a Aviation 2016).* Luxembourg: European Environment Agency, 2016.
31. **Entec UK.** *Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community.* 2002.
32. **SMED.** *UK Ship Emissions Inventory, Final Report.* 2010.
33. **EIB.** *Project Carbon Footprint.* Luxembourg: European Investment Bank, 2018.