

ASESORÍA TÉCNICA

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

INFORME FASE 1

IDENTIFICACIÓN DEL DOCUMENTO : Primer Informe (FASE 1)
FECHA : 25 octubre 2019
ELABORADO POR : Mauricio Osses A.
CONTRAPARTE TÉCNICA : MOP - DIRPLAN
FINANCIADO POR : Banco Interamericano de Desarrollo

EQUIPO DE TRABAJO

Universidad Técnica Federico Santa María:

Mauricio Osses

Benjamin Gomez

Matias Concha

Adolfo Gaete

En coordinación con el equipo del Ministerio de Obras Públicas:

Dirección de Planeamiento: Vianel Gonzalez, Felipe Livert, Mauricio Carrasco, Mónica Baeza.

Dirección General de Concesiones: Patricia Henríquez

Dirección de Aeropuertos: Rodrigo Aranda

Dirección de Obras Portuarias: Ariel Grandón

Dirección de Vialidad: Christian Vigouroux

Asesores externos: Marcial Echenique y Gonzalo Vejar

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES	6
2.1	Transporte Terrestre.....	6
2.2	Transporte Aéreo	9
2.3	Transporte Marítimo.....	16
2.4	Ferrocarriles	19
2.5	Metodologías seleccionadas para la estimación de emisiones.....	28
3	ESCENARIOS TECNOLÓGICO /NORMATIVOS.....	29
3.1	Transporte Terrestre.....	30
3.2	Transporte Marítimo.....	33
3.3	Transporte Aéreo	34
3.4	Escenarios propuestos	35
4	BIBLIOGRAFÍA.....	39

1 Introducción

El presente Informe corresponde al estudio “**Consultoría para la cuantificación de emisiones del Plan Nacional de Infraestructura para la Movilidad 2020-2050**”. 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).

Este estudio ha sido financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), con los siguientes objetivos:

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, PM₁₀, 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 primer Informe de Avance corresponde a la primera fase del estudio, FASE 1, que comprende una revisión de la literatura e identificación de los escenarios tecnológicos/regulatorios más probables. Los escenarios deberán ser consensuados con el equipo MOP responsable.

La configuración de los escenarios debe sustentarse, por un lado, en hipótesis de materialización de aquellas tecnologías de soporte a la movilidad (vehículos, infraestructura y gestión) y, por otro lado, en modelos de negocio y operación de los diferentes medios de transporte (terrestre, marítimo y aéreo). Finalmente, el

alcance de este análisis se remite a aquellos aspectos que inciden en las variables de sostenibilidad.

Los compuestos a considerar en la cuantificación de emisiones incluyen contaminantes criterio de impacto local (NO_x, MP_{2.5}, COV y CO) así como precursores de cambio climático (CO₂ y carbono negro), en base a factores de emisión internacionales adaptados a la flota local existente y proyectada para Chile.

En esta etapa se debe respaldar la conformación de los escenarios acordados con información pertinente y respectivas citas bibliográficas utilizadas.

El capítulo 2 de este primer Informe de Avance corresponde a la metodología propuesta para determinar emisiones a nivel nacional, de acuerdo con proyecciones de actividad de transporte al año 2050. El capítulo presenta secciones separadas para los modos terrestre, aéreo, marítimo y ferroviario.

El capítulo 3 presenta una primera propuesta de los escenarios tecnológicos y/o regulatorios más probables para cada caso, con la bibliografía empleada para esta identificación.

2 Metodologías de estimación de Emisiones

2.1 Transporte Terrestre

Las emisiones asociadas al modo transporte terrestre en ruta incluyen todos los vehículos con motor de combustión interna que se desplazan por caminos o carreteras públicas. Las emisiones consideradas corresponden a contaminantes criterio y gases efecto invernadero generados en el proceso de combustión de fuentes móviles, específicamente: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos (HC), material particulado fino (MP2.5), carbono negro (BC), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄).

Los datos de entrada requeridos para el desarrollo de esta metodología son:

- **Arcos:** tramo o sección de carretera completa delimitada por dos puntos (nodos).
- **Flujos de vehículo:** se debe especificar la cantidad de vehículos que transitan por determinado arco en un periodo, considerando, a que vehículo corresponde cada uno de estos flujos, ya que para obtener los factores de emisión se necesitara conocer esta clasificación.
- **Distancia total del arco**
- **Velocidad media de los vehículos en el arco**

Considerando la disponibilidad de la información requerida, se define la ecuación para la estimación de emisiones como:

$$E_i = FE_i \cdot FD_i \cdot D \cdot N$$

Donde:

i: Tipo de contaminante

E_i: Emisión por tipo de contaminante *i*.

FE_i: Factor de Emisión, para cada contaminante *i*.

FD_i: Factor de Desgaste, para cada contaminante *i*.

D: Distancia recorrida por el vehículo.

N: Cantidad de vehículos correspondientes a una categoría específica.

Los factores de emisión *FE_i* para vehículos terrestres en ruta se basan en valores experimentales reportados por el modelo europeo para la estimación de contaminantes COPERT 4. Este modelo ofrece información para cada tipo de

contaminante emitido por el motor de un vehículo, considerando sus características tecnológicas, lo que permita adaptarlo a distintas localidades. COPERT 4 utiliza una serie de polinomios de alto orden que dependen de la velocidad media y las características del vehículo. Para poder utilizar estos polinomios se debe conocer la naturaleza del combustible (Diesel, Gasolina) y el tipo de vehículo (Car, LGV, HGV, Bus, Coach, Moped, Motorcycle), además de su subdivisión (según tonelaje o su articulación según corresponda).

La cantidad de vehículos N se obtiene del flujo total de vehículos, considerando su clasificación a partir de los siguientes términos:

- Tipo de vehículo,
- Tipo de combustible,
- Tipo de tecnología (catalítico, euro 1, 2, 3, 4, 5 o 6)

Estimado a partir de la siguiente ecuación:

$$N = f \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

Donde:

f : Flujo de vehiculos.

X_1 : Porcentaje de vehículos que utilizan ese combustible en su subdivisión vehicular.

X_2 : Porcentaje del tipo de tecnología para esa subdivisión vehicular.

X_3 : Porcentaje del tipo de vehículo respecto al total.

Se debe asignar una clasificación a los vehículos medidos considerando:

- Tipo de vehículo,
- Tipo de combustible,
- Tipo de tecnología (catalítico, euro 1, 2, 3, 4, 5 o 6)

En la figura 1 se visualiza una segregación estándar con sus subcategorías para cada grupo de clasificación.

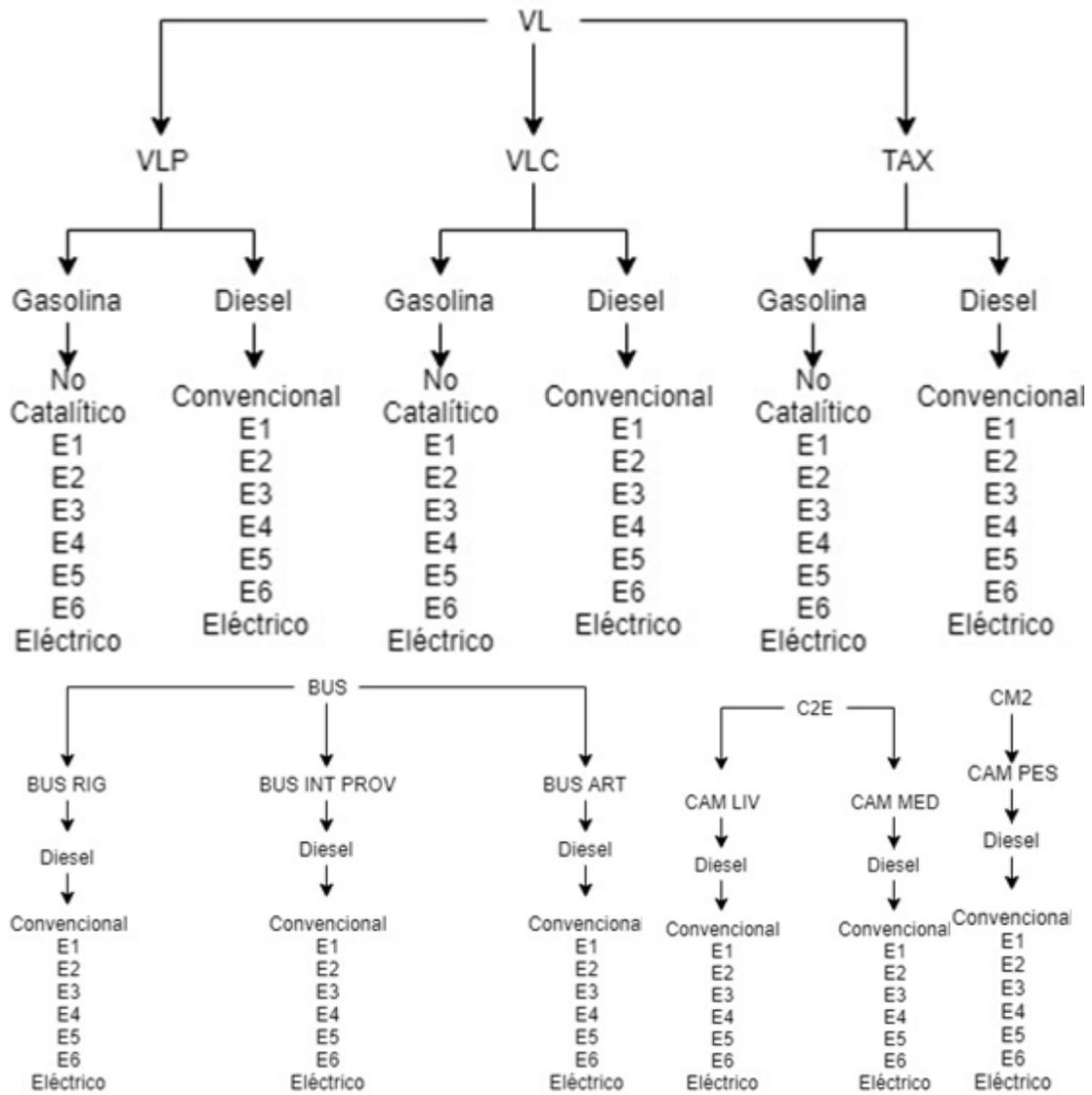


Figura 1: Segregación estándar con subcategorías para cada grupo de vehículos de transporte terrestre. Fuente: Elaboración propia.

Estas categorías se establecen según las características de cada uno de los vehículos, basados en los decretos:

- **DTO-55 16-ABR-1994** – “NORMAS DE EMISION APLICABLES A VEHICULOS MOTORIZADOS PESADOS”
- **DTO-211 11-DIC-1991** – “NORMAS SOBRE EMISIONES DE VEHICULOS MOTORIZADOS LIVIANOS”

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 privado.

Así es como para cada tipo de vehículo, combustible y tecnología presente en el territorio de análisis, existe un factor de emisión el cual se extrae de la norma COPERT 4. Luego, para obtener las emisiones totales, se requiere conocer la composición porcentual de estos flujos, que se dividen de manera proporcional a nivel nacional según región, la que se mantiene de manera consistente a través de los años.

2.2 Transporte Aéreo

Para la estimación de emisiones contaminantes producidas por el transporte aéreo en Chile, se considerarán las metodologías elaboradas por la *European Environment Agency* (EEA) y el *Airport Cooperative Research Program* (ACRP).

2.2.1 Metodología EEA

Esta metodología proviene de un reporte técnico publicado por la agencia europea en el año 2016, para el desarrollo de inventarios de emisiones a nivel nacional. Este reporte es una guía que recopila la información de inventarios de emisiones realizados por diferentes autores para las principales fuentes de contaminación, en la que se incluye la metodología para estimar las emisiones que tienen como fuente las operaciones de aeronaves durante los ciclos de aterrizaje y despegue (LTO), y de traslado entre su origen y destino en modo crucero (CCD)

La metodología que se propone en este reporte permite calcular los contaminantes atmosféricos generados por el transporte aéreo en un país, clasificando tres niveles de estimación dependientes de la información disponible.

- **Tier 1:** Para este nivel de cálculo es necesaria la información de la venta de combustibles para aviación divididos en uso doméstico e internacional, donde se asume que la venta total de combustible es igual al uso total de este. Además de saber el total de ciclos LTO también divididos en doméstico e internacional. El cálculo consiste en utilizar una flota genérica de aviones para así tener un Factor de Emisión genérico promedio para los ciclos LTO y CCD.
- **Tier 2:** Para este segundo nivel además de la información de venta de combustible de aviación divididos en doméstico e internacional se agrega la división específica de consumo de combustible por cada aeronave. Para el cálculo se utilizan factores de emisión específicos para cada aeronave para ciclos LTO y factores de emisión genéricos para los ciclos CCD.
- **Tier 3:** Este nivel de cálculo se encuentra subdividido en dos variantes: Tier 3.a y Tier 3.b. Para este nivel es requerida la información de cada vuelo que contenga el modelo de la aeronave y la distancia total recorrida, divididos en doméstico e internacional. Para el caso del nivel Tier 3.a se utiliza información específica por cada **aeronave**, en cambio para el nivel Tier 3.b es necesario tener la información de la trayectoria completa del **vuelo** además de un software computacional que pueda ser capaz de procesar esta información.

Para definir la metodología a utilizar en el cálculo de las emisiones del transporte aéreo, se debe tener en cuenta la base de datos disponible para la aplicación de uno de los niveles de cálculo mencionados anteriormente, considerando el siguiente árbol de decisión:

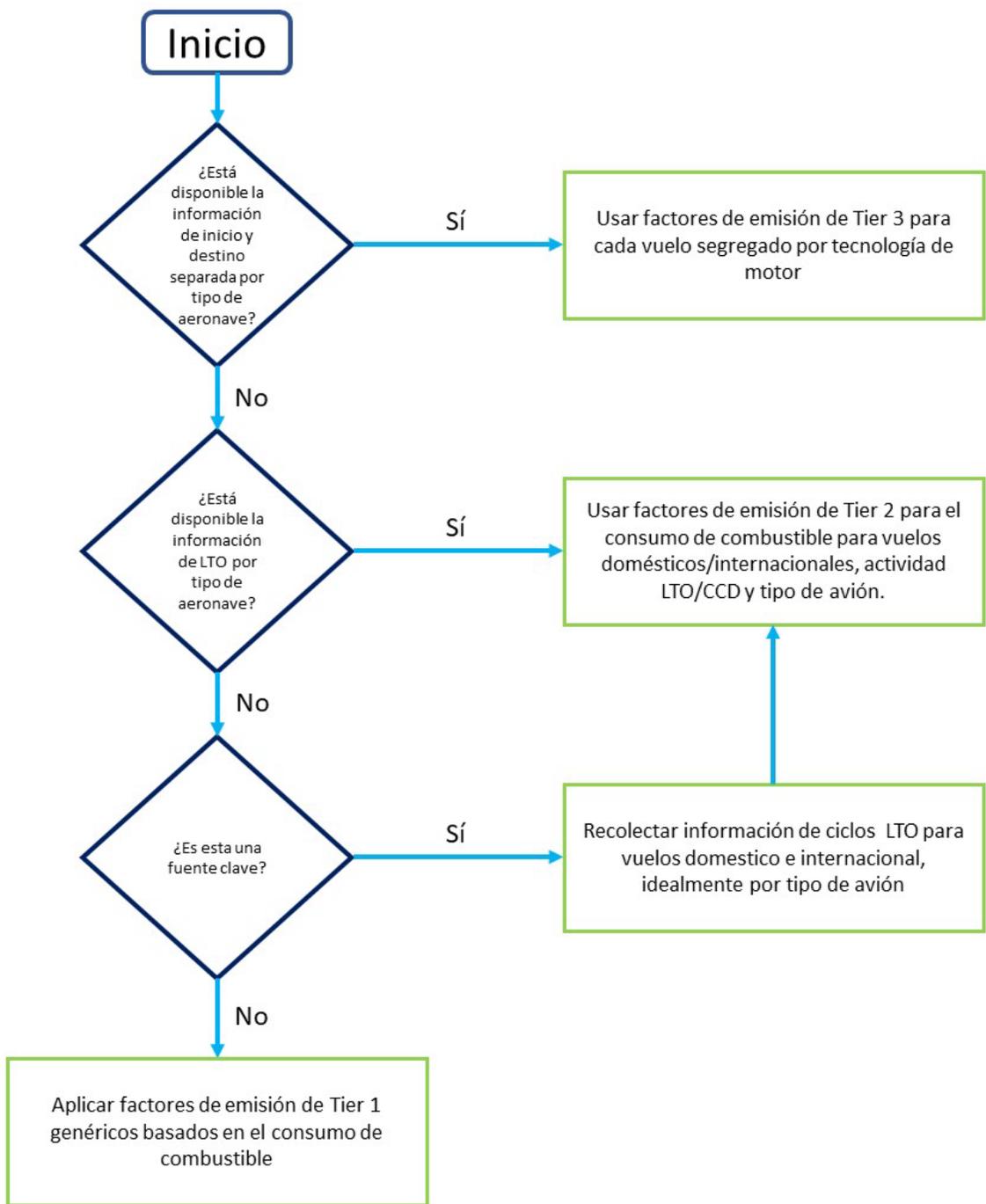


Figura 2: Diagrama de decisiones para calcular las emisiones contaminantes generadas por los vuelos para un año. Fuente: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2016.

A continuación, se describe en detalle el procedimiento de aplicación de cada uno de los niveles mencionados anteriormente.

2.2.1.1 Tier 1

El cálculo con Tier 1 se basa principalmente en los datos de consumo total de combustible del sector aeronáutico, diferenciado en vuelos domésticos e internacionales. Con el cálculo de las emisiones de contaminantes a partir de la siguiente ecuación:

$$E_i = \sum_m TA_m \cdot FE_i$$

Donde:

E_i = Emisión total anual del contaminante i para cada una de las fases LTO y CCD en vuelos domésticos e internacionales.

TA_m = Tase de actividad por consumo de combustible m para cada una de las fase y tipos de vuelo.

FE_i = Factor de emisión del contaminante i para el correspondiente tipo de vuelo y fase de vuelo.

Esta metodología requiere la definición de factores de emisiones genéricos, donde se considera que todos los aviones poseen la misma tecnología de combustión. Aunque la EEA dispone información para cada modelo de avión disponible, se debe elegir un modelo representativo con el cual se seleccionaran los factores de emisión para realizar la estimación de contaminantes generados.

Donde el consumo de combustible correspondiente a cada uno de los ciclos de operación (CCD o LTO) se determina de las siguientes relaciones:

$$\text{Combustible Total Consumido} = \text{Combustible LTO} + \text{Combustible CCD}$$

$$\text{Combustible LTO} = \text{Numero de LTO} * \text{Consumo de Combustible LTO}$$

$$\text{Combustible CCD} = \text{Combustible Total Consumido} - \text{Combustible LTO}$$

En resumen, para obtener la estimación de contaminantes generados mediante la metodología de Tier 1, se debe obtener la información del total de combustible consumido por el sector aéreo para un año determinado, discriminando entre el consumo de combustible utilizado en la aviación doméstica e internación, se debe asociar este consumo a cada uno de los ciclos de operación del transporte, para finalmente, calcular las emisiones generadas dependientes del total de combustible consumido por cada ciclo, con el factor de emisiones del tipo de avión que se considere representativo de la flota del país.

2.2.1.2 Tier 2

La estimación de contaminantes generados mediante la metodología de Tier 2 requiere conocer los ciclos de aterrizaje y despegue para cada tipo específico de aeronave, considerando el mismo procedimiento que lo mencionado en la metodología Tier 1, esta se diferencia en que ya no se considera un factor de emisiones representativo, sino que se dispone de los datos de operación detallados por cada tipo de avión de la flota nacional.

Las emisiones de contaminantes se obtienen a partir de la siguiente ecuación:

$$E_i = \sum_m \sum_j TA_{m,j} \cdot FE_{i,j}$$

Donde:

E_i = Emisión total anual del contaminante i para cada una de las fases LTO y CCD para vuelos domésticos e internacionales.

$TA_{m,j}$ = Tasa de actividad por consumo de combustible m para cada una de las fase y tipos de vuelo, considerando un modelo específico de avión j para cada ciclo LTO

$FE_{i,j}$ = Factor de emisión del contaminante i para el correspondiente tipo de vuelo y fase de vuelo, considerando un modelo específico de avión j para cada ciclo LTO.

Así, el aporte de emisiones generadas por los ciclos domésticos e internacionales dependen directamente del combustible consumido, pero diferenciando los factores de emisión para cada modelo específico de avión, que luego se deben sumar para obtener el total de contaminantes generados en el año seleccionado.

2.2.1.3 Tier 3

La metodología Tier 3 requiere para su desarrollo de información detallada respecto a los movimientos de cada vuelo, y se subdivide en dos métodos que se diferencian por los datos necesarios para su aplicación.

- La metodología **Tier 3.a** calcula los contaminantes considerando la distancia recorrida en los ciclos CCD para cada vuelo, obtenidos de la información del origen y destino tabulados en las bases de datos, tanto para uso doméstico como internacional.
- La metodología **Tier 3.b** utiliza como información de entrada las trayectorias, modelos específicos de motores y las diferentes alturas que se tienen en el vuelo, esto es procesado por softwares que calculan el consumo de combustible en base a esta información y consideran el rendimiento aerodinámico de cada avión.

Los pasos a seguir para utilizar la metodología Tier 3 se centran en recolectar la base de datos con los movimientos aéreos para el año correspondiente, con cada uno de los vuelos asociados a un modelo de avión específico, además de la información de origen/destino del vuelo y/o la distancia recorrida. Así, con el total de combustible consumido (o calculada por software) en cada vuelo se obtienen las emisiones generadas.

2.2.2 Metodología ACRP

El *Airport Cooperative Research Program* (ACRP) es otra organización que ha elaborado un procedimiento para realizar inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero en los aeropuertos, el cual se basa en la misma información utilizada por la European Environment Agency (EEA). Ambas metodologías son muy parecidas en los tres niveles (Tier) de cálculo definidos anteriormente, con la salvedad en el cálculo de emisiones referentes a aeronaves con motores tipo pistón, donde la EEA utiliza factores de emisión referenciales que no representan en detalle las distintas variantes presentes en esta categoría. Por esto, para el grupo de aeronaves con motores de pistón, se considera la metodología ACRP que incluyen un trabajo específico sobre los contaminantes generados por este tipo de tecnología, con pruebas donde se obtienen los factores de emisiones específicos por cada una de las fases de vuelo en conjunto con los flujos de combustible consumido.

Con esta nueva información es posible calcular con mayor detalle las emisiones provenientes de los aviones con motores tipo pistón, lo que complementa de mejor manera las emisiones totales generadas por el transporte aéreo en Chile.

El proceso de cálculo consiste en recolectar la base de datos de los movimientos aéreos para el año correspondiente con entidades que poseen este tipo de información. La información requerida corresponde a los detalles de cada uno de los vuelos asociados a un modelo de avión, en conjunto con los detalles de origen/destino del vuelo y/o la distancia recorrida. Con esta información y el modelo de motor de la aeronave, se identifica el flujo de combustible para así estimar las emisiones totales emitidas.

En comparativa, la metodología EEA indica como referencia emisiones generadas en vuelos reales para determinado modelo de avión, con muestras que se extraen de diferente distancia recorridas.

Tabla 4: Resumen de los factores de emisiones de la metodología EEA. Fuente: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2016.

Modelo	Distancia [NM]	Combustible usado [kg]	CO ₂ [kg]	NO _x [kg]	CO [kg]	HC [kg]
A320	123	919	2895	17.28	2.98	0.61
A320	198	1342	4229	25.49	4.46	0.91
A320	248	1635	5150	29.94	4.98	1.03
A320	498	2934	9243	47.40	7.34	1.54
A320	747	4113	12955	61.96	9.76	2.07
A320	997	5261	16571	76.51	12.31	2.63
A320	1498	7756	24430	108.63	16.69	3.61

Por otro lado, la metodología ACRP utiliza factores de emisiones específicos para cada modelo de motor, los cuales están asociados al modelo del avión. Estos factores de emisiones son obtenidos mediante pruebas de campo de los distintos motores.

Tabla 5: Resumen de los factores de emisiones de la metodología ACRP. Fuente: Fuente: Guidebook on Preparing Airport Greenhouse Gas Emissions Inventories, ACRP.

Modelo de Motor	Potencia [hp]	N° motores	Factor de emisiones (E _i)			Flujo de Combustible [kg/s]
			HC [g/kg]	CO [g/kg]	NO _x [g/kg]	
Rotax 912	100	1	71	795	7	0.002
O-200-A	100	1	38	491	16	0.006
O-320-E2D	150	1	36	422	21	0.009

O-320-H2AD	160	1	23	404	36	0.006
O-360-A1A	180	2	27	857	4	0.007
IO-360-L2A	160	1	40	405	29	0.007
IO-360-3B6D	200	1	25	25	54	0.004

2.3 Transporte Marítimo

Esta metodología está basada en un reporte realizado por ENTEC UK Limited en conjunto con Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales de Reino Unido (DEFRA), el cual tiene como principal objetivo desarrollar una base de datos detallada la cual pueda ser utilizada a futuro para estimar las emisiones provenientes del modo marítimo del sector transporte en Reino Unido.

Como ejemplo, dentro de los resultados que desarrolla este reporte se encuentra un inventario de emisiones con su distribución espacial (figura 3), en una grilla de 5 km x 5 km de las aguas del Reino Unido.

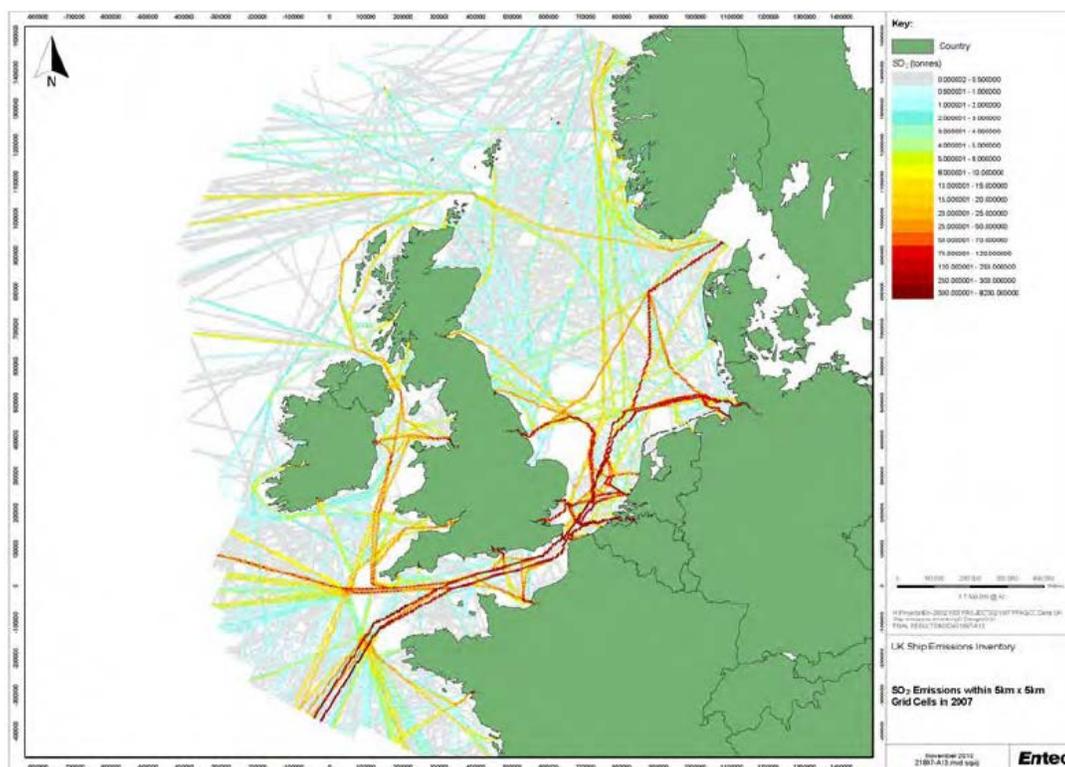


Figura 3: Distribución espacial de mediciones realizada por ENTEC UK Limited.
Fuente: Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community.

Esta metodología usa como información de entrada una base de datos a nivel nacional de todos los movimientos portuarios realizados en el territorio durante un año o periodo de interés, estos movimientos deben tener la información de que tipo de embarcación es la que realiza el movimiento.

La clasificación de las embarcaciones depende en primer lugar su envergadura, la cual se divide en tres categorías

- Menores a 5.000 [GT]
- Entre 5.000 – 25.000 [GT]
- Mayores a 25.000 [GT]

Donde **Gross Tons** [GT] corresponde a una medida de arqueo bruto, es decir: el sumatorio de volúmenes de todos los espacios cerrados del buque. Esto incluye espacios de carga, máquinas, habilitación, pañoles, tanques.

Otras características que deben ser tomadas en cuenta acerca de las especificaciones de cada embarcación son:

- La potencia instalada de los motores
- Tipo de combustible que utilizan los motores
- La velocidad de operación y distancia recorrida (o el tiempo de viaje en océano)
- Tiempo de estancia en puerto
- Tecnologías de mitigación de emisiones instaladas

La estimación de emisiones generadas por las embarcaciones se separa entre las generadas en el mar, las cuales corresponden a los modos de operación “en océano” y “en maniobras”, y las emisiones que son generadas exclusivamente en puertos. También se deben considerar la procedencia de la nave, la cual puede ser doméstica o internacional.

2.3.1 Emisiones en modos océano y en maniobras

Para cada movimiento de una embarcación las emisiones generadas se calculan como sigue:

$$E_{mar} = \frac{D}{v} \cdot [(MP \cdot FC_{MP}) \cdot FE + (MA \cdot FC_{MA}) \cdot FE]$$

Donde:

E_{mar} = Emisiones totales generadas para el contaminante seleccionado.

D = Distancia recorrida por la embarcación entre puertos, en [km].

v = Velocidad promedio de la embarcación, en [km/h].

MP = Potencia instalada del motor principal, en [kW].

FC_{MP} = Factor de carga del motor principal.

FE = Factor de emisión del contaminante seleccionado asignado para cada embarcación dependiendo del tipo de combustible y la velocidad del motor en [g/kWh].

MA = Potencia instalada del motor auxiliar en [kW].

FC_{MA} = Factor de carga del motor auxiliar.

2.3.2 Emisiones en puerto

Para cada estancia de una embarcación en un puerto las emisiones generadas se calculan como sigue:

$$E_{puerto} = T \cdot [(MP \cdot FC_{MP}) \cdot FE + (MA \cdot FC_{MA}) \cdot FE]$$

Donde:

E_{puerto} = Emisiones totales generadas para el contaminante seleccionado.

T = Tiempo de estancia en puerto, en horas.

MP = Potencia instalada del motor principal en [kW].

FC_{MP} = Factor de carga del motor principal en [%].

FE = Factor de emisión del contaminante seleccionado asignado para cada embarcación dependiendo del tipo de combustible y la velocidad del motor en [g/kWh].

MA = Potencia instalada del motor auxiliar en [kW].

FC_{MA} = Factor de carga del motor auxiliar.

2.3.3 Factores de emisión

Los factores de emisión utilizados en esta metodología son definidos *por la Swedish Environmental Protection Agency*, y su selección depende de los siguientes parámetros:

- **Tipo de Motor:** Motor Principal o Motor Auxiliar.
- **Tipo de Combustible:** Petróleo Destilado o Petróleo Residual.
- **Velocidad del Motor:** Velocidad Baja, Velocidad Media o Velocidad Alta.
- **Modo de Operación:** en el mar, en maniobra o en puerto.

En la tabla 6 se presentan algunos factores de emisión según las características de motor y combustible.

Tabla 6: Resumen de los factores de emisiones para el modo en océano medidos en [g/kWh]. Fuente: UK Ship Emissions Inventory.

Tipo de motor	Combustible	Factores de Emisión [g/kWh]		
		NO _x	MP _{2,5}	O ₂
Velocidad Baja	Petróleo Residual	16,99	1,3	20
Velocidad Baja	Petróleo Destilado	16,90	0,2	88
Velocidad Media	Petróleo Residual	13,30	0,5	83
Velocidad Media	Petróleo Destilado	13,00	0,2	52

2.4 Ferrocarriles

Para la estimación de emisiones contaminantes producidas por el transporte en ferrocarril en Chile, se considerarán las metodologías descritas en el reporte del año 2016 realizado por la *European Environment Agency* (EEA).

Esta organización define que las principales fuentes de combustible utilizados en el transporte ferroviario corresponden a diésel, electricidad y vapor. Donde las locomotoras con motores diésel representan el principal foco de interés, ya que las emisiones producidas se originan principalmente por la combustión interna de los motores, similar a los producidos por los vehículos en ruta.

La metodología que se propone en este reporte permite calcular los contaminantes atmosféricos generados por el transporte ferroviario en un país, clasificando tres niveles de estimación dependientes de la información disponible.

- **Tier 1:** Este nivel considera la estimación de las emisiones a partir de la aproximación del consumo total de combustible que se utiliza para el transporte ferroviario en una región, considerando factores de emisión genéricos, como un promedio de las diferentes tecnologías presentes en las flotas de ferrocarriles. La aproximación realizada considera la medición de la compra de combustibles destinado al uso en ferrocarriles, e implica asumir que todo el combustible adquirido en un periodo determinado también es utilizado en ese periodo.
- **Tier 2:** Este nivel de cálculo considera la estimación de las emisiones a partir de la aproximación del consumo total de combustible, considerando la distribución por tipo de locomotora del total de combustible utilizado.
- **Tier 3:** Este nivel utiliza como indicador de actividad el número de horas de operación por año de los ferrocarriles, considerando, cada modelo específico de locomotora en operación, con sus características de consumo y emisiones de contaminante definidos.

El procedimiento para estimar estas emisiones se define a partir de la información disponible, tomando en consideración los criterios descritos en el esquema de decisión de la figura 4.

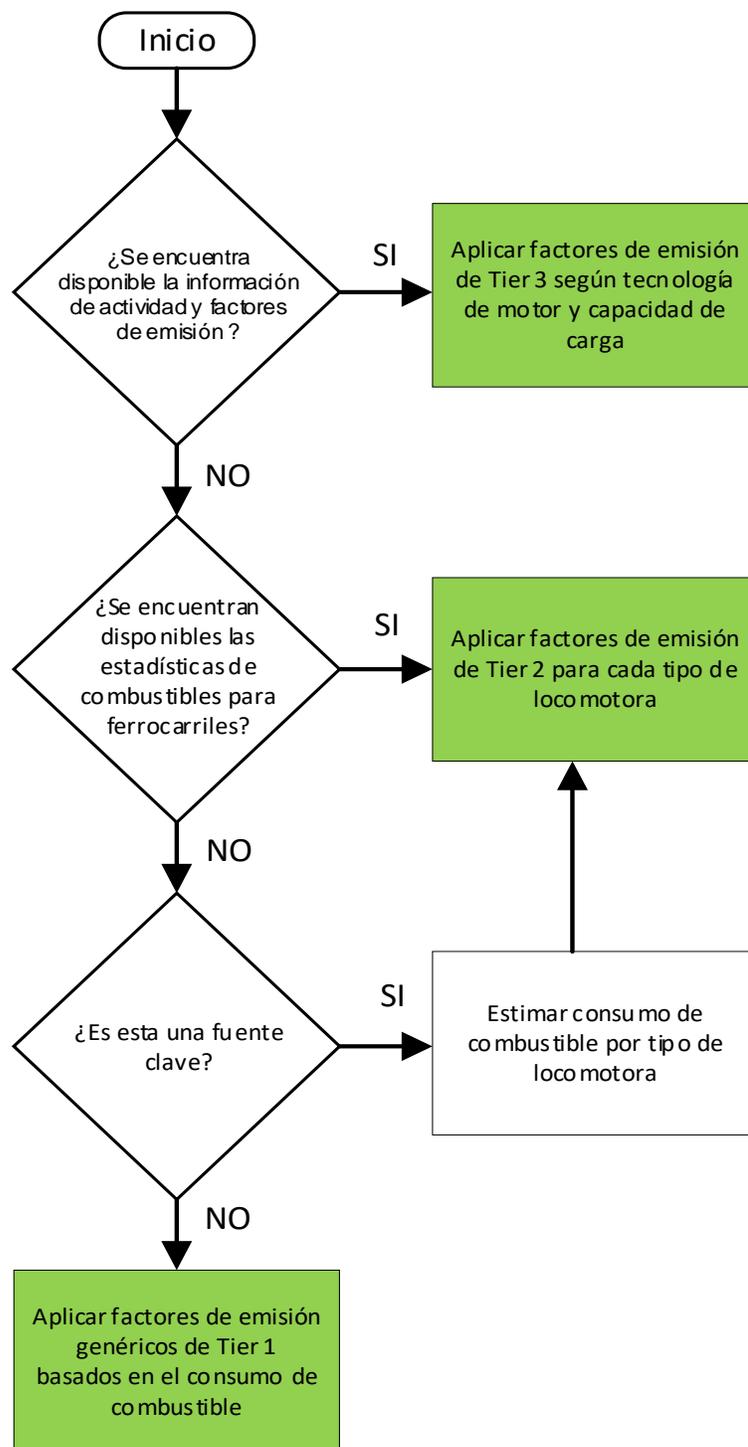


Figura 4: Diagrama de decisiones para calcular las emisiones contaminantes generadas por transporte ferroviario. Fuente: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2016.

A continuación, se describe en detalle el procedimiento de aplicación de cada uno de los niveles mencionados anteriormente.

2.4.1 Tier 1

Esta metodología se basa en el consumo total de combustible que se utiliza para el transporte ferroviario en una región, considerando factores de emisión genéricos, como un promedio de las diferentes tecnologías presentes en las flotas de ferrocarriles.

La aproximación utiliza la siguiente ecuación general para calcular las emisiones generadas:

$$E_i = \sum_m FC_m \times EF_{i,m}$$

Donde:

E_i = emisiones de contaminante i durante el periodo correspondiente al registro, en [g] o [kg]

FC_m = consumo de combustible m usado en el periodo y área definidos, en [ton].

EF_i = factor de emisión de contaminante i por cada unidad de combustible tipo m , en [kg/ton].

m = tipo de combustible (diésel, gas oil)

Los factores de emisión considerados por la metodología se resumen en la tabla 7.

Tabla 7: Resumen de los factores de emisiones por cada contaminante la metodología Tier 1. Fuente: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2016.

Pollutant	Value	Unit
NO _x	52.4	kg/tonne fuel
CO	10.7	kg/tonne fuel
NMVOG	4.65	kg/tonne fuel
NH ₃	0.007	kg/tonne fuel
TSP	1.52	kg/tonne fuel
PM ₁₀	1.44	kg/tonne fuel
PM _{2.5}	1.37	kg/tonne fuel
Cd	0.01	g/tonne fuel
Cr	0.05	g/tonne fuel
Cu	1.7	g/tonne fuel
Ni	0.07	g/tonne fuel
Se	0.01	g/tonne fuel
Zn	1	g/tonne fuel
Benzo(a)pyrene	0.03	g/tonne fuel
Benzo(b)fluoranthene	0.05	g/tonne fuel
(*) CO ₂	3140	kg/tonne fuel
Benz(a)anthracene	0.08	g/tonne fuel
Dibenzo(a,h)anthracene	0.01	g/tonne fuel

2.4.2 Tier 2

Esta metodología es una aproximación basada en la distribución por tecnología del total de combustible utilizado por ferrocarriles, las categorías genéricas según su aplicación y potencia son:

- **Locomotoras de carga:** utilizadas para transporte en largas distancias, equipadas con motores de entre 400 y 4000 kW
- **Locomotoras para maniobras:** utilizadas para acomodar vagones en las estaciones de carga, equipadas con motores de entre 200 y 2000 kW
- **Vagones:** utilizadas en cortas distancias para tráfico urbano u suburbano, equipadas con motores de entre 150 y 1000 Kw.

La ecuación general para calcular las emisiones generadas es:

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

Donde:

E_i = emisiones de contaminante i durante el periodo correspondiente al registro, en [g] o [kg]

$FC_{j,m}$ = consumo de combustible, para cada tipo de combustible m usado por cada categoría j en el periodo y área definidos, en [ton].

$EF_{i,j,m}$ = factor de emisión de contaminante i por cada unidad de combustible tipo m en cada categoría j , en [kg/ton].

m = tipo de combustible (diésel, gas oil)

j = categoría de ferrocarril (de carga, de maniobras, vagones).

Los factores de emisión por categoría de ferrocarril se obtienen de la International Union of Railways (UIC), que considera un promedio de emisiones dependiente de la potencia de la locomotora, y en algunos casos, desde los factores estimados en para vehículos pesados en ruta (camiones).

Tabla 8: Resumen de los factores de emisión para locomotoras de maniobra, según metodología Tier 2. Fuente: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2016.

Pollutant	Value	Unit
NO _x	63	kg/tonne
CO	18	kg/tonne
NMVOG	4.8	kg/tonne
NH ₃	10	g/tonne
TSP	1.8	kg/tonne
PM ₁₀	1.2	kg/tonne
PM _{2.5}	1.1	kg/tonne
(*) N ₂ O	24	g/tonne
(*) CO ₂	3140	kg/tonne
(*) CH ₄	182	g/tonne

Tabla 9: Resumen de los factores de emisión para locomotoras de carga, según metodología Tier 2. Fuente: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2016.

Pollutant	Value	Unit
NO _x	54.4	kg/tonne
CO	10.8	kg/tonne
NMVOG	4.6	kg/tonne
NH ₃	10	g/tonne
TSP	3.1	kg/tonne
PM ₁₀	2.1	kg/tonne
PM _{2.5}	2	kg/tonne
(*) N ₂ O	24	g/tonne
(*) CO ₂	3190	kg/tonne
(*) CH ₄	176	g/tonne

Tabla 10: Resumen de los factores de emisión para vagones, según metodología Tier 2. Fuente: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2016.

Pollutant	Value	Unit
NO _x	39.9	kg/tonne
CO	10.8	kg/tonne
NMVOG	4.7	kg/tonne
NH ₃	10	g/tonne
TSP	1.5	kg/tonne
PM ₁₀	1.1	kg/tonne
PM _{2.5}	1	kg/tonne
(*) N ₂ O	24	g/tonne
(*) CO ₂	3140	kg/tonne
(*) CH ₄	179	g/tonne

Si no existe en las estadísticas una distribución por categoría, del combustible utilizado en cada tipo de locomotora, también es posible aproximar el consumo como un resultado del total de horas de operación según los índices descritos en la tabla 11.

Tabla 11: Factores de consumo de combustible por categoría de locomotora, según metodología Tier 2. Fuente: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2016.

Categoría	Consumo de combustible [kg/h]
Locomotora de carga	219
Locomotora de maniobras	90,9
Vagones	53,6

2.4.3 Tier 3

Los métodos descritos anteriormente definen como principal indicador la venta o uso total de combustible. El Tier 3 define como indicador de actividad, el número de horas de operación por año, considerando, cada modelo específico de locomotora en operación. Por lo que se requiere de un inventario de datos detallado para desarrollar esta metodología, considerando por cada categoría de ferrocarril:

- Tiempo de operación
- Modelo de locomotora
- Carga transportada

Considerando, además, la velocidad de traslado diferenciado entre pasajeros y carga.

La ecuación general para calcular las emisiones generadas es:

$$E_i = \sum_m \sum_j (N_{j,m} \times H_{j,m} \times P_{j,m} \times LF_{j,m} \times EF_{i,j,m})$$

Donde:

E_i = emisiones de contaminante i durante el periodo correspondiente al registro, en [g] o [kg]

$N_{j,m}$ = número de locomotoras de categoría j utilizando combustible tipo m .

$H_{j,m}$ = tiempo promedio de operación de la locomotora categoría j en el periodo correspondiente al registro, utilizando combustible tipo m , en horas.

$P_{j,m}$ = potencia promedio de la locomotora categoría j utilizando combustible tipo m , en [kW].

$LF_{j,m}$ = porcentaje de utilización de carga promedio de la locomotora categoría j .

$EF_{i,j,m}$ = factor de emisión de contaminante i por cada unidad de combustible tipo m en cada locomotora categoría j , en [kg/ton].

m = tipo de combustible (diésel, gas oil)

j = categoría de ferrocarril (de carga, de maniobras, vagones).

Como ejemplo de los datos necesarios para la aplicación de este método, en la Tabla 12 se detallan los factores de emisión de los principales contaminantes analizados en algunos modelos de locomotora.

Tabla 12: Factores de emisión según modelo de locomotora. Fuente: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2016.

Model	Engine	Power		Brake-specific diesel fuel consumption (kg/kWh)	Reported emission levels (g/kWh)			
		HP	kW		NOx	CO	HC	CO ₂
EMD SD-40	645E3B	3000	2237	0.246	15.82	2.01	0.36	440
EMD SD-60	710G3	3800	2834	0.219	13.81	2.68	0.35	391
EMD SD-70	710G3C	4000	2983	0.213	17.43	0.80	0.38	380
EMD SD-75	710G3EC	4300	3207	0.206	17.84	1.34	0.40	367
GE dash 8	7FDL	3800	2834	0.219	16.63	6.44	0.64	391
GE dash 9	7FDL	4400	3281	0.215	15.15	1.88	0.28	383
GE dash 9	7FDL (Tier 0)	4400	3281	0.215	12.74	1.88	0.28	383
Evolution	GEVO 12	4400	3281	NA	10.86	1.21	0.40	NA
2TE116	1A-5Д49	6035	2•2250	0.214	16.05	10.70	4.07	382
2TE10M	10Д100	5900	2•2200	0.226	15.82	10.62	4.07	403
TEП60	11Д45	2950	2200	0.236	16.05	10.62	3.84	421
TEП70	2A-5Д49	3420	2550	0.211	15.83	10.55	4.01	377
2M62	14Д40	3943	2•1470	0.231	13.40	9.01	3.23	412

La participación de locomotoras eléctricas es cercana al 10% de total del transporte ferroviario.

Tabla 13: Distribución de energético utilizado por locomotoras. Fuente: informe anual 2016 transporte y comunicaciones, INE.

Año	Locomotoras (número)			
	Total	Eléctricas	Diesel	Vapor
2012	233	21	209	3
2013	242	20	218	4
2014	241	20	217	4
2015	241	17	220	4
2016	244	12	229	3

2.5 Metodologías seleccionadas para la estimación de emisiones

- **Transporte Terrestre:** Para la estimación de emisiones del transporte terrestre, se considerará la metodología TIER 3 de IPCC.
- **Transporte Aéreo:** Se utiliza la metodología TIER 2 presentada por la EEA debido a que está diseñada para realizar inventarios de emisiones a nivel nacional para todo Europa con revisiones periódicas y actualizaciones constantes del documento, dentro de la cual se encuentra la guía para contabilizar las emisiones provenientes del sector aeronáutico.
- **Transporte Marítimo:** Para la estimación de emisiones del transporte marítimo, se considerará la metodología TIER 2 de la EEA. La ACRP presenta un documento que contiene una guía para realizar inventarios de emisiones del sector aéreo, basado en la misma información que se presenta en la metodología de la EEA, por lo cual serían metodologías homólogas. EEA, además, presenta un segundo documento donde se especializa en la cuantificación de emisiones generadas por aeronaves pequeñas con motores tipo pistón, lo que deriva en modelos más precisos para el cálculo de emisiones generadas, lo cual no se incluye en este estudio.

- **Ferrocarriles:** Para la estimación de emisiones del transporte ferroviario, se considerará la metodología TIER 2 de la EEA. No se dispone de las estadísticas del combustible utilizado en cada tipo de locomotora, por lo que aproximará el consumo como un resultado del total de horas de operación definidas en el plan de infraestructura para la movilidad.

3 Escenarios Tecnológico / Normativos

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 conformará el denominado Plan Nacional de Infraestructura para la Movilidad 2020-2050 (PNIM 2050).

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. Desde este punto de vista se ha establecido que se contará con un mínimo de cinco alternativas de Plan.

Para cada uno de los cinco planes se deben proponer dos escenarios que incluyan medidas de carácter tecnológico y/o regulatorio (E1 y E2), que impacten en las emisiones y movilidad (ej.: incorporación de la electromovilidad, implementación de normas, cumplimientos de compromisos internacionales, etc.). Estos escenarios deberán definirse en común acuerdo con la contraparte ministerial.

Este estudio deberá analizar los dos escenarios previamente definidos (E1 y E2), estimando las emisiones, efectuando comparaciones entre éstos y el Plan respectivo (E1 vs Plan A, E2 vs Plan A).

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

3.1 Transporte Terrestre

Para la proyección de contaminantes terrestres de vehículos en ruta se consideran dos elementos relevantes para el análisis:

- **Tendencias normativas:** incorporación de estándares de emisión más estrictos, en particular la norma EURO 6 para vehículos livianos y EURO VI para vehículos pesados.
- **Tendencias tecnológicas:** introducción de vehículos eléctricos a la flota nacional, tanto para transporte público como privado, de pasajeros y carga.

La incorporación y penetración de la norma EURO 6 en Chile está considerada como decreto ley para implementación 24 meses después de ser aprobada, lo cual está programado para discusión y aprobación el año 2019. De acuerdo con esto, se plantean dos posibilidades: caso optimista sería incorporar EURO 6 lo más tempranamente el 2023 y en un caso pesimista el 2026.

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 de la USEPA. Debido a la naturaleza de estos procedimientos, la estimación más optimista será establecer la incorporación de la EURO 6 o su equivalente en Chile para el año 2023. Luego, de manera estimativa, se considera que el trámite de la norma se demore tres años más, incorporándose definitivamente el año 2026, siendo este el caso más pesimista.

De manera paralela, 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 y la Estrategia de Electromovilidad, 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 electrolinerías 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 esta 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 casos para la penetración de electromovilidad en vehículos privados. El caso optimista considera que para el año 2050 se tendrá un 50% de vehículos privados eléctricos, el caso pesimista asume un 30% de vehículos privados eléctricos para el 2050.

La propuesta optimista se encuentra respaldada por la proyección de BNEF en su reporte del 2019, 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 nuestra posición 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%).

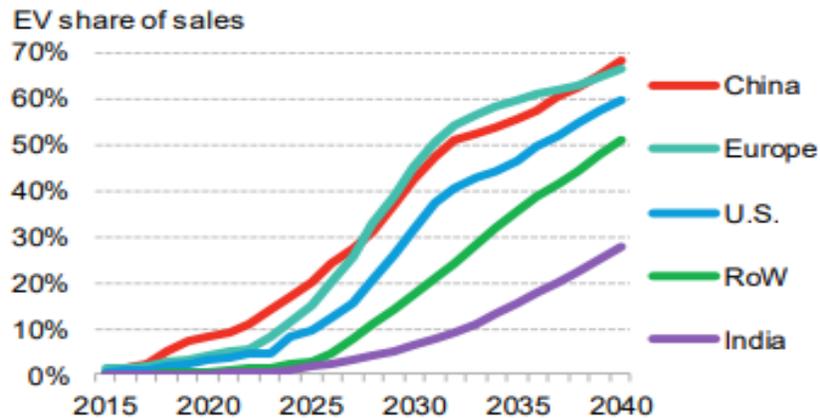


Figura 5: Proporción de uso de electromovilidad en transporte de pasajeros, por región. Fuente: Kang 1996

El crecimiento de los vehículos eléctricos responde a un comportamiento de tecnologías disruptivas, por lo que en términos de demanda se comporta como una Curva S, donde el comienzo de esta se puede tratar como un crecimiento exponencial (Kang 1996).

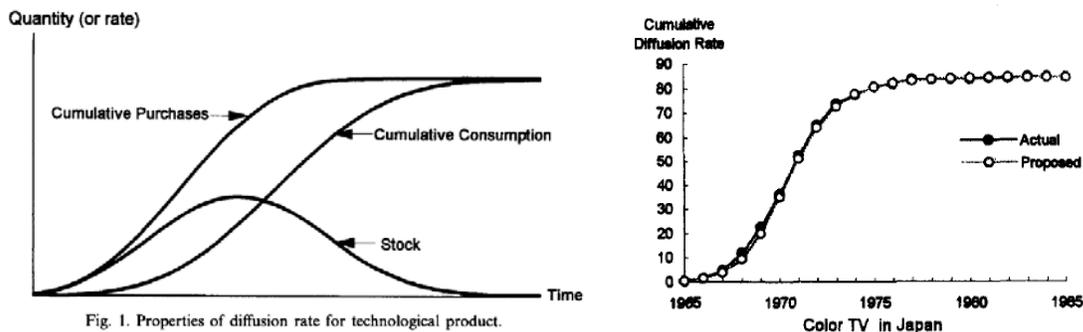


Figura 6: Representación de crecimiento de tecnologías disruptivas. Fuente: Kang 1996

Por lo que en ambos escenarios el crecimiento será exponencial de tal manera que se cumplan los valores pronosticados.

De esta manera, los casos propuestos para transporte terrestre en ruta serán los dos siguientes:

- **Optimista:** 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.

- **Pesimista:** Implementación norma EURO 6/VI en Chile el 2026 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.

De manera secundaria se considera, para ambos escenarios, la completa eliminación de vehículos no catalíticos para el año 2022.

3.2 Transporte Marítimo

En el caso del transporte marítimo también existen cambios normativos y tecnológicos a considerar. 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 (IMO) establece que el límite mundial de azufre para el bunkering descenderá de 3.5% a 0.5% a comienzos de 2020, 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.

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.

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.

Se considerarán dos casos, en relación con el cumplimiento de esta normativa, para las embarcaciones que naveguen en aguas chilenas. Un caso optimista de adopción el año 2020 y un caso pesimista, con adopción tardía al año 2023.

En relación con cambios tecnológicos, el horizonte es más incierto y con pocas opciones en el corto y mediano plazo. Maersk, la compañía de containers 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.

Una de las opciones con mayor potencial de desarrollo en este sector es la utilización de gas natural licuado (GNL) como combustible, especialmente para barcos utilizados para transporte de GNL. La flota de embarcaciones navieras propulsadas con GNL actualmente en operación se estima en 118 al 2017,

creciendo a 143 el año 2018, además de 135 en construcción. No se vislumbra un desplazamiento importante del combustible fósil actual en el horizonte 2050, por lo que no se sugieren cambios tecnológicos relevantes en el rubro transporte marítimo para Chile en este sentido.

A más largo plazo se vislumbra la posibilidad de utilizar celdas de combustible con hidrógeno para energizar estas embarcaciones. Sin embargo, esta tecnología no debiese tener un impacto notorio en el horizonte 2050 para el caso de Chile.

3.3 Transporte Aéreo

El transporte aéreo ha manifestado interés en reducir sus emisiones globales, sin embargo, no existen planes de alto impacto a nivel tecnológico. La gestión de tráfico aéreo ha logrado mejorar la eficiencia de combustible en 30% entre 1978 y 2018, según la asociación Airlines for America. Esto ha permitido aumentar el transporte de pasajeros y carga en 42%, emitiendo solo un 3% más de emisiones de gases efecto invernadero. Sin embargo, estas medidas no serán suficientes para contrarrestar las proyecciones de crecimiento de actividad del sector, supuestamente el doble de hoy para el año 2035 a nivel mundial.

Un esfuerzo por evitar que las emisiones se dupliquen al duplicar el tráfico aéreo corresponde al acuerdo denominado CORSIA (Carbon Offsetting Reduction Scheme for International Aviation), firmado por 68 países en octubre 2016. Este acuerdo ha sido impulsado por la Organización de Aviación Civil Internacional, parte de la Naciones Unidas, que propone un crecimiento de carbono-neutralidad, con niveles 2020 como base. Es decir, en los años posteriores al 2020, las emisiones debiesen permanecer sin aumento con respecto al año 2020, con cambios graduales que varían entre un país y otro. CORSIA trabajará a través de un esquema de compensación de emisiones, traspasando a otros sectores el aumento en CO₂. Por lo tanto, no se traduce en cambios tecnológicos en los sistemas de propulsión de los aviones.

Una posibilidad de mejoramiento de combustible corresponde a la utilización de low-carbon synthetic fuel, pero su potencial de uso comercial no tiene un horizonte cercano. Otras opciones de aviones eléctricos o híbridos se ven más promisorias, pero solo en vuelos de distancias cortas, al menos en el futuro cercano. Para la proyección 2050 de Chile no se espera tener cambios importantes a las tecnologías actuales.

Por lo tanto, no se vislumbran cambios normativos ni tecnológicos importantes con respecto a la situación actual, en términos de emisiones. Este modo no tendrá propuestas de escenarios.

3.4 Escenarios propuestos

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

- **Escenario Optimista:**
 - Transporte terrestre. 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.
 - Transporte marítimo. Contenido de azufre de 0.5% para combustible de motores principales al año 2020.
 - Transporte aéreo. Sin medidas.

- **Escenario Pesimista:**
 - Transporte terrestre. Implementación norma EURO 6/VI en Chile el 2026 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.
 - Transporte marítimo. Contenido de azufre de 0.5% para combustible de motores principales al año 2023.
 - Transporte aéreo. Sin medidas.

El detalle de cómo se implementarán estas medidas en el tiempo, traduciéndose en escenarios de emisiones, se detallará siguiendo la metodología del capítulo 2. Como ejemplo, las tablas a continuación resumen para cada periodo el porcentaje de participación de cada tecnología en un par de categorías de vehículos.

Tabla 14: Porcentaje de participación de cada tecnología en un escenario optimista. Fuente: Elaboración propia.

Optimista					
BUS RIG	Categoría	2020	2030	2040	2050
	Convencional	0%	0%	0%	0%
	E1	0%	0%	0%	0%
	E2	1%	0%	0%	0%
	E3	44%	19%	8%	4%
	E4	0%	0%	0%	0%

	E5	52%	30%	13%	6%
	E6	0%	38%	18%	11%
	Eléctrico	2%	13%	60%	80%
VLP	Categoría	2020	2030	2040	2050
	No Cat	0%	0%	0%	0%
	E1	2%	0%	0%	0%
	E2	0%	0%	0%	0%
	E3	24%	14%	9%	5%
	E4	21%	13%	8%	5%
	E5	53%	39%	23%	14%
	E6	0%	34%	56%	26%
	Eléctrico	0%	0%	5%	50%

Tabla 14: Porcentaje de participación de cada tecnología en un escenario pesimista. Fuente: Elaboración propia.

Pesimista					
BUS RIG	Categoría	2020	2030	2040	2050
	Convencional	0%	0%	0%	0%
	E1	0%	0%	0%	0%
	E2	1%	0%	0%	0%
	E3	44%	19%	8%	4%
	E4	0%	0%	0%	0%
	E5	52%	42%	18%	8%
	E6	0%	25%	13%	16%
	Eléctrico	2%	13%	60%	72%
VLP	Categoría	2020	2030	2040	2050
	No Cat	0%	0%	0%	0%
	E1	2%	0%	0%	0%
	E2	0%	0%	0%	0%
	E3	24%	14%	9%	5%
	E4	21%	13%	8%	5%

	E5	53%	50%	30%	18%
	E6	0%	22%	50%	42%
	Eléctrico	0%	0%	4%	30%

La figura siguiente muestra la distribución tecnológica para cada año, considerando los cambios normativos y tecnológicos en el escenario optimista para transporte público en todo el territorio nacional.

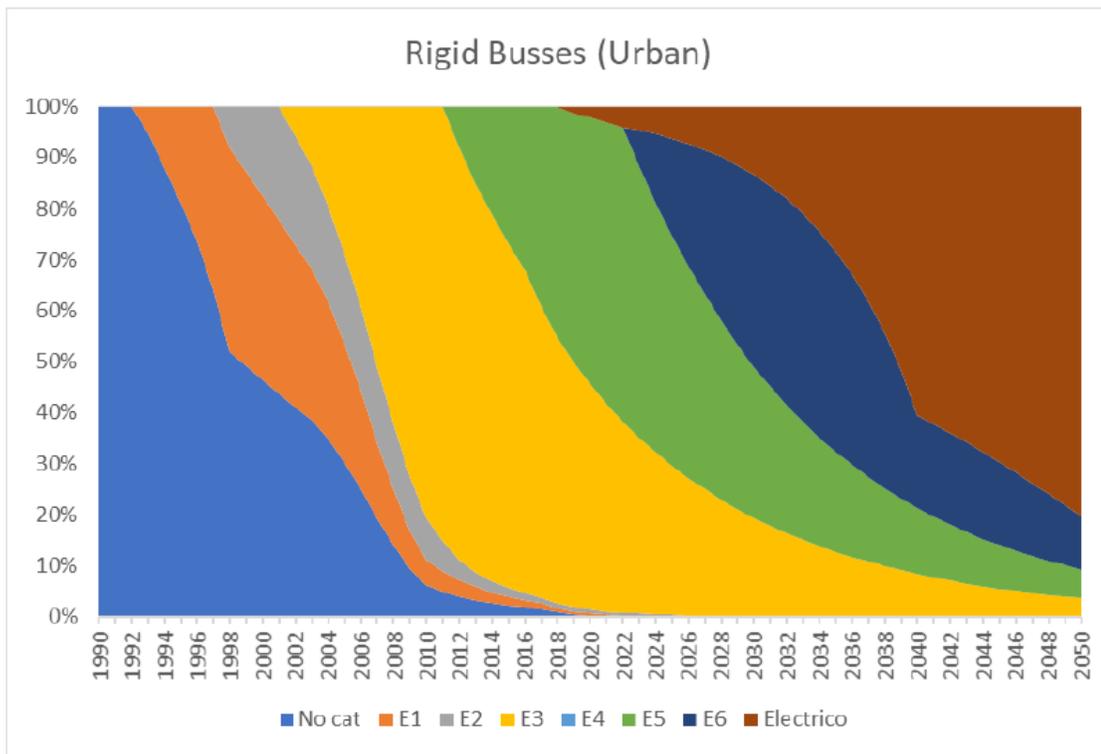


Figura 7: Distribución tecnológica por año, considerando cambios normativos y tecnológicos. Fuente: Elaboración propia.

Para considerar las emisiones indirectas de vehículos eléctricos, se consideran las proyecciones resumidas en el siguiente gráfico:

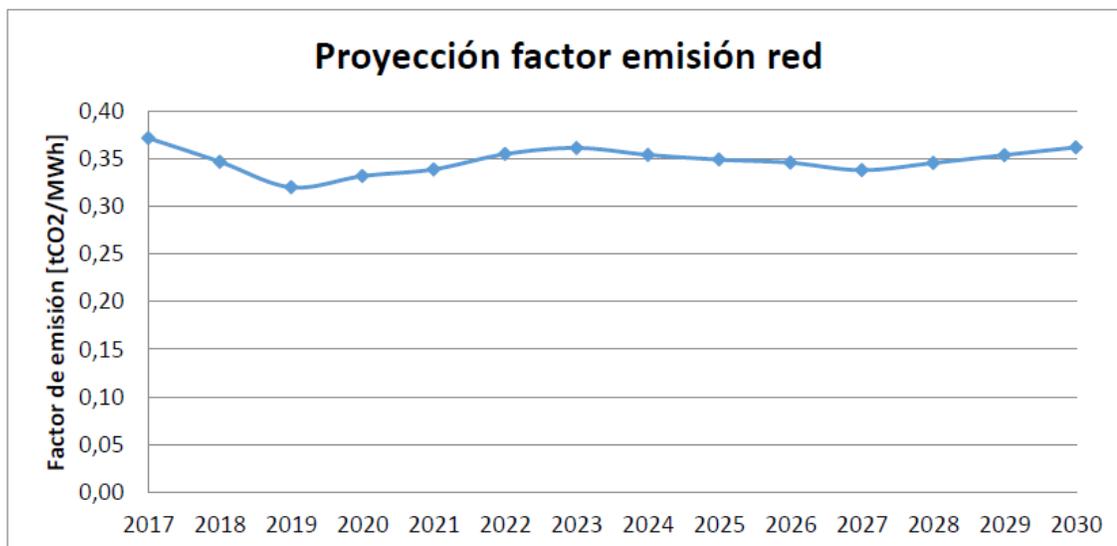


Figura 8: Proyección factor emisión CO₂ red de distribución. Fuente: Elaboración propia.

Donde se puede establecer un factor de emisión de la red prácticamente constante en un valor cercano a 0,35 [tCO₂/MWh]. Ya que se proyecta la inclusión de energías renovables en la matriz energética que permiten que este factor se mantenga durante el tiempo, en caso contrario, considerando el aumento de demanda de energía eléctrica, el factor de emisión sería mucho mayor si el suministro de esta viniese de fuentes no renovables. *Fuente: Actualización de la proyección de emisiones 2017-2030 y análisis de medidas de mitigación CO₂ equivalente.*

4 Bibliografía

1. **European Environment Agency.** *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 (1.A.3.a Aviation 2016)*. Luxembourg : European Environment Agency, 2016.
2. **Ministerio del Medio Ambiente.** *mma.gob.cl*. [En línea] 22 de Marzo de 2019. <https://mma.gob.cl/subsecretario-riesco-anuncia-anteproyecto-de-la-norma-de-emisiones-euro-6-para-vehiculos-livianos-y-medianos/>.
3. **European Environment Agency.** *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 (1.A.3.c Railways 2016)*. Luxembourg : European Environment Agency, 2016.
4. **Ministerio de Energía, Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, Ministerio del Medio Ambiente.** *Estrategia Nacional de Electromovilidad*. Santiago, Chile : s.n., 2018.
5. **Sociedad Consultora Sistemas Sustentables Ltda.** *Actualización Metodológica del Modelo*. s.l. : Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones SECTRA, 2014.
6. **Vilches, E., Ivelic, A. M., & Ferreiro, O.** *Revisión de la metodología de medición de las variables “Tasa de ocupación” y “Clasificación de vehículos”*. Santiago : SOCHITRAN, 1991.
7. **Marcano, L. U.** *Estimación de emisiones de los ciclos de aterrizajes y despegues de aeronaves en el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas*. Madrid : s.n., 2018.
8. **Qualimet.** *Estimación de Demanda por Transporte Aéreo Nacional e Internacional en Chile*. Santiago : s.n., 2013.
9. **FAA.** «*Aircraft fuel system,*» de *The Aviation Maintenance Technician Handbook–Airframe, Volume 2*. Oklahoma : US Department transportation, 2012.
10. **Junta de Aeronáutica Civil.** *Anuario 2015 de transporte aéreo*. Santiago : Junta Aeronáutica Civil, 2015.
11. **DGAC.** *Actualización memoria de cálculo de emisiones Aeropuerto Arturo Merino Benítez*. Santiago : s.n., 2015.
12. **MMA.** *Escenario Referenciales para la Mitigación del Cambio Climático Resultados de FASE 1*. Santiago : s.n., 2013.
13. —. *Escenario Referenciales para la Mitigación del Cambio Climático Resultados de FASE 2*. Santiago : s.n., 2014.
14. **OACI.** *Emisiones de los motores de las aeronaves Volumen II*. 2008.
15. **Comisión Nacional de Energía.** *Venta combustibles líquidos*. [En línea] <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/combustibles-por-region/>.
16. **Armada de Chile - DIRECTEMAR.** *Boletín Estadístico Marítimo*. 2016.
17. **Armada de Chile.** *Análisis Estadísticas Portuarias*. 2016.

18. **Cooper, D., & Gustafsson, T.** *Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors.* Norrkoping, Suecia : s.n., 2004.
19. **Entec UK Limited.** *Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community.* 2002.
20. —. *UK Ship Emissions Inventory, Final Report.* 2010.
21. **Sin, M.** *Análisis de la implementación de combustibles con bajo contenido en azufre en el tráfico marítimo en el Mar del Norte.* Bacelona, España : s.n., 2012.
22. **Wunderlich Contreras, M. R.** *Análisis de la Contaminación Atmosférica Provocada por Buques en base a las Exigencias del Anexo VI del MARPOL 73/78.* Valdivia, Chile. : Universidad Austral de Chile, 2005.
23. **CORSIA.** *Plan de compensación y reducción de carbono para la aviación internacional.* s.l. : OACI, 2018.
24. **POCH.** *Actualización de la proyección de emisiones 2017- 2030 y análisis medidas de mitigación de CO2 equivalente.* Santiago : s.n., 2017.
25. **Ministerio de Energía.** *Resumen Política Energética de Chile 2050.* Santiago : s.n., 2018.
26. **Byungryong Kang,** Hojoong Kim, Chimoan Han L and Chuhwan Yim. A demand-based model for forecasting innovation diffusion. *Computers ind. Engng* Vol. 30, No. 3, pp. 487--499, 1996.

ASESORÍA TÉCNICA

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

INFORME FASE 2

IDENTIFICACIÓN DEL DOCUMENTO : Segundo Informe (FASE 2)
FECHA : 13 diciembre 2019
ELABORADO POR : Mauricio Osses A.
CONTRAPARTE TÉCNICA : MOP - DIRPLAN
FINANCIADO POR : Banco Interamericano de Desarrollo

EQUIPO DE TRABAJO

Universidad Técnica Federico Santa María:

Mauricio Osses

Benjamin Gomez

Matias Concha

Adolfo Gaete

En coordinación con el equipo del Ministerio de Obras Públicas:

Dirección de Planeamiento: Vianel Gonzalez, Felipe Livert, Mauricio Carrasco, Mónica Baeza.

Dirección General de Concesiones: Patricia Henríquez

Dirección de Aeropuertos: Rodrigo Aranda

Dirección de Obras Portuarias: Ariel Grandón

Dirección de Vialidad: Christian Vigouroux

Asesores externos: Marcial Echenique y Gonzalo Vejar

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	4
2	METODOLOGÍAS DE ESTIMACIÓN DE EMISIONES	6
2.1	Transporte Vial	6
2.2	Transporte Aéreo	10
2.3	Transporte Marítimo.....	19
2.4	Ferrocarriles	24
2.5	Emisiones por generación eléctrica	26
2.6	Metodologías seleccionadas para la estimación de emisiones.....	27
3	ESCENARIOS TECNOLÓGICO / NORMATIVOS.....	28
3.1	Transporte Vial	28
3.2	Transporte Marítimo.....	33
3.3	Transporte Aéreo	39
3.4	Ferrocarriles	53
3.5	Escenarios propuestos	53
3.6	Factores de Emisión ponderados según escenarios propuestos.....	58
	RESULTADOS	59
4	BIBLIOGRAFÍA.....	64
5	ANEXOS.....	66

1 Introducción

El presente Informe corresponde al estudio “**Consultoría para la cuantificación de emisiones del Plan Nacional de Infraestructura para la Movilidad 2020-2050**”. 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).

Este estudio ha sido financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), con los siguientes objetivos:

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, PM₁₀, 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 segundo Informe de Avance reporta las actividades correspondientes a la FASE 2 del estudio: desarrollo y aplicación de la propuesta metodológica, las tareas de análisis y definición de las variables, parámetros, indicadores u otros aspectos requeridos para estimar las emisiones de contaminantes mediante el modelo de transporte utilizado para la formulación del PNIM 2050, que emplea el software de aplicación libre TRANUS.

Esta metodología debe considerar las fuentes de información disponibles a la fecha, de acuerdo con el estado de avance de la formulación del PNIM 2050, los recursos disponibles y los plazos de entrega de los trabajos.

En esta etapa el consultor deberá respaldar la metodología con información pertinente y consensuar la metodología con el equipo MOP responsable.

2 Metodologías de estimación de Emisiones

2.1 Transporte Vial

Las emisiones asociadas al modo transporte terrestre en ruta (vial) incluyen todos los vehículos con motor de combustión interna que se desplazan por caminos o carreteras públicas. Las emisiones consideradas corresponden a contaminantes criterio y gases efecto invernadero generados en el proceso de combustión de fuentes móviles, específicamente: monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos (HC), material particulado fino (MP2.5), carbono negro (BC), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄).

Los datos de entrada requeridos para el desarrollo de esta metodología son:

- **Arcos:** tramo o sección de carretera completa delimitada por dos puntos (nodos).
- **Flujos de vehículo:** se debe especificar la cantidad de vehículos que transitan por determinado arco en un periodo, considerando, a que vehículo corresponde cada uno de estos flujos, ya que para obtener los factores de emisión se necesitara conocer esta clasificación.
- **Distancia total del arco**
- **Velocidad media de los vehículos en el arco**

Considerando la disponibilidad de la información requerida, se define la ecuación para la estimación de emisiones como:

$$E_i = FE_i \cdot FD_i \cdot D \cdot N$$

Donde:

i: Tipo de contaminante

E_i : Emisión por tipo de contaminante *i*.

FE_i : Factor de Emisión, para cada contaminante *i*.

FD_i : Factor de Desgaste, para cada contaminante *i*.

D: Distancia recorrida por el vehículo.

N: Cantidad de vehículos correspondientes a una categoría específica.

Los factores de emisión FE_i para vehículos terrestres en ruta se basan en valores experimentales reportados por el modelo europeo para la estimación de

contaminantes COPERT 4. Este modelo ofrece información para cada tipo de contaminante emitido por el motor de un vehículo, considerando sus características tecnológicas, lo que permita adaptarlo a distintas localidades. COPERT 4 utiliza una serie de polinomios de alto orden que dependen de la velocidad media y las características del vehículo. Para poder utilizar estos polinomios se debe conocer la naturaleza del combustible (Diesel, Gasolina) y el tipo de vehículo (Car, LGV, HGV, Bus, Coach, Moped, Motorcycle), además de su subdivisión (según tonelaje o su articulación según corresponda).

La cantidad de vehículos N se obtiene del flujo total de vehículos, considerando su clasificación a partir de los siguientes términos:

- Tipo de vehículo,
- Tipo de combustible,
- Tipo de tecnología (catalítico, euro 1, 2, 3, 4, 5 o 6)

Estimado a partir de la siguiente ecuación:

$$N = f \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3$$

Donde:

f : Flujo de vehiculos.

X_1 : Porcentaje de vehículos que utilizan ese combustible en su subdivisión vehicular.

X_2 : Porcentaje del tipo de tecnología para esa subdivisión vehicular.

X_3 : Porcentaje del tipo de vehículo respecto al total.

Se debe asignar una clasificación a los vehículos medidos considerando:

- Tipo de vehículo,
- Tipo de combustible,
- Tipo de tecnología (catalítico, euro 1, 2, 3, 4, 5 o 6)

En la figura 1 se visualiza una segregación estándar con sus subcategorías para cada grupo de clasificación.

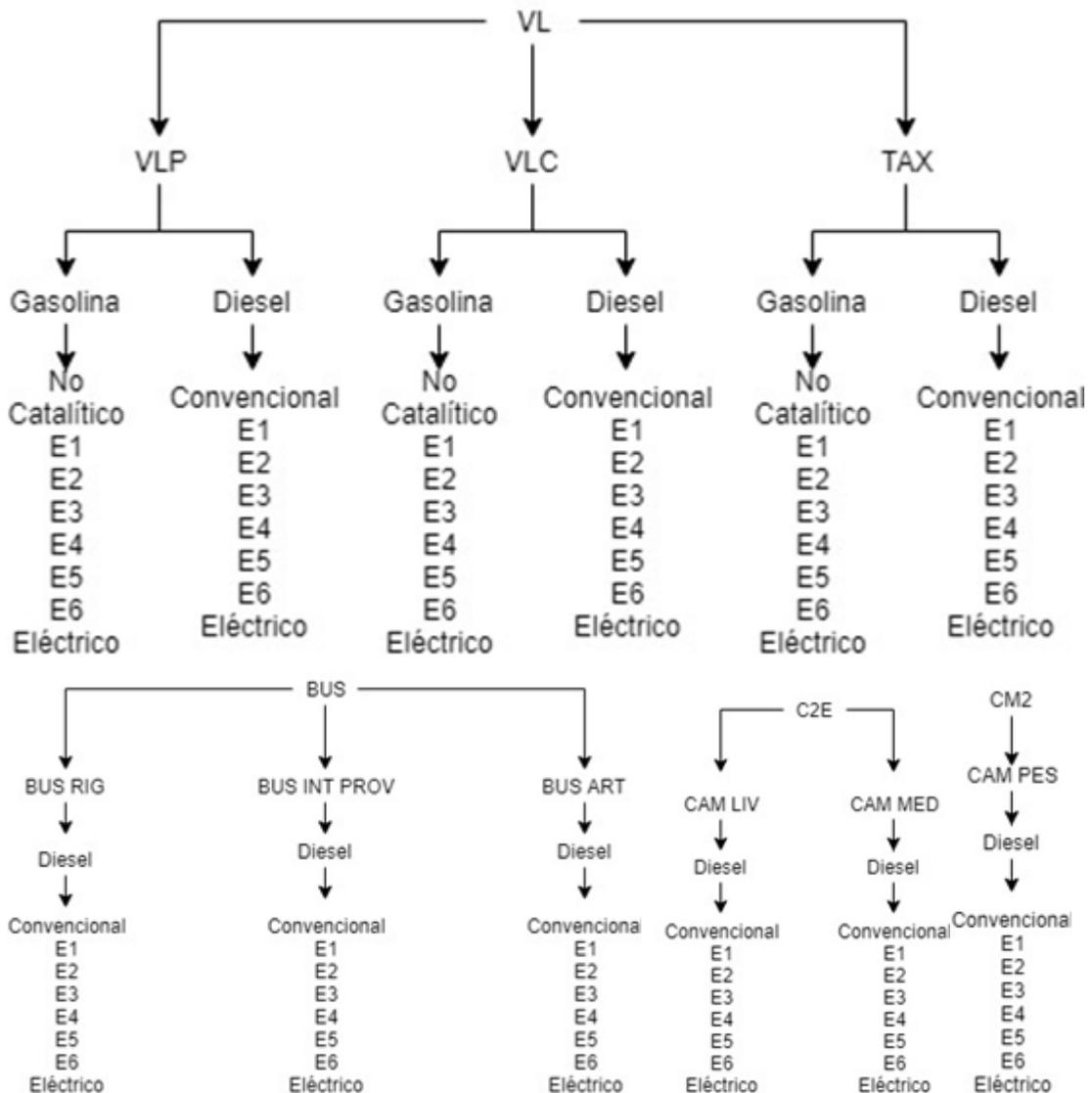


Figura 1: Segregación estándar con subcategorías para cada grupo de vehículos de transporte terrestre. Fuente: Elaboración propia.

Estas categorías se establecen según las características de cada uno de los vehículos, basados en los decretos:

- **DTO-55 16-ABR-1994** – “NORMAS DE EMISION APLICABLES A VEHICULOS MOTORIZADOS PESADOS”
- **DTO-211 11-DIC-1991** – “NORMAS SOBRE EMISIONES DE VEHICULOS MOTORIZADOS LIVIANOS”

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 privado.

Así es como para cada tipo de vehículo, combustible y tecnología presente en el territorio de análisis, existe un factor de emisión el cual se extrae de la norma COPERT 4. Luego, para obtener las emisiones totales, se requiere conocer la composición porcentual de estos flujos, que se dividen de manera proporcional a nivel nacional según región, la que se mantiene de manera consistente a través de los años. Para el caso específico del factor de emisión eléctrico de CO₂ se considera la emisión de la matriz energética (explicado más adelante en la sección “1.5 Electromovilidad”) obteniendo los siguientes valores:

En el informe de la IEA del 2018 se estima un promedio de consumo energético por vehículo eléctrico para VL y BUS/C2E los cuales son:

- VL eléctrico 20 - 27 [kWh/100 km]
- BUS/C2E 135 - 170 [kWh/100 km]

(IEA analysis based on country submissions; IEA, 2018c)

Luego considerando que la emisión de generación eléctrica de 350 [gr CO₂/kWh] se obtiene:

$$EF_{CO_2,electrico,VL} = 82,25 \text{ gr/km}$$

$$EF_{CO_2,electrico,BUS/C2E} = 533,75 \text{ gr/km}$$

2.2 Transporte Aéreo

Para la estimación de emisiones contaminantes producidas por el transporte aéreo en Chile, se considerarán las metodologías elaboradas por la *European Environment Agency* (EEA) y el *Airport Cooperative Research Program* (ACRP).

2.2.1 Metodología EEA

Esta metodología proviene de un reporte técnico publicado por la agencia europea en el año 2016, para el desarrollo de inventarios de emisiones a nivel nacional. Este reporte es una guía que recopila la información de inventarios de emisiones realizados por diferentes autores para las principales fuentes de contaminación, en la que se incluye la metodología para estimar las emisiones que tienen como fuente las operaciones de aeronaves durante los ciclos de aterrizaje y despegue (LTO), y de traslado entre su origen y destino en modo crucero (CCD)

La metodología que se propone en este reporte permite calcular los contaminantes atmosféricos generados por el transporte aéreo en un país, clasificando tres niveles de estimación dependientes de la información disponible.

- **Tier 1:** Para este nivel de cálculo es necesaria la información de la venta de combustibles para aviación divididos en uso doméstico e internacional, donde se asume que la venta total de combustible es igual al uso total de este. Además de saber el total de ciclos LTO también divididos en doméstico e internacional. El cálculo consiste en utilizar una flota genérica de aviones para así tener un Factor de Emisión genérico promedio para los ciclos LTO y CCD.
- **Tier 2:** Para este segundo nivel además de la información de venta de combustible de aviación divididos en doméstico e internacional se agrega la división específica de consumo de combustible por cada aeronave. Para el cálculo se utilizan factores de emisión específicos para

cada aeronave para ciclos LTO y factores de emisión genéricos para los ciclos CCD.

- **Tier 3:** Este nivel de cálculo se encuentra subdividido en dos variantes: Tier 3.a y Tier 3.b. Para este nivel es requerida la información de cada vuelo que contenga el modelo de la aeronave y la distancia total recorrida, divididos en doméstico e internacional. Para el caso del nivel Tier 3.a se utiliza información específica por cada **aeronave**, en cambio para el nivel Tier 3.b es necesario tener la información de la trayectoria completa del **vuelo** además de un software computacional que pueda ser capaz de procesar esta información.

Para definir la metodología a utilizar en el cálculo de las emisiones del transporte aéreo, se debe tener en cuenta la base de datos disponible para la aplicación de uno de los niveles de cálculo mencionados anteriormente, considerando el siguiente árbol de decisión:

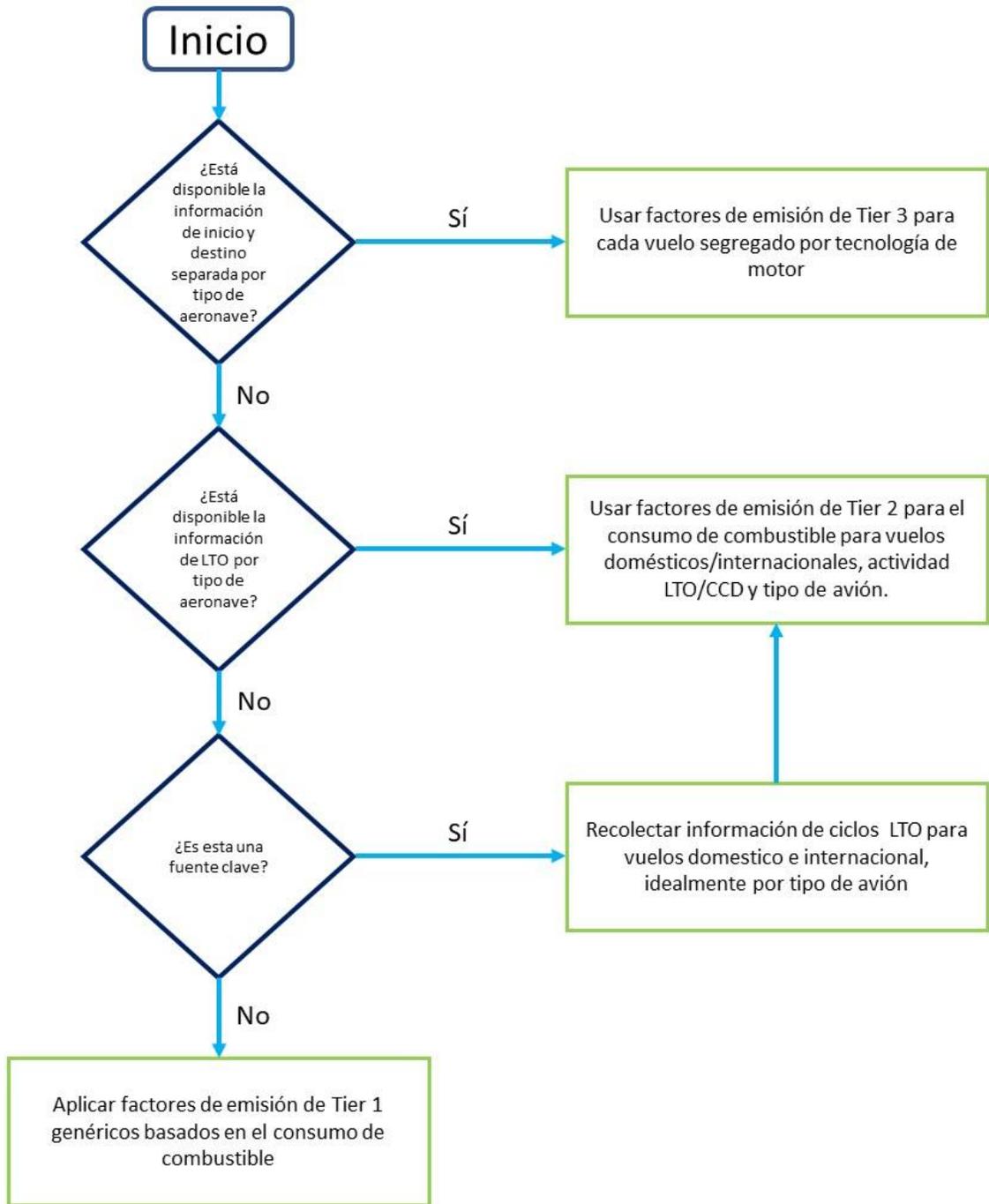


Figura 2: Diagrama de decisiones para calcular las emisiones contaminantes generadas por los vuelos para un año. Fuente: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2016.

A continuación, se describe en detalle el procedimiento de aplicación de cada uno de los niveles mencionados anteriormente.

2.2.1.1 Tier 1

El cálculo con Tier 1 se basa principalmente en los datos de consumo total de combustible del sector aeronáutico, diferenciado en vuelos domésticos e internacionales. Con el cálculo de las emisiones de contaminantes a partir de la siguiente ecuación:

$$E_i = \sum_m TA_m \cdot FE_i$$

Donde:

E_i = Emisión total anual del contaminante i para cada una de las fases LTO y CCD en vuelos domésticos e internacionales.

TA_m = Tasa de actividad por consumo de combustible m para cada una de las fase y tipos de vuelo.

FE_i = Factor de emisión del contaminante i para el correspondiente tipo de vuelo y fase de vuelo.

Esta metodología requiere la definición de factores de emisiones genéricos, donde se considera que todos los aviones poseen la misma tecnología de combustión. Aunque la EEA dispone información para cada modelo de avión disponible, se debe elegir un modelo representativo con el cual se seleccionaran los factores de emisión para realizar la estimación de contaminantes generados.

Donde el consumo de combustible correspondiente a cada uno de los ciclos de operación (CCD o LTO) se determina de las siguientes relaciones:

$$\text{Combustible Total Consumido} = \text{Combustible LTO} + \text{Combustible CCD}$$

$$\text{Combustible LTO} = \text{Numero de LTO} * \text{Consumo de Combustible LTO}$$

$$\text{Combustible CCD} = \text{Combustible Total Consumido} - \text{Combustible LTO}$$

En resumen, para obtener la estimación de contaminantes generados mediante la metodología de Tier 1, se debe obtener la información del total de combustible consumido por el sector aéreo para un año determinado, discriminando entre el consumo de combustible utilizado en la aviación doméstica e internación, se debe asociar este consumo a cada uno de los ciclos de operación del transporte, para finalmente, calcular las emisiones generadas dependientes del total de combustible consumido por cada ciclo, con el factor de emisiones del tipo de avión que se considere representativo de la flota del país.

2.2.1.2 Tier 2

La estimación de contaminantes generados mediante la metodología de Tier 2 requiere conocer los ciclos de aterrizaje y despegue para cada tipo específico de aeronave, considerando el mismo procedimiento que lo mencionado en la metodología Tier 1, esta se diferencia en que ya no se considera un factor de emisiones representativo, sino que se dispone de los datos de operación detallados por cada tipo de avión de la flota nacional.

Las emisiones de contaminantes se obtienen a partir de la siguiente ecuación:

$$E_i = \sum_m \sum_j TA_{m,j} \cdot FE_{i,j}$$

Donde:

E_i = Emisión total anual del contaminante i para cada una de las fases LTO y CCD para vuelos domésticos e internacionales.

$TA_{m,j}$ = Tasa de actividad por consumo de combustible m para cada una de las fase y tipos de vuelo, considerando un modelo específico de avión j para cada ciclo LTO

$FE_{i,j}$ = Factor de emisión del contaminante i para el correspondiente tipo de vuelo y fase de vuelo, considerando un modelo específico de avión j para cada ciclo LTO.

Así, el aporte de emisiones generadas por los ciclos domésticos e internacionales dependen directamente del combustible consumido, pero diferenciando los factores de emisión para cada modelo específico de avión, que

luego se deben sumar para obtener el total de contaminantes generados en el año seleccionado.

2.2.1.3 Tier 3

La metodología Tier 3 requiere para su desarrollo de información detallada respecto a los movimientos de cada vuelo, y se subdivide en dos métodos que se diferencian por los datos necesarios para su aplicación.

- La metodología **Tier 3.a** calcula los contaminantes considerando la distancia recorrida en los ciclos CCD para cada vuelo, obtenidos de la información del origen y destino tabulados en las bases de datos, tanto para uso doméstico como internacional.
- La metodología **Tier 3.b** utiliza como información de entrada las trayectorias, modelos específicos de motores y las diferentes alturas que se tienen en el vuelo, esto es procesado por softwares que calculan el consumo de combustible en base a esta información y consideran el rendimiento aerodinámico de cada avión.

Los pasos por seguir para utilizar la metodología Tier 3 se centran en recolectar la base de datos con los movimientos aéreos para el año correspondiente, con cada uno de los vuelos asociados a un modelo de avión específico, además de la información de origen/destino del vuelo y/o la distancia recorrida. Así, con el total de combustible consumido (o calculada por software) en cada vuelo se obtienen las emisiones generadas.

2.2.2 Metodología ACRP

El *Airport Cooperative Research Program* (ACRP) es otra organización que ha elaborado un procedimiento para realizar inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero en los aeropuertos, el cual se basa en la misma información utilizada por la European Environment Agency (EEA). Ambas metodologías son muy parecidas en los tres niveles (Tier) de cálculo definidos anteriormente, con la salvedad en el cálculo de emisiones referentes a aeronaves con motores tipo pistón, donde la EEA utiliza factores de emisión referenciales que no representan en detalle las distintas variantes presentes en esta categoría. Por esto, para el grupo de aeronaves con motores de pistón, se considera la metodología ACRP que incluyen un trabajo específico sobre los contaminantes generados por este tipo de tecnología, con pruebas donde se obtienen los factores de emisiones específicos por cada una de las fases de vuelo en conjunto con los flujos de combustible consumido.

Con esta nueva información es posible calcular con mayor detalle las emisiones provenientes de los aviones con motores tipo pistón, lo que complementa de mejor manera las emisiones totales generadas por el transporte aéreo en Chile.

El proceso de cálculo consiste en recolectar la base de datos de los movimientos aéreos para el año correspondiente con entidades que poseen este tipo de información. La información requerida corresponde a los detalles de cada uno de los vuelos asociados a un modelo de avión, en conjunto con los detalles de origen/destino del vuelo y/o la distancia recorrida. Con esta información y el modelo de motor de la aeronave, se identifica el flujo de combustible para así estimar las emisiones totales emitidas.

En comparativa, la metodología EEA indica como referencia emisiones generadas en vuelos reales para determinado modelo de avión, con muestras que se extraen de diferente distancia recorridas.

Tabla 1: Resumen de los factores de emisiones de la metodología EEA. Fuente: EMEP/EEA Air pollutant emission inventory guidebook 2016.

Modelo	Distancia [NM]	Combustible usado [kg]	CO ₂ [kg]	NO _x [kg]	CO [kg]	HC [kg]
A320	123	919	2895	17.28	2.98	0.61
A320	198	1342	4229	25.49	4.46	0.91
A320	248	1635	5150	29.94	4.98	1.03
A320	498	2934	9243	47.40	7.34	1.54
A320	747	4113	12955	61.96	9.76	2.07
A320	997	5261	16571	76.51	12.31	2.63
A320	1498	7756	24430	108.63	16.69	3.61

Por otro lado, la metodología ACRP utiliza factores de emisiones específicos para cada modelo de motor, los cuales están asociados al modelo del avión. Estos factores de emisiones son obtenidos mediante pruebas de campo de los distintos motores.

Tabla 2: Resumen de los factores de emisiones de la metodología ACRP.
Fuente: Fuente: Guidebook on Preparing Airport Greenhouse Gas Emissions Inventories, ACRP.

Modelo de Motor	Potencia [hp]	N° motores	Factor de emisiones (E _i)			Flujo de Combustible [kg/s]
			HC [g/kg]	CO [g/kg]	NO _x [g/kg]	
Rotax 912	100	1	71	795	7	0.002
O-200-A	100	1	38	491	16	0.006
O-320-E2D	150	1	36	422	21	0.009
O-320-H2AD	160	1	23	404	36	0.006
O-360-A1A	180	2	27	857	4	0.007
IO-360-L2A	160	1	40	405	29	0.007
IO-360-3B6D	200	1	25	25	54	0.004

2.2.3 Cálculo de factores de emisión

Para poder calcular un factor de emisiones por cada contaminante y que este represente la flota de aviones completa presente en Chile, primero es necesario obtener un factor de emisión para cada contaminante por cada modelo de avión. Como los factores de emisión disponibles se encuentran asociados a varios modelos de avión respecto diferentes distancias recorridas en los estudios realizados para su obtención, para obtener un solo factor de emisión fue necesario realizar un promedio de todos estos sets de datos.

Una vez obtenidos estos factores de emisión por modelo de avión es necesario complementar esta información con la información contenida en las tablas 16, 17, 18 y 19.

La tabla 18 aporta con los modelos de aviones y su capacidad de pasajeros, las tablas 16 y 17 contienen las proyecciones de flota para el periodo 2020-2050 en los escenarios optimista y pesimista respectivamente y la tabla 19 tiene la información de los factores de ocupación para el periodo 2020-2050.

Los factores de emisión que se definen representan de forma independiente el ciclo LTO y CCD de cada vuelo, estos dos se diferencian ya que el factor de emisión del ciclo LTO es un valor en [g] de contaminante y es un valor constante para cada modelo de avión, en cambio el factor de emisión del ciclo CCD es un factor de emisión en unidades de [g/km].

Para determinar un factor promedio general para los años 2020, 2030, 2040 y 2050 es necesario realizar un promedio de todos los factores de emisiones de cada modelo de avión multiplicado por su participación en la flota para un año

determinado, participación que está presente en las tablas 16 y 17 para escenarios optimista y pesimista.

$$FER_{LTO} = \sum FE_{LTO_{modelo}} * FP_{año,modelo}$$

$$FER_{CCD} = \sum FE_{CCD_{modelo}} * FP_{año,modelo}$$

Donde:

FE_{LTO} = factor de emisión del modelo de avión elegido.

FE_{CCD} = factor de emisión del modelo de avión elegido.

FER_{LTO} = factor de emisión representativo para un año específico para el ciclo LTO.

FER_{CCD} = factor de emisión representativo para un año específico para el ciclo CCD.

FP = factor de participación de flota para un año y modelo de avión específicos.

De esta manera es posible obtener los factores de emisiones generales para un año específico tanto para el ciclo LTO en [g] y otro para el ciclo CCD en [g/km].

Para obtener el factor de emisión por pasajero es necesario incluir la información de las tablas 18 y 19, donde primero hay que considerar una capacidad de pasajeros que sea representativa para la flota del año seleccionado, para esto hay que multiplicar la capacidad del modelo de avión por su participación de la flota y sumar los productos de cada uno de los modelos estudiados.

$$CPR = \sum CP_{modelo} * FP_{año,modelo}$$

Donde:

CPR = capacidad de pasajeros representativa.

CP = capacidad de pasajeros por modelo de avión.

FP = factor de participación de flota para un año y modelo de avión específicos.

Luego de obtener la capacidad representativa para ese año los factores de emisiones calculados anteriormente deben ser divididos por el producto entre el factor de ocupación y la capacidad representativa del año correspondiente, logrando así la obtención de los factores de emisión por pasajero para el ciclo LTO en [g/pax] y para el ciclo CCD en [g/pkm].

$$FE_{CCD} \text{ por pasajero} = \frac{FER_{CCD,año}}{CPR_{año} * FO_{año}}$$

$$FE_{LTO} \text{ por pasajero} = \frac{FER_{LTO,año}}{CPR_{año} * FO_{año}}$$

Donde:

FER_{LTO} = factor de emisión representativo para un año específico para el ciclo LTO.

FER_{CCD} = factor de emisión representativo para un año específico para el ciclo CCD.

FO = factor de ocupación para un año específico.

CPR = capacidad de pasajeros representativa para un año específico.

2.3 Transporte Marítimo

Esta metodología está basada en un reporte realizado por ENTEC UK Limited en conjunto con Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales de Reino Unido (DEFRA), el cual tiene como principal objetivo desarrollar una base de datos detallada la cual pueda ser utilizada a futuro para estimar las emisiones provenientes del modo marítimo del sector transporte en Reino Unido.

Como ejemplo, dentro de los resultados que desarrolla este reporte se encuentra un inventario de emisiones con su distribución espacial (figura 3), en una grilla de 5 km x 5 km de las aguas del Reino Unido.

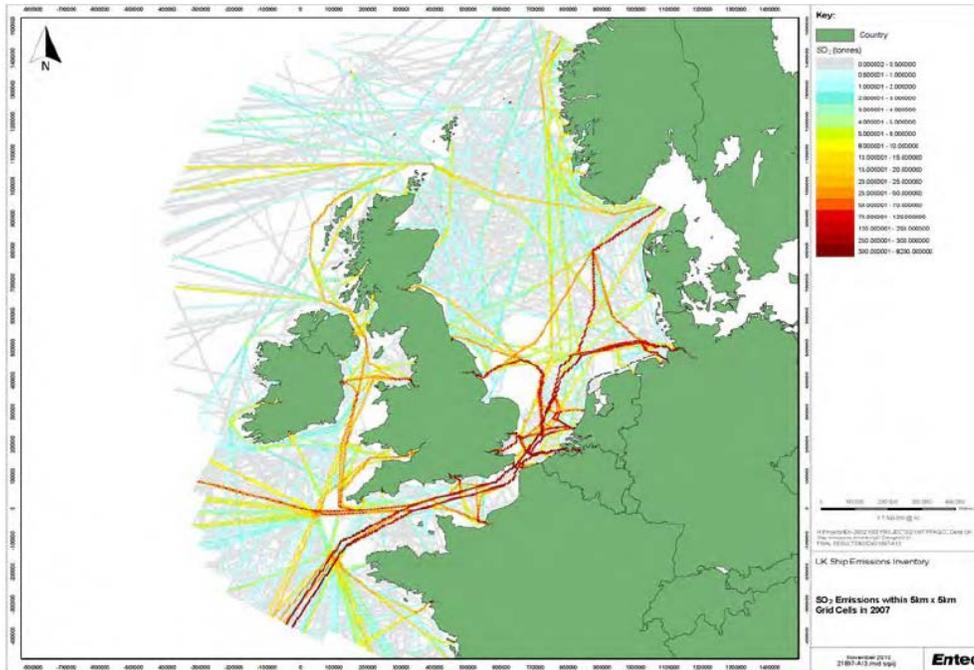


Figura 3: Distribución espacial de mediciones realizada por ENTEC UK Limited.
Fuente: Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community.

Esta metodología usa como información de entrada una base de datos a nivel nacional de todos los movimientos portuarios realizados en el territorio durante un año o periodo de interés, estos movimientos deben tener la información de que tipo de embarcación es la que realiza el movimiento.

La clasificación de las embarcaciones depende en primer lugar su envergadura, la cual se divide en tres categorías

- Menores a 5.000 [GT]
- Entre 5.000 – 25.000 [GT]
- Mayores a 25.000 [GT]

Donde **Gross Tons** [GT] corresponde a una medida de arqueado bruto, es decir: el sumatorio de volúmenes de todos los espacios cerrados del buque. Esto incluye espacios de carga, máquinas, habitación, pañoles, tanques.

Otras características que deben ser tomadas en cuenta acerca de las especificaciones de cada embarcación son:

- La potencia instalada de los motores
- Tipo de combustible que utilizan los motores

- La velocidad de operación y distancia recorrida (o el tiempo de viaje en océano)
- Tiempo de estancia en puerto
- Tecnologías de mitigación de emisiones instaladas

La estimación de emisiones generadas por las embarcaciones se separa entre las generadas en el mar, las cuales corresponden a los modos de operación “en océano” y “en maniobras”, y las emisiones que son generadas exclusivamente en puertos. También se deben considerar la procedencia de la nave, la cual puede ser doméstica o internacional.

2.3.1 Emisiones en modos océano y en maniobras

Para cada movimiento de una embarcación las emisiones generadas se calculan como sigue:

$$E_{mar} = \frac{D}{v} \cdot [(MP \cdot FC_{MP}) \cdot FE + (MA \cdot FC_{MA}) \cdot FE]$$

Donde:

E_{mar} = Emisiones totales generadas para el contaminante seleccionado.

D = Distancia recorrida por la embarcación entre puertos, en [km].

v = Velocidad promedio de la embarcación, en [km/h].

MP = Potencia instalada del motor principal, en [kW].

FC_{MP} = Factor de carga del motor principal.

FE = Factor de emisión del contaminante seleccionado asignado para cada embarcación dependiendo del tipo de combustible y la velocidad del motor en [g/kWh].

MA = Potencia instalada del motor auxiliar en [kW].

FC_{MA} = Factor de carga del motor auxiliar.

2.3.2 Emisiones en puerto

Para cada estancia de una embarcación en un puerto las emisiones generadas se calculan como sigue:

$$E_{puerto} = T \cdot [(MP \cdot FC_{MP}) \cdot FE + (MA \cdot FC_{MA}) \cdot FE]$$

Donde:

E_{puerto} = Emisiones totales generadas para el contaminante seleccionado.

T = Tiempo de estancia en puerto, en horas.

MP = Potencia instalada del motor principal en [kW].

FC_{MP} = Factor de carga del motor principal en [%].

FE = Factor de emisión del contaminante seleccionado asignado para cada embarcación dependiendo del tipo de combustible y la velocidad del motor en [g/kWh].

MA = Potencia instalada del motor auxiliar en [kW].

FC_{MA} = Factor de carga del motor auxiliar.

2.3.3 Factores de emisión

Para poder calcular un factor de emisión por cada contaminante estudiado que represente a la flota de barcos completa presente en Chile, primero es necesario obtener un factor de emisión para cada contaminante para cada tipo de barco, estos factores se complementan con la información contenida en las tablas 6, 7, 8, 9.

La tabla 8 aporta con los tipos de barcos con su respectiva capacidad de carga, las tablas 6 y 7 contienen las proyecciones de flota para el periodo 2020-2050 en los escenarios optimista y pesimista respectivamente y la tabla 9 tiene la información de los factores de ocupación para el periodo 2020-2050.

Los factores de emisión que se obtienen representan el modo océano y la suma de las maniobras con el modo en puerto, estos dos se diferencian ya que el factor de emisión de la suma entre puerto y maniobras es un valor en [g] de contaminante. En cambio, el factor de emisión del modo océano es un factor de emisión en unidades de [g/km].

Para determinar un factor promedio general para los años 2020, 2030, 2040 y 2050 es necesario realizar un promedio de todos los factores de emisiones de cada tipo de avión multiplicado por su participación en la flota para un año determinado, participación que está presente en las tablas 6 y 7 para escenarios optimista y pesimista.

$$FER_{oc\acute{e}ano} = \sum FEO_{modelo} * FP_{a\tilde{n}o,modelo}$$

$$FER_{puerto+maniobras} = \sum (FEP_{modelo} * FP_{a\tilde{n}o,modelo} + FEM_{modelo} * FP_{a\tilde{n}o,modelo})$$

Donde:

$FER_{oc\acute{e}ano}$ = factor de emisi3n representativo para la flota de un a\~no especifico en [g/km] para el modo oc\acute{e}ano.

FEO = factor de emisi3n del tipo de barco para el modo oc\acute{e}ano en [g/km].

$FER_{puerto + maniobras}$ = factor de emisi3n representativo para un a\~no espec\~fico en [g] para la suma de los modos puerto y maniobras.

FEP = factor de emisi3n del tipo de barco para el modo puerto en [g].

FEM = factor de emisi3n del tipo de barco para el modo maniobras en [g].

FP = factor de participaci3n de flota para un a\~no y tipo de barco espec\~ficos.

De esta manera es posible obtener los factores de emisiones generales para un a\~no especifico tanto para la suma de los modos puerto y maniobras en [g] y otro para el modo oc\acute{e}ano en [g/km].

Para obtener el factor de emisi3n por tonelada es necesario incluir la informaci3n de las tablas 8 y 9, donde primero hay que considerar una capacidad de carga que sea representativa para la flota del a\~no seleccionado, para esto hay que multiplicar la capacidad del tipo de barco por su participaci3n de la flota y sumar los productos de cada uno de los tipos de barco estudiados.

$$CCR = \sum CP_{modelo} * FP_{a\tilde{n}o,modelo}$$

Donde:

CCR = capacidad de carga representativa.

CC = capacidad de carga por tipo de barco.

FP = factor de participaci3n de flota para un a\~no y tipo de barco espec\~ficos.

Luego de obtener la capacidad representativa para ese a\~no los factores de emisiones calculados anteriormente deben ser divididos por el producto entre el factor de ocupaci3n y la capacidad representativa del a\~no correspondiente, logrando

así la obtención de los factores de emisión por tonelada para la suma de los modos puerto y maniobras en [g/ton] y para el modo océano en [g/tkm].

$$FE \text{ Océano} = \frac{FER_{\text{oceano,año}}}{CCR_{\text{año}} * FO_{\text{año}}}$$

$$FE \text{ Puerto + Maniobras} = \frac{FER_{\text{puerto+maniobras,año}}}{CCR_{\text{año}} * FO_{\text{año}}}$$

Donde:

FE_{oceano} = factor de emisión representativo para un año específico para el modo océano por tonelada en [g/tkm].

FER_{oceano} = factor de emisión representativo para la flota de un año específico en [g/km] para el modo océano. FO : factor de ocupación para un año específico.

CCR = capacidad de carga representativa.

FO = Factor de ocupación de carga.

$FE_{\text{puerto + maniobras}}$ = factor de emisión representativo para un año específico para la suma de los modos puerto y maniobras por tonelada en [g/ton].

$FER_{\text{puerto + maniobras}}$ = factor de emisión representativo para un año específico en [g] para la suma de los modos puerto y maniobras.

2.4 Ferrocarriles

Para la estimación de emisiones contaminantes producidas por el transporte en ferrocarril en Chile existe un cambio en la metodología a la presentada en el informe FASE 1. Este cambio se debe principalmente a que se considerará como fuente bibliográfica la metodología presentada por el banco de inversiones europeo (EIB) en conjunto a organización mundial de ferrocarriles (UIC). Esta metodología presenta valores de estimación más adecuados para el trabajo del presente proyecto.

La UIC utiliza estadísticas de todos los miembros que participan en la organización, con un amplio alcance global, como se muestra en la Figura 4.



Figura 4: Esquema representativo de miembros de la organización mundial de ferrocarriles. Fuente: UIC.

Los factores de emisión para esta metodología se obtienen de forma directa y están definidos para un modelo estándar de locomotora, que representa la mayoría de los modelos presentes en la organización, diferenciadas para el transporte de carga y de pasajeros. El resumen de estos de estos factores se presenta en la Tabla 4 y Tabla 5.

Tabla 4: Factores de emisión para locomotoras de pasajeros. Fuente: EIB.

Ferrocarril de pasajeros	Promedio de ocupación	Energía específica [MJ/pkm]	Emisiones [g/pkm]	Contaminante
Eléctrico	35%	0,31	30,1	CO ₂
Diésel	24%	1,09	76,9	CO ₂
			0,24	HC
			2,87	NO _x
			0,08	PM

Tabla 5: Factores de emisión para locomotoras de carga. Fuente: EIB.

Ferrocarril de carga	Promedio de ocupación	Energía específica [MJ/tkm]	Emisiones [g/tkm]	Contaminante
Eléctrico	52%	0,116	11,2	CO ₂
Diésel	52%	0,313	22,2	CO ₂
			0,07	HC
			0,82	NO _x
			0,02	PM

La selección de esta metodología responde a la necesidad de definir un factor de emisión respecto a la carga y pasajeros transportados, coherentes con los modelos de estimación para la proyección de infraestructura realizados por la empresa consultora.

2.5 Emisiones por generación eléctrica

Ninguna de las metodologías presentadas anteriormente considera las emisiones producidas por la generación eléctrica que satisface las demandas de energía de la proporción de cada modo de transporte que utiliza esta tecnología.

Por lo que se consideran las emisiones indirectas según las proyecciones resumidas en el siguiente gráfico:

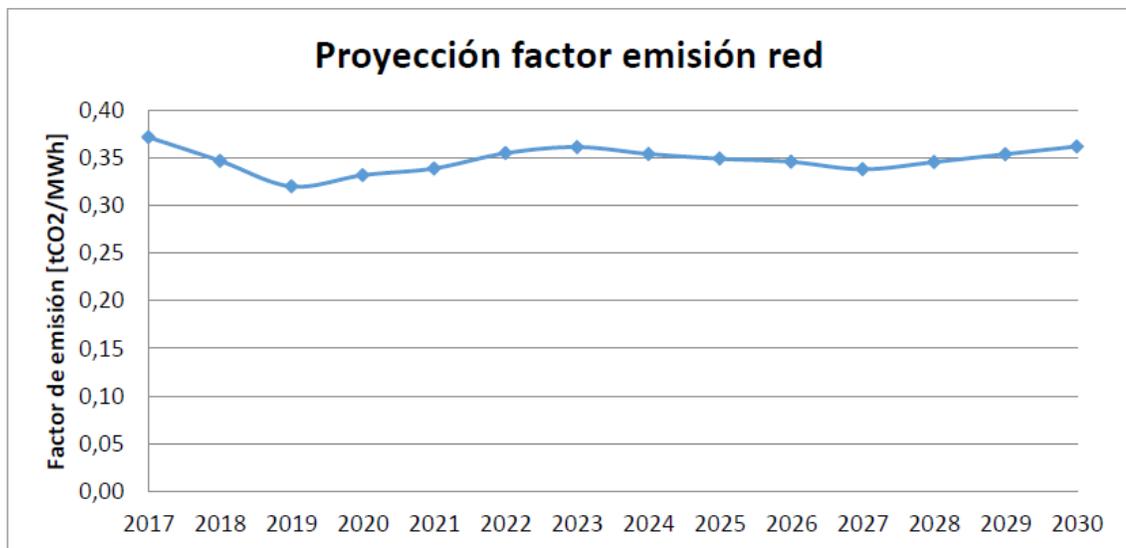


Figura 5: Proyección factor de emisión CO₂ red de distribución eléctrica. Fuente: Generadoras de Chile.

Esta proyección proviene del informe “Actualización de la proyección de emisiones 2017- 2030 y análisis medidas de mitigación de CO2 equivalente”, elaborado para la asociación de generadoras de Chile.

Así, para cada modo de transporte donde se considere el uso de electricidad como fuente motriz, se utilizará el factor de 0,35 [tCO₂/MWh], que dependiente de tipo de vehículo y su subcategoría, otorgara un factor de emisión de contaminantes equivalente.

2.6 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.
- **Transporte Aéreo:** Para la estimación de emisiones del transporte aéreo se utiliza la metodología facilitada por la EEA, 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 analizaran 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 Limited en conjunto con el documento de SMED 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 organización mundial de ferrocarriles (UIC). Dada la necesidad de definir un factor de emisión respecto a la carga y pasajeros transportados, coherentes con los modelos de estimación para la proyección de infraestructura realizados por la empresa consultora.

3 Escenarios Tecnológico / Normativos

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 conformará el denominado Plan Nacional de Infraestructura para la Movilidad 2020-2050 (PNIM 2050).

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. Desde este punto de vista se ha establecido que se contará con un mínimo de cinco alternativas de Plan.

Para cada uno de los cinco planes se deben proponer dos escenarios que incluyan medidas de carácter tecnológico y/o regulatorio (E1 y E2), que impacten en las emisiones y movilidad (ej.: incorporación de la electromovilidad, implementación de normas, cumplimientos de compromisos internacionales, etc.). Estos escenarios deberán definirse en común acuerdo con la contraparte ministerial.

Este estudio deberá analizar los dos escenarios previamente definidos (E1 y E2), estimando las emisiones, efectuando comparaciones entre éstos y el Plan respectivo (E1 vs Plan A, E2 vs Plan A).

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

3.1 Transporte Vial

Para la proyección de contaminantes terrestres de vehículos en ruta se consideran dos elementos relevantes para el análisis:

- **Tendencias normativas:** incorporación de estándares de emisión más estrictos, en particular la norma EURO 6 para vehículos livianos y EURO VI para vehículos pesados.

- **Tendencias tecnológicas:** introducción de vehículos eléctricos a la flota nacional, tanto para transporte público como privado, de pasajeros y carga.

La incorporación y penetración de la norma EURO 6 en Chile está considerada como decreto ley para implementación 24 meses después de ser aprobada, lo cual está programado para discusión y aprobación el año 2019. De acuerdo con esto, se plantean dos posibilidades: caso optimista sería incorporar EURO 6 lo más tempranamente el 2023 y en un caso pesimista el 2030.

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 de la USEPA. Debido a la naturaleza de estos procedimientos, la estimación más optimista será establecer la incorporación de la EURO 6 o su equivalente en Chile para el año 2023. Luego, de manera estimativa, se considera que el trámite de la norma se demore tres años más, incorporándose definitivamente el año 2030, siendo este el caso más pesimista.

De manera paralela, 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 y la Estrategia de Electromovilidad, 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 electrolinerías 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 casos para la penetración de electromovilidad en vehículos privados. El caso optimista considera que para el año 2050 se tendrá un 50% de vehículos privados eléctricos, el caso pesimista asume un 30% de vehículos privados eléctricos para el 2050.

La propuesta optimista se encuentra respaldada por la proyección de BNEF en su reporte del 2019, 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 nuestra posición 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%).

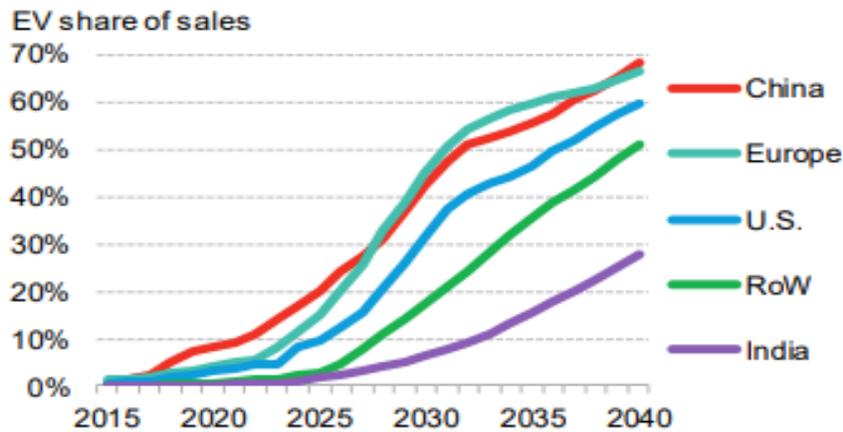


Figura 6: Proporción de uso de electromovilidad en transporte de pasajeros, por región. Fuente: Kang 1996.

El crecimiento de los vehículos eléctricos responde a un comportamiento de tecnologías disruptivas, por lo que en términos de demanda se comporta como una Curva S, donde el comienzo de esta se puede tratar como un crecimiento exponencial (Kang1996).

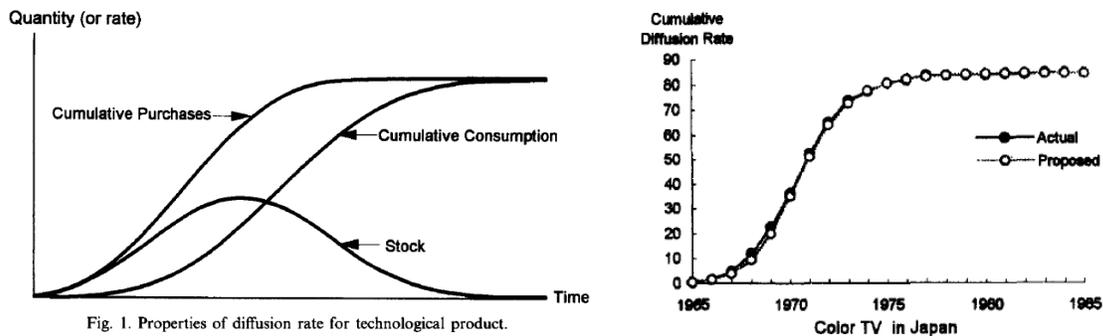


Figura 7: Representación de crecimiento de tecnologías disruptivas. Fuente: Kang 1996.

Por lo que en ambos escenarios el crecimiento será exponencial de tal manera que se cumplan los valores pronosticados.

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 preliminar desarrollada por el gobierno en las *Nationally Determined Contribution* (NDC) para la componente mitigación, se considera como medida 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. Según se indica en la Figura 8, esta medida ofrece un buen valor en el indicador de costo-eficiencia (barra etiquetada “Transporte de carga”, al centro del gráfico). Sin embargo, depende fuertemente de avances tecnológicos, formación de capital humano y de 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: pesimista con 10% al año 2050 y optimista con 50% al año 2050. Las emisiones asociadas a la generación eléctrica para producir hidrógeno se asumen nulas, asumiendo que se utilizará “hidrógeno verde”, es decir a través de un proceso de electrólisis con electricidad proveniente exclusivamente de fuentes renovables.

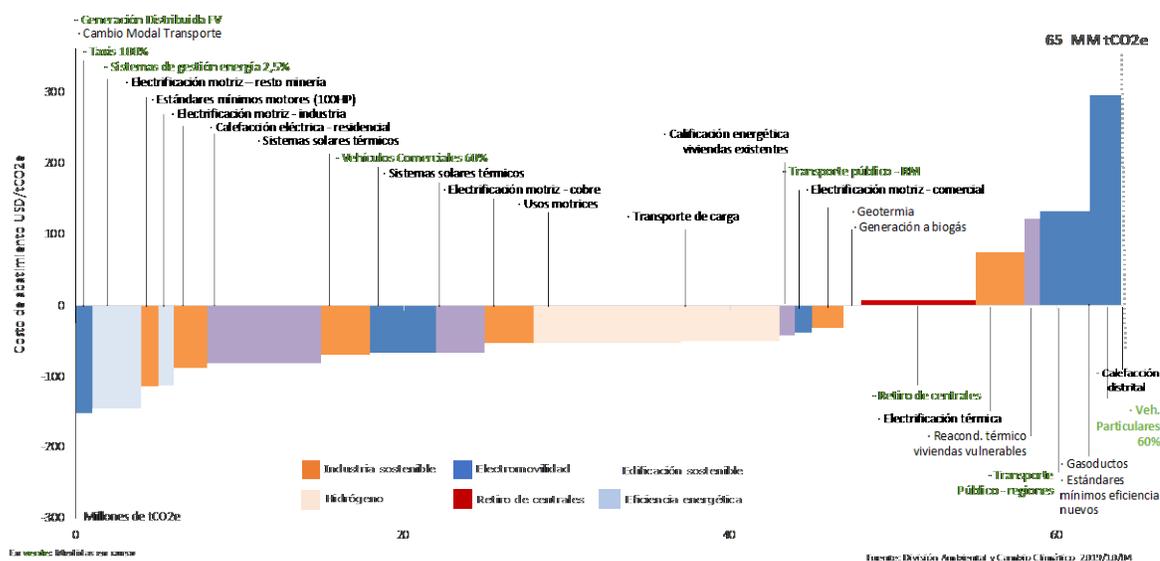


Figura 8: Análisis costo-efectividad de medidas contempladas en NDC Chile

De esta manera, los casos propuestos para transporte terrestre en ruta serán los dos siguientes:

- **Optimista:** 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.

En adición se considera un 50% de camiones pesados a hidrógeno para el 2050.

- **Pesimista:** 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. En adición se considera un 10% de camiones pesados a hidrógeno para el 2050.

De manera secundaria se considera, para ambos escenarios, la completa eliminación de vehículos no catalíticos para el año 2022.

3.2 Transporte Marítimo

En el caso del transporte marítimo también existen cambios normativos y tecnológicos a considerar. 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 (IMO) establece que el límite mundial de azufre para el bunkering descenderá de 3.5% a 0.5% a comienzos de 2020, 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.

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.

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.

Se considerarán dos casos, en relación con el cumplimiento de esta normativa, para las embarcaciones que naveguen en aguas chilenas. Un caso optimista de adopción el año 2020 y un caso pesimista, con adopción tardía al año 2023.

En relación con cambios tecnológicos, el horizonte es más incierto y con pocas opciones en el corto y mediano plazo. Maersk, la compañía de containers 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.

Una de las opciones con mayor potencial de desarrollo en este sector es la utilización de gas natural licuado (GNL) como combustible, especialmente para barcos utilizados para transporte de GNL. La flota de embarcaciones navieras propulsadas con GNL actualmente en operación se estima en 118 al 2017, creciendo a 143 el año 2018, además de 135 en construcción. No se vislumbra un desplazamiento importante del combustible fósil actual en el horizonte 2050, por lo que no se sugieren cambios tecnológicos relevantes en el rubro transporte marítimo para Chile en este sentido.

A más largo plazo se vislumbra la posibilidad de utilizar celdas de combustible con hidrógeno para energizar estas embarcaciones. Sin embargo, esta tecnología no debiese tener un impacto notorio en el horizonte 2050 para el caso de Chile.

3.2.1 Antecedentes para la estimación de flota 2020-2050

Para realizar las proyecciones de los escenarios optimista y pesimista se consideran tres variables.

- 1- Se considera que las flotas de barcos presentes en Chile irán aumentando su capacidad de transporte incorporando más embarcaciones que tengan una mayor capacidad de carga. Para el escenario optimista se considerará una velocidad de incorporación de barcos con mayor capacidad más alta y de igual forma con los barcos con menor capacidad de carga que irán retrocediendo en cuanto a participación de flota a un ritmo acelerado. Para el caso pesimista se seguirá considerando un aumento en la capacidad de carga de la flota, pero las incorporaciones de embarcaciones más grandes no serán tan rápidas como en el escenario optimista, al igual que el número de embarcaciones con poca capacidad de carga se irán retirando más paulatinamente.
- 2- El segundo punto contempla la incorporación de un buque de carga equipado con hidrógeno como fuente de alimentación. Se considera que este tipo de barco tendrá una capacidad de 200.000 [ton] y se encuentra en el grupo de barcos que tienen una mayor capacidad de carga. Para variar los escenarios pesimista y optimista, la velocidad de incorporación de este tipo de barcos en la flota se regirá de igual forma que en el punto 1.
- 3- La tercera variable que se considera para crear los escenarios optimista y pesimista es la incorporación de un factor de ocupación de las embarcaciones. Para el caso optimista el factor de ocupación irá aumentando con el tiempo y para el caso pesimista este factor irá bajando su valor en el período 2020-2050.

3.2.2 Estimación de la participación de la flota presente en Chile por modelo de Barco

En base a los puntos 1 y 2 antes mencionados se realiza una proyección de la participación de los tipos de barcos en las flotas de barcos del periodo 2020-2050, para los escenarios optimista y pesimista.

Tabla 6: Escenario optimista de la flota marítima presente en Chile para los años 2020-2050.

Tipo de Nave [%]	2020	2030	2040	2050
GRANELERO	7	10	12	13
GASERO	0,5	3	4	7
PETROLERO	8,5	10	12	14
CARGA GENERAL HIDROGENO	0	3	5	7
CARGA GENERAL	17	16	15	13
PORTACONTENEDOR	8,5	8	7	5
CARGA REFRIGERADA	5	6	6,5	8
PASAJE CABOTAJE	2,5	2	1,5	1
CARGA RODADA	1,5	1	1	1
PASAJE DE TRANSBORDO RODADO	7	7	7	7
WELLBOAT	11	10	9	8
TANQUE QUIMQUERO	2	2	2	2
PASAJE	1	1	1	1
PESQUERO DE ARRASTRE	3,5	2	1	1
PESQUERO DE CERCO	9	8	8	7
REMOLCADOR DE ALTAMAR	9	6	5	3
TRANSBORDADOR	7	5	3	2

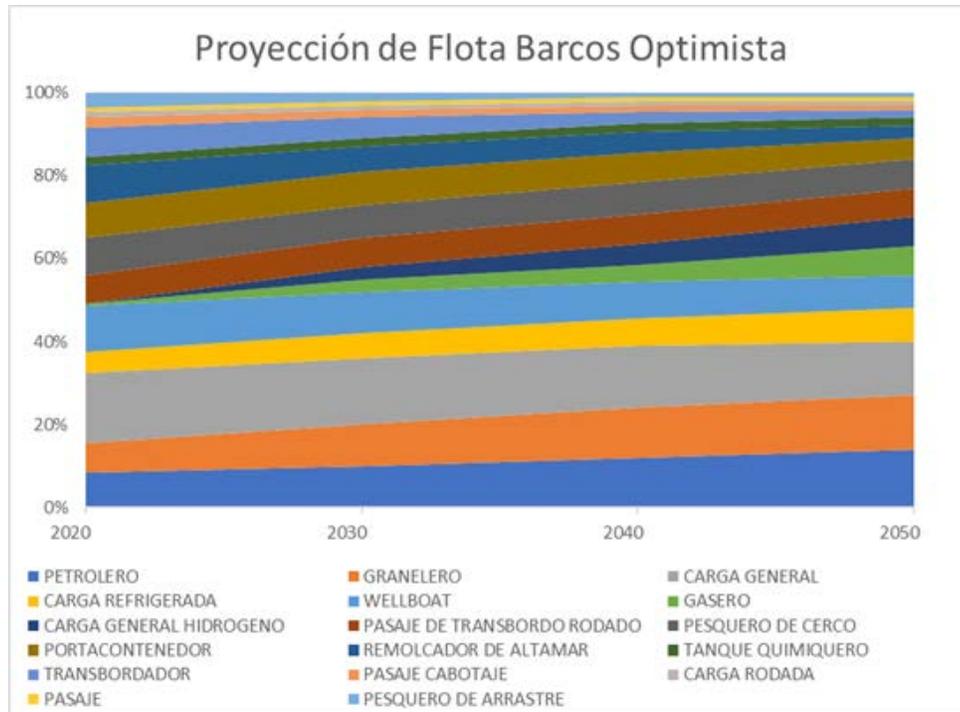


Figura 9: Escenario Optimista de la flota marítima presente en Chile para los años 2020-2050.

Tabla 7: Escenario pesimista de la flota marítima presente en Chile para los años 2020-2050.

Tipo de Nave	2020 [%]	2030 [%]	2040 [%]	2050 [%]
PETROLERO	8,5	10	12	14
GRANELERO	7	10	12	13
CARGA GENERAL	17	16	15	13
CARGA REFRIGERADA	5	6	6,5	8
WELLBOAT	11	10	9	8
GASERO	0,5	3	4	7
CARGA GENERAL HIDROGENO	0	3	5	7
PASAJE DE TRANSBORDO RODADO	7	7	7	7
PESQUERO DE CERCO	9	8	8	7

PORTACONTENEDOR	8,5	8	7	5
REMOLCADOR DE ALTAMAR	9	6	5	3
TANQUE QUIMIQUERO	2	2	2	2
TRANSBORDADOR	7	5	3	2
PASAJE CABOTAJE	2,5	2	1,5	1
CARGA RODADA	1,5	1	1	1
PASAJE	1	1	1	1
PESQUERO DE ARRASTRE	3,5	2	1	1

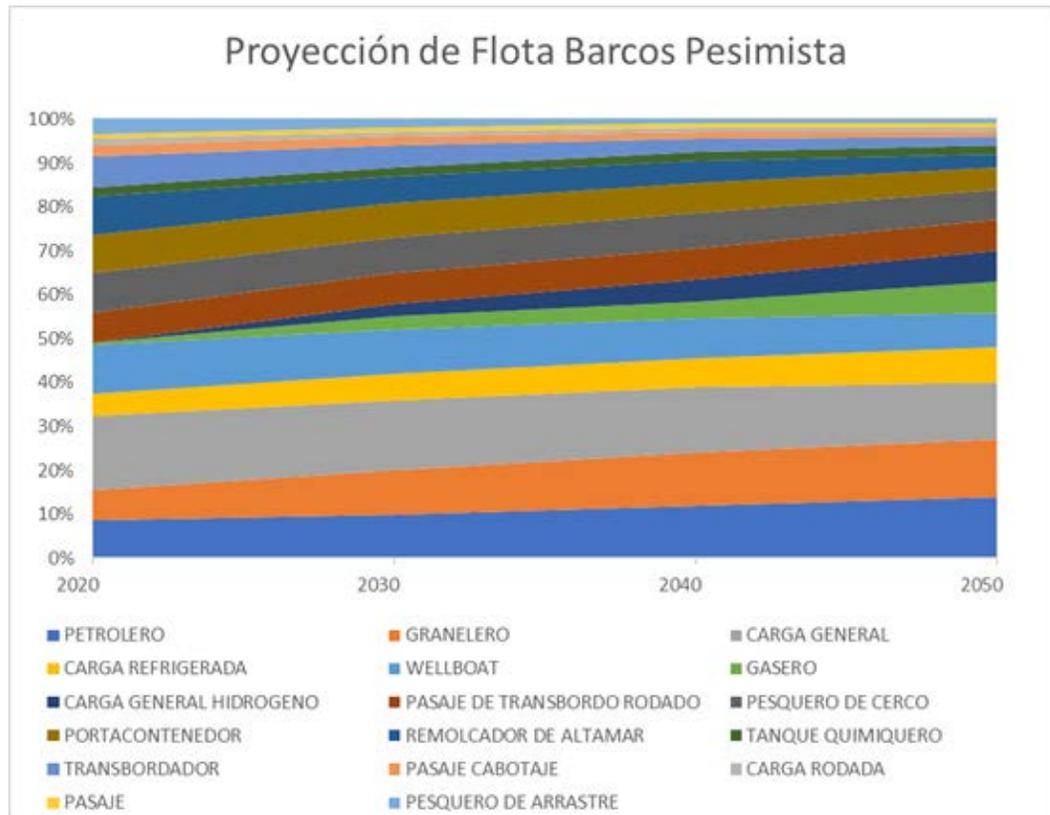


Figura 10: Escenario pesimista de la flota marítima presente en Chile para los años 2020-2050.

3.2.3 Análisis de factor de emisión por tonelada

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.

La capacidad de carga con la que cuenta cada uno de los tipos de barcos estudiados en las proyecciones de flota en el periodo 2020-2050 se puede revisar en la tabla 9.

Tabla 8: Capacidad de carga por tipo de barco.

Tipo de Nave	Capacidad de Carga [ton]
GRANELERO	400.000
GASERO	300.000
PETROLERO	300.000
CARGA GENERAL HIDROGENO	250.000
CARGA GENERAL	200.000
PORTACONTENEDOR	200.000
CARGA REFRIGERADA	150.000
PASAJE CABOTAJE	50.000
CARGA RODADA	30.000
PASAJE DE TRANSBORDO RODADO	30.000
WELLBOAT	25.000
TANQUE QUIMQUERO	15.000
PASAJE	0
PESQUERO DE ARRASTRE	0
PESQUERO DE CERCO	0
REMOLCADOR DE ALTAMAR	0
TRANSBORDADOR	0

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

Tabla 9: Resumen de los factores de ocupación estimados para el periodo 2020-2050 para el escenario optimista y el pesimista.

Año	Optimista	Pesimista
2020	0,8	0,8
2030	0,86	0,81
2040	0,9	0,82
2050	0,93	0,84

3.3 Transporte Aéreo

Para poder estimar de forma correcta la participación de los modelos más representativos de la flota presente en el mercado aeronáutico de nuestro país, es necesario tener en consideración algunos antecedentes. Para este estudio se considerada dos fuentes principales, las cuales serán revisadas a continuación.

3.3.1 Antecedentes basados en bitácoras de vuelo del periodo 2013-2018

Una de las formas para poder respaldar las proyecciones de participación de los distintos modelos en las flotas para los años 2030-2050 es realizar un análisis a los movimientos aeronáuticos de rutas comerciales, para lo cual se utilizan bitácoras de vuelos de los años 2013 al 2018, con lo cual se puede obtener una imagen de lo que sucedió años anteriores, y en base a esa información ver las variaciones de participación por cada modelo año a año lo que permitiría realizar una proyección basada en las tendencias de crecimiento y disminución de la contribución a la flota de cada modelo.

Tabla 10: Resumen de la participación de los modelos más representativos de la flota aeronáutica presente en Chile para los años 2013-2018.

Modelo	Participación 2013 [%]	Participación 2014 [%]	Participación 2015 [%]	Participación 2016 [%]	Participación 2017 [%]	Participación 2018 [%]
A320	55,7	57,2	53,4	40,7	36,4	42,8
A321	0,3	0,5	8,3	19,4	22,1	23,5

A319	24,3	28,1	23,4	23,6	23,2	21,9
B787	0,4	1,2	3,8	5,5	6,4	5,1
B767	6,8	5,8	4,3	3,1	1,7	2,1
B777	1,3	1,5	2,0	1,8	1,7	1,9
B737	7,6	4,0	3,4	4,4	7,3	1,0
B747	0,6	0,5	0,7	0,8	0,7	0,7
A333	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,4
A346	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,4
A332	0,4	0,3	0,1	0,3	0,1	0,2
A343	0,5	0,4	0,2	0,0	0,0	0,0
A350	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
A318	1,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Realizando un análisis a la Tabla 10 que presenta en forma resumida la participación año a año de la flota aeronáutica presente en nuestro país se obtienen las siguientes conclusiones respecto a cada uno de los modelos presentados en la tabla 1.

A320: Este modelo de avión es el que presenta mayor participación, la cual cae en 13% desde el año 2013 hasta el 2018. Si bien es una gran caída de participación, sigue estando en el primer lugar siendo el modelo que más aporta en participación durante este periodo de 6 años.

A321: Para el modelo A321 se observa un incremento explosivo pasando de tan solo un 0,3% en el año 2013 a un 23,5% en el año 2018.

A319: Se puede observar que para este modelo existe una tendencia a la baja disminuyendo en un 2,4 % su participación. A pesar de ir a la baja es el segundo modelo que más contribuye con la participación durante estos 6 años, siendo superado sólo el año 2018 por el modelo A321.

B787: Este modelo durante los últimos 6 años ha tenido un aumento de participación de alrededor del 5% lo que indica que aviones de estas características están siendo más atractivos para el mercado aeronáutico chileno.

B767: Se puede notar a simple vista que este tipo de aviones se está retirando de la flota presente en el mercado aeronáutico nacional llegando a un 2,1% Luego de una baja de 4,7% en los últimos 6 años.

B777: Este modelo se ha mantenido prácticamente invariante en cuanto a la participación de la flota habiendo variado tan solo un 0.6% los últimos 6 años.

B757: Se puede ver en términos generales que la participación de este modelo de avión está decreciendo, llegando al año 2018 con una participación del 1%.

Cabe notar una extraña variación en el año 2017 donde hubo un alza del 3% para luego desplomarse con una caída de 6%.

B747: Este modelo se ha mantenido prácticamente estático registrando una variación de solo 0.1% los últimos 6 años.

A333: Este modelo se ha mantenido prácticamente estático registrando una variación de solo 0.3% los últimos 6 años.

A346: Se mantiene estático durante el periodo 2013-2018 y cuenta con una participación muy baja del orden del 0,3%.

A332: Durante los últimos 6 años no ha variado mas de un 0,2%. Este modelo representa una porción muy baja de la flota.

A343: Se puede observar que desde el año 2013 al 2015 fue tendiendo a la baja hasta llegar a 0% de participación desde el año 2016.

A318: El año 2013 tiene una leve participación del 1,7% la cual desaparece por completo desde el año 2014, desde entonces se ha mantenido en 0% de participación.

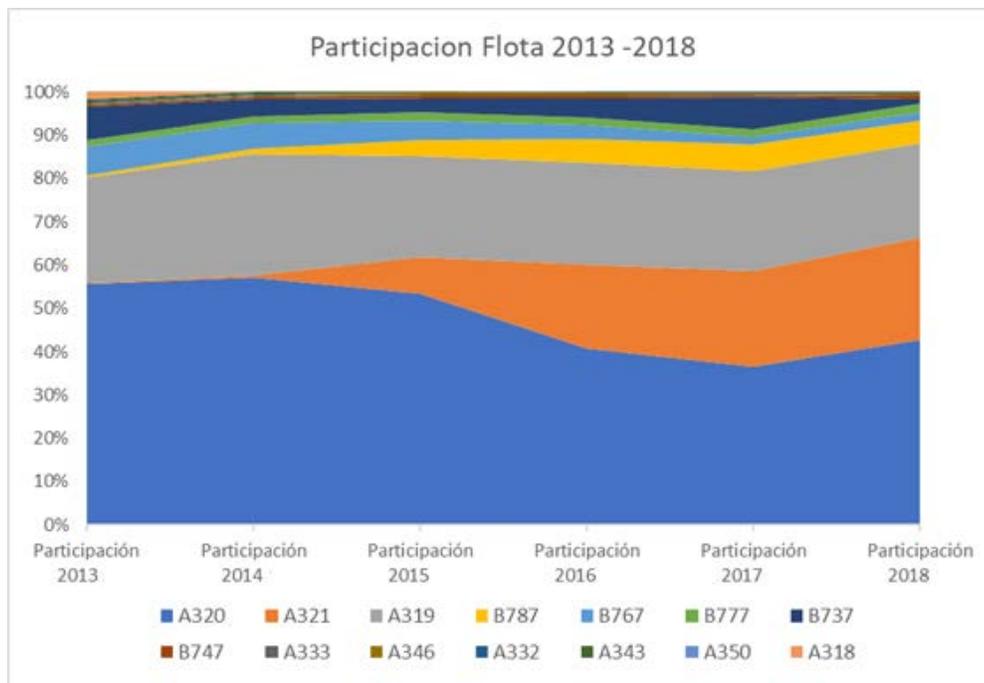


Figura 11: Participación de cada modelo de avión en las flotas del periodo 2013-2018.

En la figura 11 se puede apreciar cómo va variando la participación de los diferentes modelos de aviones representativos a lo largo del periodo 2013-2018,

donde se pueden ver claramente algunas tendencias de crecimiento y disminución en el aporte realizado por acá modelo de avión.

3.3.2 Antecedentes basados en órdenes de compras de los fabricantes de aviones

Una fuente de información clave para poder proyectar la demanda de cada modelo de avión para el periodo 2020-2050, es conocer las estadísticas que entregan los propios fabricantes de aeronaves, 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.

En el caso de Airbus, la compañía en su página web presenta sus resultados en cuatro columnas donde una corresponde a el modelo de la aeronave y los otros tres corresponden a el número de órdenes de compra solicitados, numero de entregas realizadas y la estadística de cuantas aeronaves de ese modelo se encuentran en operación.

En este caso se presentan tres tablas, una que representa un consolidado a nivel global, otra que representa la región de Latinoamérica y el Caribe y la última que es específica de nuestro país, considerando las aerolíneas nacionales.

La primera corresponde a la tabla 11, que muestra las estadísticas a nivel global. En esta tabla podemos observar a primera vista que hay dos modelos que están entrando con fuerza en el mercado aeronáutico internacional el A320Neo y el A321Neo, con ordenes pendientes de cerca de 4000 y 2000 respectivamente, siendo estos dos modelos los más significativos en aumento de participación en los próximos años.

Otros modelos de aviones que también tienen órdenes de compra pendientes de entregas son el A320XLR, con cerca de 200 órdenes pendientes, A319Neo con 33 órdenes pendientes, A321XLR con cerca de 150 órdenes pendientes, A330-200 con 40 órdenes pendientes, A330-300 con 50 órdenes pendientes, A330-900 con 214 órdenes pendientes, A350-900 con cerca de 500 órdenes pendientes, A350-1000 con 169 órdenes pendientes y finalmente A380 con cerca de 100 órdenes pendientes.

Con respecto al resto de los modelos hay un grupo que no tiene ordenes pendientes y, además, el número de entregas es mayor que el número de aviones operando de ese modelo, por lo estarían retirándose del mercado, en este grupo encontramos los modelos A318, A300, A310 y A340-200/300.

Y finalmente, el resto de los modelos presentan pequeñas variaciones entre números de orden y entregas y entre entregas y en operación, por lo que se consideraran prácticamente estáticos, en este grupo se encuentran los modelos A330-200F y A340-500/600.

Tabla 11: Estadísticas a nivel global de Airbus por modelo de avión.

Global			
Modelo	Ordenes	Entregas	En Operación
A318	80	80	67
A319ceo	1484	1467	1446
A319neo	33	-	-
A320ceo	4763	4567	4270
A320neo	4042	229	229
A321ceo	1798	1616	1598
A321neo	1920	20	20
A300	561	561	239
A310	255	255	83
A330-200	659	619	608
A330-200F	42	38	38
A330-300	786	733	712
A330-800	6	-	-
A330-900	214	-	-
A340-200/300	246	246	146
A340-500/600	131	131	130
A350-800	8	-	-
A350-900	677	142	142
A350-1000	169	-	-
A380	317	222	222

La segunda tabla que se analiza (tabla 12) es la que corresponde a nivel regional, que incluye a toda Latinoamérica y el Caribe.

Lo que a primera vista se puede observar es que, a nivel regional, varios de los modelos ofrecidos por la empresa Airbus no tienen órdenes pendientes ni aviones en operación como son el A330-300, A330-800, A330-900, A340-500/600, A350-800 y el A380.

Al igual que a nivel global, los dos modelos que encabezan la lista de órdenes pendientes son los modelos A320Neo y A321Neo, con cerca de 400 y 90 órdenes pendientes respectivamente.

El resto de los modelos que presentan órdenes pendientes son el A319Neo con 20 órdenes, A320Ceo con 5 órdenes, A350-900 con 18 órdenes y el A350-1000 con 12 órdenes pendientes.

Finalmente, los modelos que no registran ordenes pendientes son el A318, A319Ceo, A321Ceo, A300, A310, A330-200, A330-200F y A340-200/300.

Como nota se puede observar que en algunos casos hay modelos que tienen mayor número de aviones en operación que órdenes de compra realizadas, esto se debe a que existe un mercado de aviones de segunda mano lo que genera la adquisición de estos modelos sin tener una orden de compra al fabricante.

Tabla 12: Estadísticas a nivel regional de Airbus por modelo de avión.

Latinoamérica y Caribe			
Modelo	Ordenes	Deliveries	In Operation
A318	15	15	20
A319ceo	96	96	117
A319neo	20	-	-
A320ceo	353	348	358
A320neo	430	9	37
A321ceo	65	64	74
A321neo	94	2	3
A300	9	9	10
A310	4	4	-
A330-200	35	35	29
A330-200F	7	6	6
A330-300	-	-	-
A330-800	-	-	-
A330-900	-	-	-
A340-200/300	4	4	9
A340-500/600	-	-	-
A350-800	-	-	-
A350-900	25	7	5
A350-1000	12	-	-
A380	-	-	-

Finalmente, la tercera y última tabla que se revisa por parte de este fabricante corresponde al detalle de las órdenes, entregas y aviones en operación a nivel

nacional, donde encontramos a los tres operadores de origen chileno Jetsmart, Latam Airlines y Sky Airlines.

En la tabla 13 se omitieron algunos modelos los cuales no tienen participación ni de órdenes pendientes, ni de entregas realizadas ni de aviones en operación, así que en comparación con las dos tablas anteriores si el modelo no aparece es porque no participa en las flotas de las aerolíneas nacionales.

Como se veía la tendencia a nivel global y regional los modelos A320Neo y 321Neo siguen en el liderato de ordenes pendientes de entrega con 82 y 33 órdenes por entregar.

Los otros modelos de aviones que presentan ordenes pendientes de entrega son el A350-900 y el A350-1000 con 8 y 12 órdenes por entregar.

Los modelos A319Ceo, A320Ceo y A321Ceo no presentan ordenes pendientes, pero están la mayoría operativos, mientras que los modelos A318 y A340-200/300 no tienen órdenes pendientes y ya no se encuentran en operación en las flotas nacionales.

Tabla 13: Estadísticas a nivel nacional de Airbus por modelo de avión y aerolínea.

Chile				
Modelo	Tipo	JETSMART	LATAM AIRLINES GROUP	SKY AIRLINE
A318	Ord	-	15	-
	Del	-	15	-
	Opr	-	-	-
A319ceo	Ord	-	26	-
	Del	-	26	-
	Opr	-	24	13
A320ceo	Ord	-	68	-
	Del	-	68	-
	Opr	5	67	2
A320neo	Ord	56	36	-
	Del	-	4	-
	Opr	-	2	-
A321ceo	Ord	-	39	-
	Del	-	38	-
	Opr	-	16	-
A321neo	Ord	14	19	-

	Del	-	-	-
	Opr	-	-	-
A340-200/300	Ord	-	4	-
	Del	-	4	-
	Opr	-	-	-
A350-900	Ord	-	15	-
	Del	-	7	-
	Opr	-	-	-
A350-1000	Ord	-	12	-
	Del	-	-	-
	Opr	-	-	-
TOTAL	Ord	70	234	-
	Del		162	-
	Opr	5	109	15

Continuando el análisis, ahora pasamos a revisar las estadísticas del otro fabricante de aviones que tiene presencia en el mercado aeronáutico chileno, la empresa Boeing.

En la tabla 14 se pueden observar las estadísticas a nivel regional, donde para prácticamente todos los modelos no hay entregas pendientes, excepto por los modelos 737, 777 y 787 que tienen órdenes pendientes de entrega de 138, 2 y 10 respectivamente.

Tabla 14: Estadísticas a nivel regional de Boeing por modelo de avión.

Sudamérica			
Modelo	Orders	Deliveries	Unfilled
707	22	22	-
727	39	39	-
737	335	197	138
747	13	13	-
767	57	57	-
777	14	12	2
787	42	32	10
DC-8	6	6	-
DC-9	12	12	-

DC-10	13	13	-
MD-11	8	8	-
MD-80	14	14	-
South America - Total	575	425	150

Para el caso del mercado aeronáutico nacional se puede ver, en la tabla 15, que el único modelo que tiene ordenes pendientes de entrega corresponde al 787 con 8 a la espera de ser entregados.

Tabla 15: Estadísticas a nivel nacional de Boeing por modelo de avión.

Chile			
Modelo	Orders	Deliveries	Unfilled
707	1	1	-
727	4	4	-
737	5	5	-
767	42	42	-
777	2	2	-
787	26	18	8
Total	80	72	8

3.3.3 Estimación de la participación de la flota presente en Chile por modelo de avión

En base a la información mostrada anteriormente se estiman las participaciones de los modelos de avión más representativos para el periodo 2020-2050 para dos escenarios uno optimista y otro pesimista.

La diferencia entre el caso optimista y el pesimista recae en la velocidad en que se produciría un recambio de la flota, para el caso optimista se prevé un recambio acelerado incorporándose mucho más rápido los modelos A320Neo y A321Neo, de igual forma pasa con los modelos A320 y A319 quienes bajan su participación año a año de forma más agresiva respecto al caso pesimista, el cual es más conservador a la hora de plantear un recambio en la flota donde el aumento y disminución porcentual para los modelos de la flota es más leve.

Tabla 16: Escenario Optimista de la flota aérea presente en Chile para los años 2020-2050.

Vuelos 2015	2020 [%]	2030 [%]	2040 [%]	2050 [%]
A320neo	5	12	18	25
A321neo	1	7	13	17
A320	37	29	20	12
A319	22	15	12	9
A319neo	1	4	7	8
A321	22,3	17,6	11,5	7,3
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
B744	0,7	1	1,5	1,7
A380	0	0,5	1	1,5
A346	0,4	0,3	0,3	0,3
B737	1	0,5	0,2	0,1
A333	0,4	0,2	0,1	0
A332	0,2	0,1	0,1	0

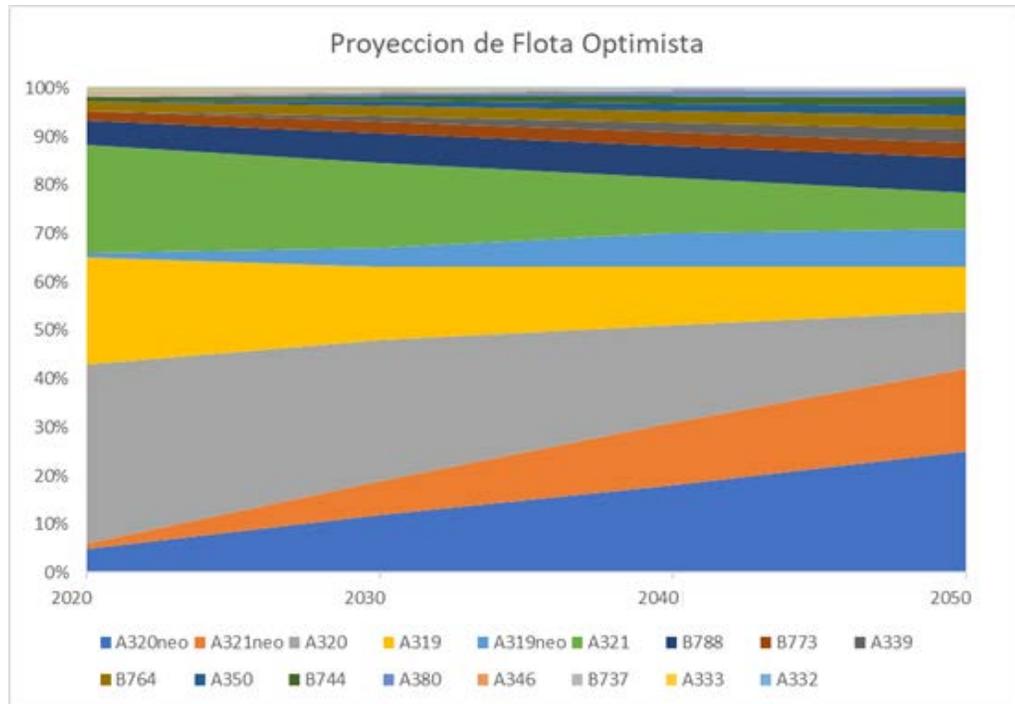


Figura 12: Escenario Optimista de la flota aérea presente en Chile para los años 2020-2050.

Tabla 17: Escenario pesimista de la flota aérea presente en Chile para los años 2020-2050.

Vuelos 2015	2020 [%]	2030 [%]	2040 [%]	2050 [%]
A320	37	33	27	22
A320neo	5	9	13	18
A321	22,3	18,6	15,5	11,3
A319	22	19	15	11
A321neo	1	4	7	10
B788	5	5,5	6	6,3
A319neo	1	2	4	6
A339	0	1	2	3
B764	2	2,3	2,5	2,8
B773	2	2	2,3	2,6

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

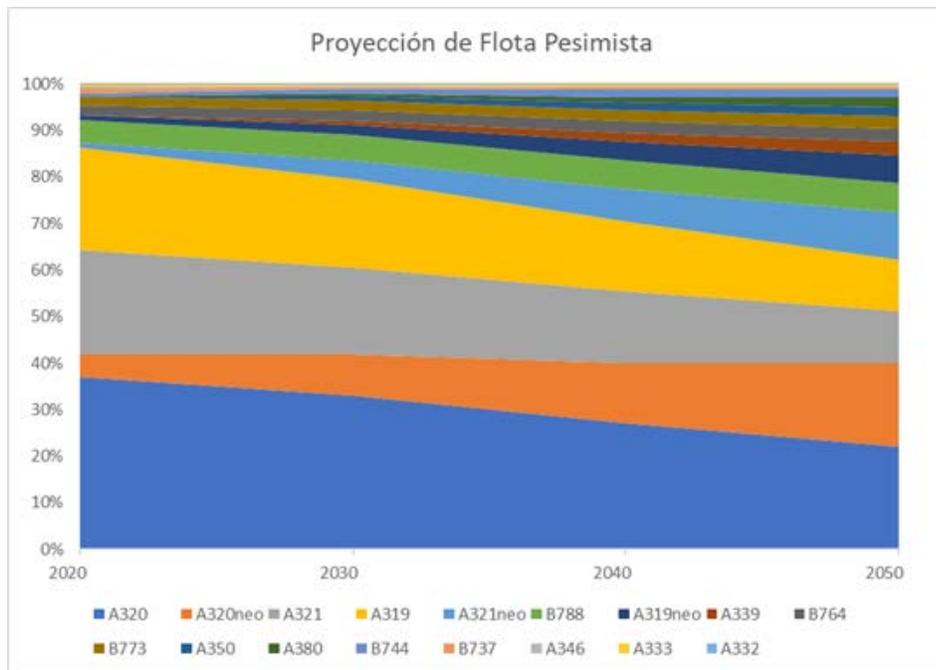


Figura 13: Escenario Pesimista de la flota aérea presente en Chile para los años 2020-2050.

3.3.4 Análisis de factor de emisión por pasajero

Para poder llevar los resultados de emisiones desde emisiones por movimiento a emisiones por pasajero es necesario conocer dos cosas.

Primero la capacidad de pasajeros con la que cuenta cada uno de los modelos de avión estudiados en las proyecciones de flota en el periodo 2020-2050, lo que se puede revisar en la tabla 18.

Tabla 18: Capacidad de pasajeros por modelo de avión.

Modelo	Capacidad Pasajeros
A320neo	180
A321neo	230
A320	180
A319	150
A319neo	150
A321	220
B788	310
B773	380
A339	400
B764	230
A350	340
B744	500
A380	550
A346	400
B737	220
A333	300
A332	250

El segundo elemento que se requiere conocer para poder estimar correctamente los factores de emisiones 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 saber que factor de ocupación utilizar para este estudio se consultan documentos de la IATA (International Air Transport Association) y la JAC (Junta de Aeronáutica Civil) los cuales respaldaran con estadísticas de años anteriores, los que servirán para poder proyectar el comportamiento de este factor en el periodo 2020-2050.



Figura 14: Factor de ocupación (PFL) para los meses de agosto entre los años 2016 y 2019. Fuente AIR PASSENGER MARKET ANALYSIS (agosto 2016, agosto 2017, agosto 2018, agosto 2019) IATA.

Tabla 19: Factor de ocupación en rutas domesticas en Chile. Fuente JAC.

Meses	2017	2018	Var. N.	Var. %
Enero	83,4%	82,3%	-1,07%	-1,28%
Febrero	84,1%	83,6%	-0,52%	-0,62%
Marzo	80,4%	79,7%	-0,78%	-0,97%
Abril	81,8%	84,8%	3,00%	3,67%
Mayo	79,8%	81,2%	1,42%	1,78%
Junio	78,3%	79,2%	0,89%	1,14%
Julio	82,6%	84,2%	1,63%	1,98%
Agosto	80,2%	79,0%	-1,16%	-1,45%
Septiembre	80,2%	81,0%	0,82%	1,02%
Octubre	81,0%	81,5%	0,52%	0,64%
Noviembre	80,1%	83,4%	3,25%	4,06%
Diciembre	79,4%	81,4%	2,03%	2,55%
Total	81,0%	81,8%	10,03%	1,01%

Con base en la información recientemente mostrada respecto a los factores de ocupación se realizan dos escenarios uno optimista y otro pesimista, los cuales serán incorporados al modelo de cálculo de factores de emisiones para obtener los factores de emisiones por pasajero.

Tabla 20: Resumen de los factores de ocupación estimados para el periodo 2020-2050 para el escenario optimista y el pesimista.

Año	Optimista	Pesimista
2020	0,829	0,829
2030	0,83	0,83
2040	0,87	0,83
2050	0,89	0,83

Como se observa en la tabla 11 para el caso optimista se tiene un aumento de 6% en el periodo 2020-2050, en cambio en el caso pesimista se mantuvo el valor del factor de ocupación constante en 83%.

3.4 Ferrocarriles

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.

Por lo que, dada la ausencia de estadísticas nacionales en la proyección del desarrollo ferroviario y las tecnologías asociadas a su funcionamiento, se considerará las estimaciones de IEA como un escenario optimista para la definición de los factores de emisión del área, ya que son estimaciones enfocadas a países donde el transporte ferroviario es más relevante que en Chile.

3.5 Escenarios propuestos

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

- **Escenario Optimista:**

- 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 nuevo a la flota y disminuyendo la participación de aviones mas 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.

- **Escenario Pesimista:**

- 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 hidrogeno 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.

El detalle de cómo se implementarán estas medidas en el tiempo, traduciéndose en escenarios de emisiones, se detallará siguiendo la metodología del capítulo 2. Como ejemplo, las tablas a continuación resumen para cada periodo el porcentaje de participación de cada tecnología en un par de categorías de vehículos.

Tabla 21: Porcentaje de participación de cada tecnología en un escenario optimista. Fuente: Elaboración propia.

Optimista					
BUS RIG	Categoría	2020	2030	2040	2050
	Convencional	0%	0%	0%	0%
	E1	0%	0%	0%	0%
	E2	1%	0%	0%	0%
	E3	44%	19%	8%	4%
	E4	0%	0%	0%	0%
	E5	52%	30%	13%	6%
	E6	0%	38%	18%	11%
	Eléctrico	2%	13%	60%	80%
	VLP	Categoría	2020	2030	2040
No Cat		0%	0%	0%	0%
E1		2%	0%	0%	0%
E2		0%	0%	0%	0%
E3		24%	14%	9%	5%
E4		21%	13%	8%	5%
E5		53%	39%	23%	14%
E6		0%	34%	56%	26%
Eléctrico		0%	0%	5%	50%

Tabla 22: Porcentaje de participación de cada tecnología en un escenario pesimista. Fuente: Elaboración propia.

Pesimista					
BUS RIG	Categoría	2020	2030	2040	2050
	Convencional	0%	0%	0%	0%
	E1	0%	0%	0%	0%
	E2	1%	0%	0%	0%
	E3	44%	19%	8%	4%
	E4	0%	0%	0%	0%
	E5	52%	42%	18%	8%
	E6	0%	25%	13%	16%
	Eléctrico	2%	13%	60%	72%
	VLP	Categoría	2020	2030	2040
No Cat		0%	0%	0%	0%

	E1	2%	0%	0%	0%
	E2	0%	0%	0%	0%
	E3	24%	14%	9%	5%
	E4	21%	13%	8%	5%
	E5	53%	50%	30%	18%
	E6	0%	22%	50%	42%
	Eléctrico	0%	0%	4%	30%

La figura siguiente muestra la distribución tecnológica para cada año, considerando los cambios normativos y tecnológicos en el escenario optimista para transporte público en todo el territorio nacional.

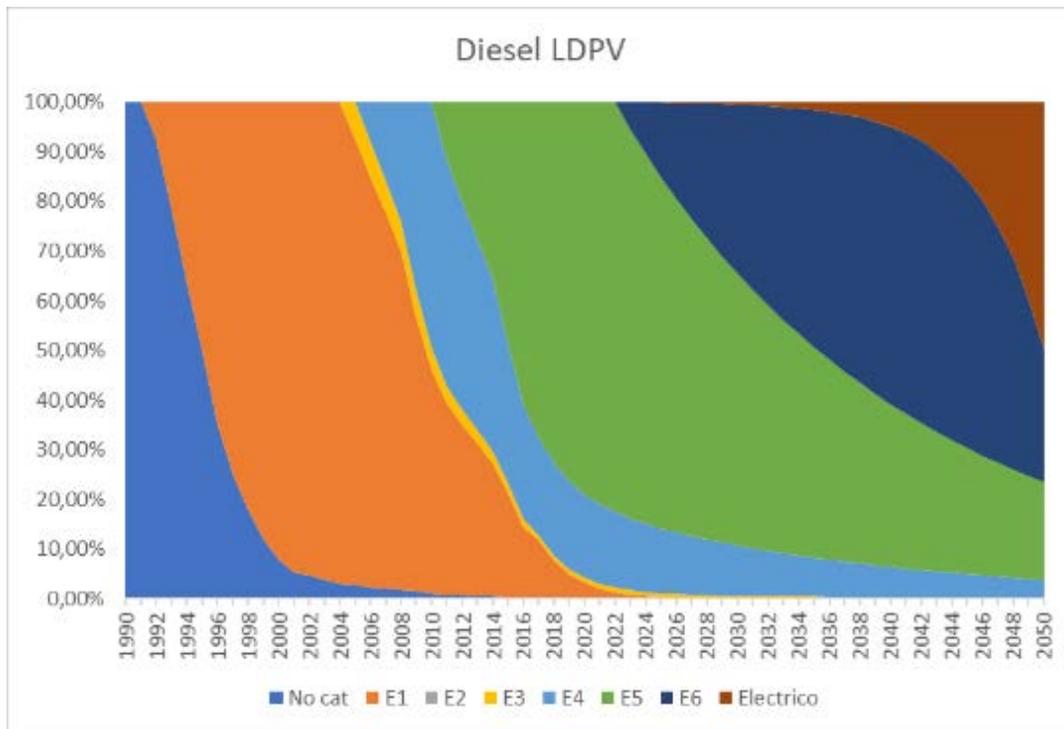


Figura 15: Distribución tecnológica por año, considerando cambios normativos y tecnológicos. Fuente: Elaboración propia.

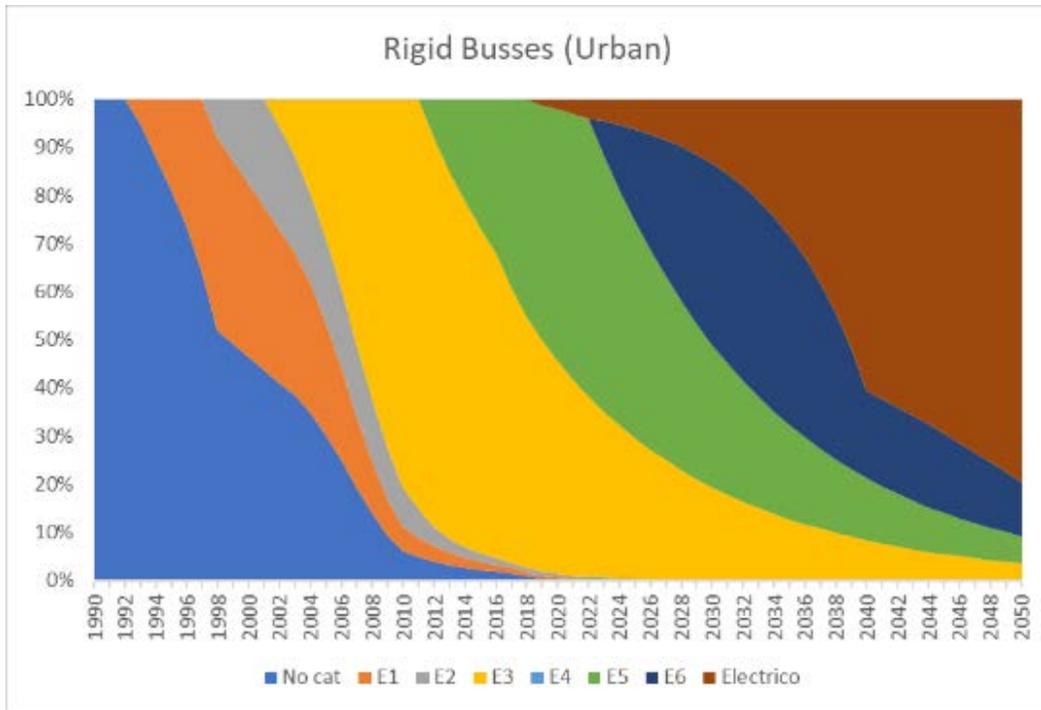


Figura 16: Distribución tecnológica por año, considerando cambios normativos y tecnológicos. Fuente: Elaboración propia.

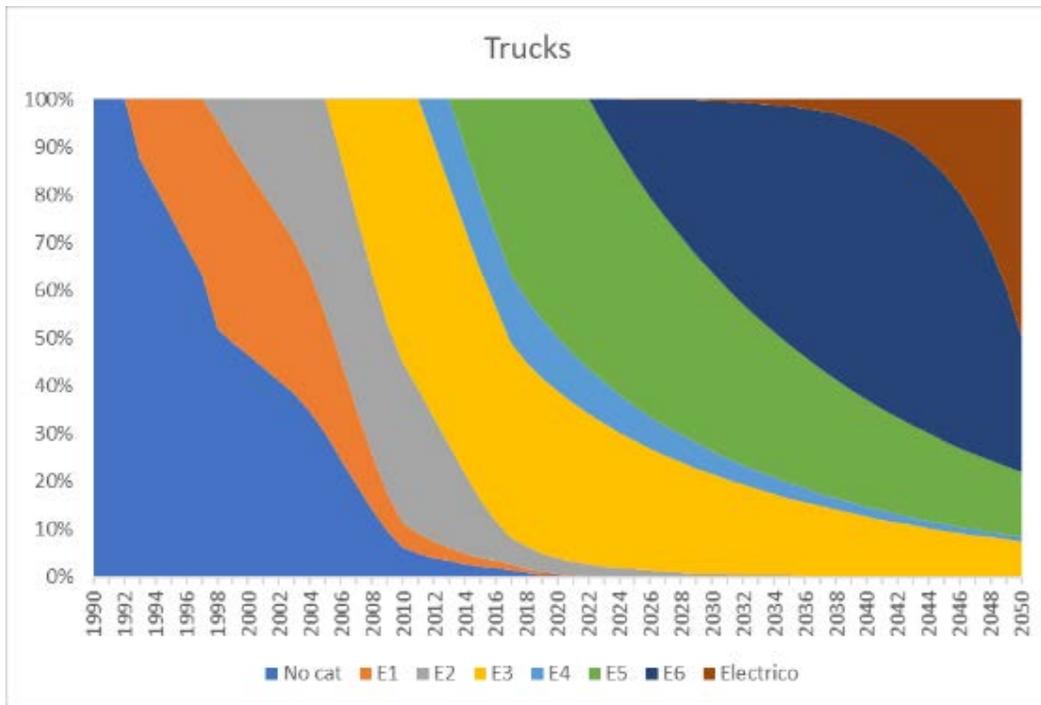


Figura 17: Distribución tecnológica por año, considerando cambios normativos y tecnológicos. Fuente: Elaboración propia.

Se puede establecer un factor de emisión de la red prácticamente constante en un valor cercano a 0,35 [tCO₂/MWh]. Ya que se proyecta la inclusión de energías renovables en la matriz energética que permiten que este factor se mantenga durante el tiempo, en caso contrario, considerando el aumento de demanda de energía eléctrica, el factor de emisión sería mucho mayor si el suministro de esta viniese de fuentes no renovables. *Fuente: Actualización de la proyección de emisiones 2017-2030 y análisis de medidas de mitigación CO₂ equivalente.*

3.6 Factores de Emisión ponderados según escenarios propuestos

Como resultado de los escenarios definidos y los factores de emisión que define la EIA en conjunto la UIC, se obtiene, para cada contaminante, tipo de transporte y periodo, los siguientes factores.

Tabla 23: Transporte vial

Transporte Vial		2020		2030		2040		2050		Unidad
		Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	
Interzonal	VL	178	178	179	179	175	176	131	151	g/vkt
	BUS	630	630	624	625	618	619	578	595	
	C2E	369	369	366	365	371	369	448	414	
	CM2	652	652	638	638	607	626	320	567	
Intrazonal	VL	197	197	196	196	189	190	138	154	
	BUS	780	780	712	712	630	630	582	587	
	C2E	395	395	392	392	397	395	462	432	
	CM2	822	822	805	806	767	790	404	716	

Tabla 24: Transporte ferroviario, aéreo y marítimo

Categorías		2020		2030		2040		2050		Unidad
		Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	
Ferrocarriles	Carga	22	22	21	22	21	22	21	22	g/tkm
	Pasajeros	75	75	74	75	74	75	73	75	g/pkm
Aéreo	CCD	60	60	54	56	46	50	41	45	g/pkm
	LTO	16	16	14	14	12	13	11	12	kg/pax
Marítimo	Océano	11	11	9	10	8	10	7	9	g/tkm
	Maniobras + Puerto	1,0	1,0	0,8	0,9	0,7	0,8	0,5	0,7	kg/ton

Resultados

Hasta la fecha de edición de este informe, se han recibido dos modelaciones de actividad de transporte nacional para los años 2017 y 2050. Una de las modelaciones corresponde al caso línea base (Plan_LB) y el otro a la situación con paquetes de medidas (Plan_CP). Por el momento solo se reportan las emisiones de CO₂, pero todos los otros compuestos están incluidos en las planillas de cálculo.

Realizando el producto entre niveles de actividad proporcionados por el modelo para los dos planes y los factores de emisión de ambos escenarios, para cada corte temporal, genera los siguientes resultados:

Tabla 25: Emisiones CO₂ transporte vial

Categoría		Emisiones Transporte Vial CO ₂ [Mton]							
		2017_LB		2017_CP		2050_LB		2050_CP	
		Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista
Interzonal	VL	5,726	5,726	6,042	6,042	12,949	14,878	13,353	15,341
	BUS	1,446	1,446	1,528	1,528	700	720	575	592
	C2E	937	937	914	914	2,611	2,408	2,596	2,394
	CM2	3,318	3,318	3,714	3,714	3,714	6,586	3,909	6,933
Intrazonal	VL	3,867	3,867	3,867	3,867	8,487	9,422	8,487	9,422
	BUS	836	836	836	836	773	780	773	780
	C2E	38	38	38	38	162	152	162	152
	CM2	-	-	-	-	-	-	-	-

Un resumen de las emisiones de transporte vial sería el siguiente:

Tabla 26: Emisiones CO₂ transporte vial

	Emisiones Transporte Vial CO ₂ [Mton]							
	2017_LB		2017_CP		2050_LB		2050_CP	
	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista
T-Vial-Interurbano	11,426	11,426	12,198	12,198	19,974	24,592	20,433	25,260
T-Vial-Intraurbano	4,741	4,741	4,741	4,741	9,423	10,354	9,423	10,354
T-Vial-Total	16,167	16,167	16,939	16,939	29,397	34,946	29,856	35,614

Gráficamente, la proporción en emisiones de CO₂ para las categorías de transporte vial año 2017, línea base, escenario optimista, se indica en la figura siguiente:

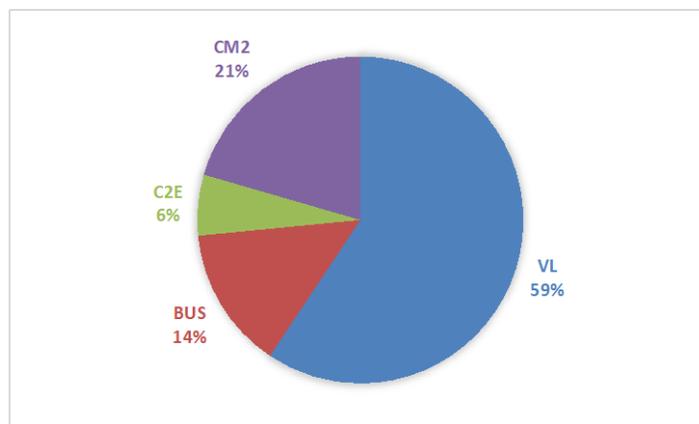


Figura 18: Proporción emisiones de CO₂ año 2017 modos de transporte vial

Tabla 27: Emisiones CO₂ transporte ferroviario

Categoría	Emisiones Ferrocarriles CO ₂ [Gton]							
	2017_LB		2017_CP		2050_LB		2050_CP	
	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista
Carga	6	6	4	4	13	13	11	11
Pasajeros	96	96	51	51	323	335	159	165

Tabla 28: Emisiones CO₂ transporte aéreo

Categoría	Emisiones Transporte Aéreo CO ₂ [Gton]							
	2017_LB		2017_CP		2050_LB		2050_CP	
	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista
CCD	1,408	1,408	1,241	1,241	3,693	4,092	3,362	3,724
LTO	512	512	338	338	1,535	1,668	1,080	1,173

Tabla 29: Emisiones CO₂ transporte marítimo

Categoría	Emisiones Transporte Marítimo CO ₂ [Gton]							
	2017_LB		2017_CP		2050_LB		2050_CP	
	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista
Océano	150	150	151	151	184	230	184	231
Maniobras + Puerto	187	187	115	115	175	231	144	191

La proporción entre los distintos modos de transporte, a nivel nacional, para el año 2017, línea base, escenario optimista de CO₂ es la siguiente:

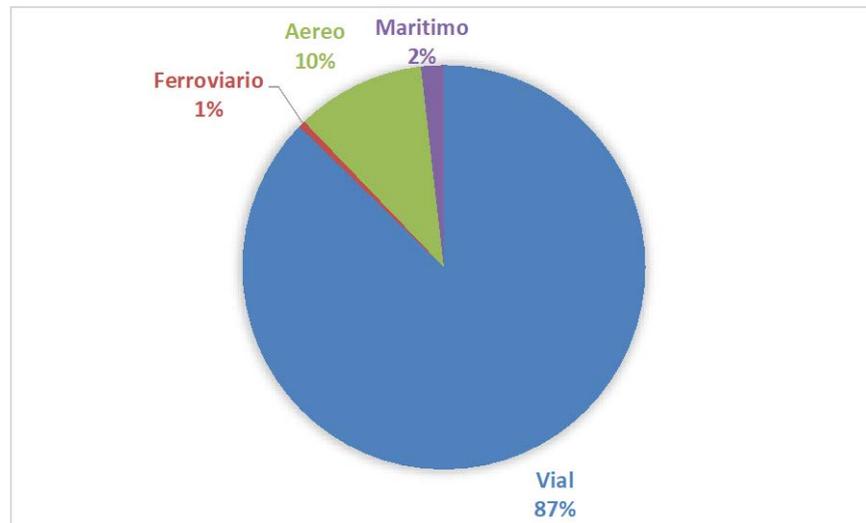


Figura 19: Proporción entre modos de transporte para CO₂, año 2017

A modo de comparación, el gráfico siguiente muestra la proporción entre los distintos modos de transporte en CO₂, reportado de manera independiente a este estudio. En ambos se mantiene la relevancia del modo vial (terrestre), seguido en importancia del modo aéreo, marítimo y finalmente ferroviario casi imperceptible al compararlo con el resto.

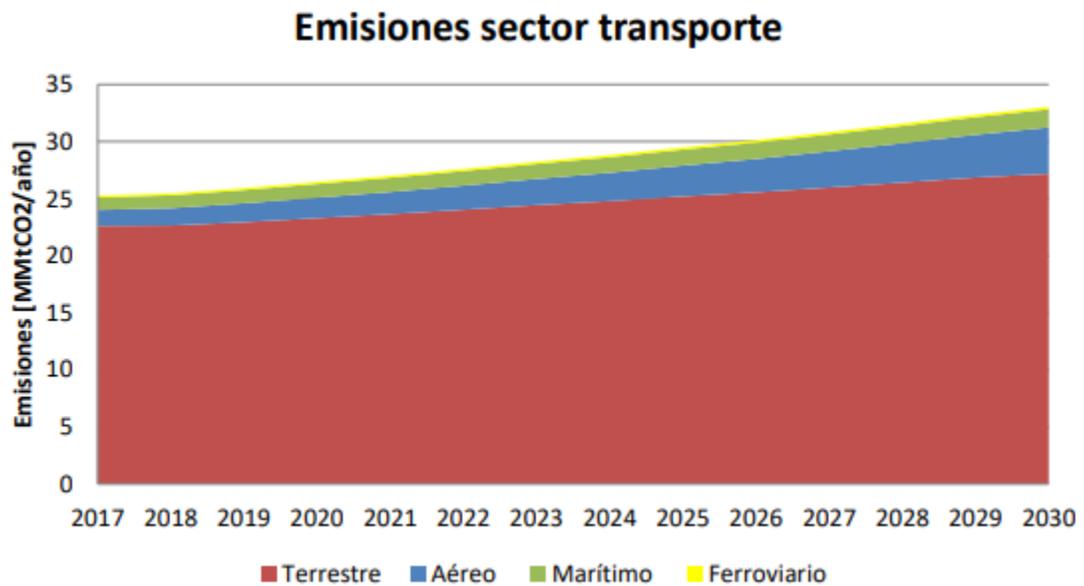


Figura 20: Participación de cada modo de transporte en la emisión de gases de efecto invernadero. Fuente: Generadoras de Chile.

La evolución de emisiones de CO₂, para los cuatro cortes temporales, diferenciando escenarios optimista y pesimista, se grafica en la figura siguiente. Siempre el escenario pesimista genera mayores emisiones, llegando a un 13% de diferencia el año 2050. El aumento de demanda de transporte (pkm y tkm) domina la generación de emisiones, que se mantiene creciente de un año a otro, pese a que los factores de emisión disminuyen. Solo en el año 2050 se observa una reducción con respecto al año 2040, para el escenario optimista 2050.

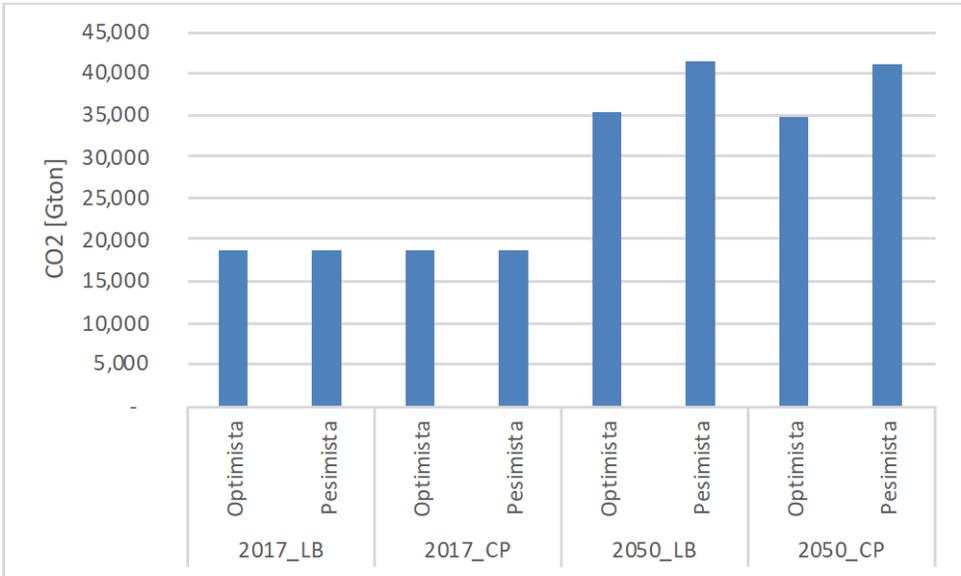


Figura 21: Evolución emisiones CO₂ comparando escenarios

Comparando los valores absolutos reportados por Generadoras de Chile con este estudio, se observan menores valores para este último. La Figura 20 indica un crecimiento de 26 a 32 MMton CO₂ para los años 2020 y 2030, respectivamente. Este estudio muestra promedios de 18 a 35 MMton CO₂ para los años 2017 y 2050 en línea base, escenario optimista y hasta 41 MMton CO₂ en el escenario pesimista 2050.

Comparando los resultados de este estudio (PNIM) con otras referencias que estiman la generación de CO₂ a nivel nacional para el sector transporte vial, se obtiene el siguiente gráfico:

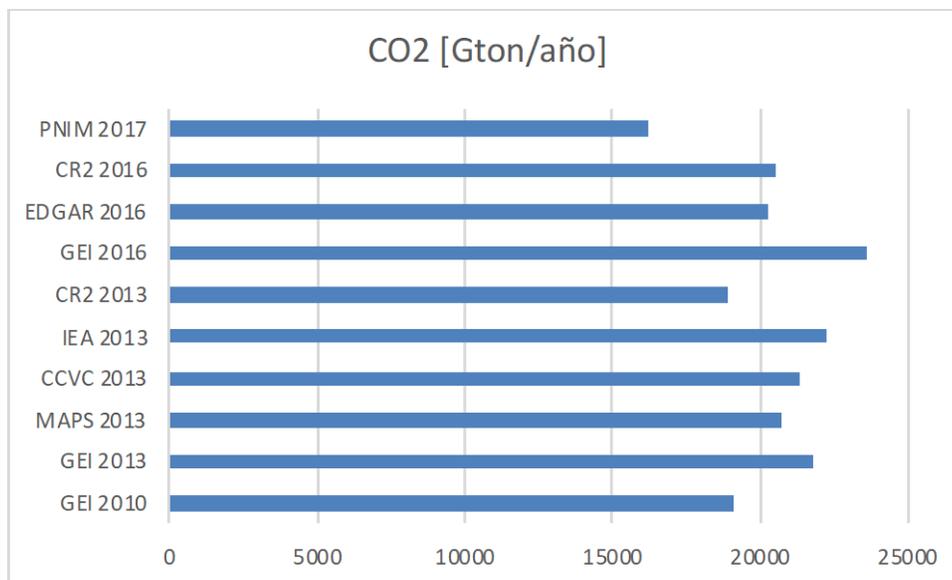


Figura 22: Comparación emisiones CO₂ transporte vial

La diferencia observada podría tener su origen en la estimación de actividad. Al comparar el indicador VKT (vehículos x kilómetros) de este estudio para transporte vial con inventarios similares, se aprecia una sub-representación de demanda, aunque la proporción entre los tipos de vehículo es similar.

Se recomienda revisar la proyección de demanda generada por el modelo de transporte, así como el proceso de cálculo aplicado para obtener las emisiones. En el presente informe se han reportado solamente las emisiones de CO₂ a modo de validación, aunque también existen los factores de emisión para el resto de los contaminantes (HC, CO, NO_x, MP).

4 Bibliografía

1. **European Environment Agency.** *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 (1.A.3.a Aviation 2016)*. Luxembourg: European Environment Agency, 2016.
2. **Ministerio del Medio Ambiente.** [mma.gob.cl](https://mma.gob.cl/subsecretario-riesco-anuncia-anteproyecto-de-la-norma-de-emisiones-euro-6-para-vehiculos-livianos-y-medianos/). [En línea] 22 de marzo de 2019.
3. **European Environment Agency.** *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2016 (1.A.3.c Railways 2016)*. Luxembourg: European Environment Agency, 2016.
4. **Ministerio de Energía, Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, Ministerio del Medio Ambiente.** *Estrategia Nacional de Electromovilidad*. Santiago, Chile: s.n., 2018.
5. **Sociedad Consultora Sistemas Sustentables Ltda.** *Actualización Metodológica del Modelo*. s.l.: Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones SECTRA, 2014.
6. **Vilches, E., Ivelic, A. M., & Ferreiro, O.** *Revisión de la metodología de medición de las variables “Tasa de ocupación” y “Clasificación de vehículos”*. Santiago: SOCHITRAN, 1991.
7. **Marcano, L. U.** *Estimación de emisiones de los ciclos de aterrizajes y despegues de aeronaves en el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas*. Madrid: s.n., 2018.
8. **Qualimet.** *Estimación de Demanda por Transporte Aéreo Nacional e Internacional en Chile*. Santiago: s.n., 2013.
9. **FAA.** «Aircraft fuel system» de *The Aviation Maintenance Technician Handbook–Airframe, Volume 2*. Oklahoma: US Department transportation, 2012.
10. **Junta de Aeronáutica Civil.** *Anuario 2015 de transporte aéreo*. Santiago: Junta Aeronáutica Civil, 2015.
11. **DGAC.** *Actualización memoria de cálculo de emisiones Aeropuerto Arturo Merino Benítez*. Santiago: s.n., 2015.
12. **MMA.** *Escenario Referenciales para la Mitigación del Cambio Climático Resultados de FASE 1*. Santiago: s.n., 2013.
13. —. *Escenario Referenciales para la Mitigación del Cambio Climático Resultados de FASE 2*. Santiago: s.n., 2014.

14. **OACI.** *Emisiones de los motores de las aeronaves Volumen II.* 2008.
15. **Comisión Nacional de Energía.** Ventas combustibles líquidos. [En línea] <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/combustibles-por-region/>.
16. **Armada de Chile - DIRECTEMAR.** *Boletín Estadístico Marítimo.* 2016.
17. **Armada de Chile.** *Análisis Estadísticas Portuarias.* 2016.
18. **Cooper, D., & Gustafsson, T.** *Methodology for calculating emissions from ships: 1. Update of emission factors.* Norrköping, Suecia: s.n., 2004.
19. **Entec UK Limited.** *Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community.* 2002.
20. —. *UK Ship Emissions Inventory, Final Report.* 2010.
21. **Sin, M.** *Análisis de la implementación de combustibles con bajo contenido en azufre en el tráfico marítimo en el Mar del Norte.* Barcelona, España: s.n., 2012.
22. **Wunderlich Contreras, M. R.** *Análisis de la Contaminación Atmosférica Provocada por Buques en base a las Exigencias del Anexo VI del MARPOL 73/78.* Valdivia, Chile: Universidad Austral de Chile, 2005.
23. **CORSIA.** *PLAN DE COMPENSACIÓN Y REDUCCIÓN DE CARBONO PARA LA AVIACIÓN INTERNACIONAL.* s.l.: OACI, 2018.
24. **POCH.** *Actualización de la proyección de emisiones 2017- 2030 y análisis medidas de mitigación de CO2 equivalente.* Santiago: s.n., 2017.
25. **Ministerio de Energía.** *Resumen Política Energética de Chile 2050.* Santiago: s.n., 2018.
26. **EIB.** *Project Carbon Footprint.* Luxembourg: European Investment Bank, 2018.
27. **International Energy Agency.** *The Future of Rail 2050.* France: IEA, 2019.

5 Anexos

Tabla 29: Vial Optimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CO2	Intrazonal	VL	196,893	196,713	196,156	188,728	138,304	g/km.veh
		BUS	819,668	780,125	712,250	629,831	582,027	
		C2E	399,980	395,019	391,659	396,530	461,560	
		CM2	836,659	821,979	805,189	766,526	403,850	
	Interzonal	VL	177,674	178,446	178,800	174,838	131,027	
		BUS	632,562	629,949	624,486	617,639	578,340	
		C2E	373,837	369,123	365,539	371,488	448,345	
		CM2	664,959	652,196	637,578	606,704	319,623	
Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CO	Intrazonal	VL	0,667	0,370	0,279	0,260	0,136	g/km.veh
		BUS	1,532	1,061	0,449	0,175	0,079	
		C2E	0,570	0,384	0,201	0,136	0,076	
		CM2	1,155	0,732	0,286	0,172	0,081	
	Interzonal	VL	0,769	0,634	0,574	0,537	0,285	
		BUS	0,214	0,155	0,086	0,056	0,032	
		C2E	0,107	0,061	0,027	0,017	0,010	
		CM2	0,190	0,110	0,036	0,019	0,008	
Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CH4	Intrazonal	VL	0,006	0,003	0,002	0,002	0,001	g/km.veh
		BUS	0,117	0,083	0,035	0,014	0,006	
		C2E	0,053	0,037	0,019	0,013	0,007	
		CM2	0,109	0,070	0,026	0,015	0,007	
	Interzonal	VL	0,006	0,003	0,002	0,002	0,001	
		BUS	0,112	0,086	0,050	0,033	0,019	
		C2E	0,051	0,035	0,016	0,010	0,005	
		CM2	0,109	0,070	0,026	0,015	0,007	
Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
VOC	Intrazonal	VL	0,061	0,031	0,019	0,017	0,009	g/km.veh
		BUS	0,330	0,205	0,078	0,030	0,013	
		C2E	0,167	0,096	0,042	0,026	0,015	
		CM2	0,301	0,178	0,057	0,030	0,013	

	Interzonal	VL	0,040	0,023	0,015	0,013	0,007	
		BUS	0,214	0,157	0,086	0,056	0,032	
		C2E	0,107	0,062	0,027	0,017	0,010	
		CM2	0,190	0,112	0,036	0,019	0,008	
Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
BC	Intrazonal	VL	0,006	0,003	0,001	0,001	0,000	g/km.veh
		BUS	0,079	0,056	0,023	0,009	0,004	
		C2E	0,042	0,026	0,011	0,006	0,003	
		CM2	0,088	0,057	0,017	0,005	0,002	
	Interzonal	VL	0,008	0,005	0,002	0,001	0,001	
		BUS	0,061	0,047	0,025	0,014	0,009	
		C2E	0,033	0,020	0,008	0,004	0,003	
		CM2	0,063	0,041	0,012	0,003	0,001	
Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
PM2.5	Intrazonal	VL	0,009	0,005	0,003	0,002	0,001	g/km.veh
		BUS	0,121	0,082	0,033	0,013	0,006	
		C2E	0,063	0,040	0,019	0,011	0,006	
		CM2	0,134	0,084	0,024	0,008	0,003	
	Interzonal	VL	0,013	0,008	0,004	0,002	0,001	
		BUS	0,091	0,068	0,035	0,021	0,012	
		C2E	0,049	0,031	0,014	0,008	0,004	
		CM2	0,096	0,059	0,017	0,005	0,002	
Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
NOx	Intrazonal	VL	0,299	0,232	0,161	0,124	0,066	g/km.veh
		BUS	6,646	5,103	2,264	0,890	0,394	
		C2E	2,949	2,308	1,644	1,385	0,739	
		CM2	6,534	4,893	1,853	0,876	0,372	
	Interzonal	VL	0,300	0,220	0,145	0,110	0,058	
		BUS	4,794	4,022	2,374	1,537	0,944	
		C2E	2,752	2,141	1,524	1,288	0,687	
		CM2	5,249	3,934	1,496	0,709	0,301	

Tabla 30: Vial Pesimista

Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CO2	Intrazonal	VL	196,893	196,714	196,198	189,737	153,529	g/km.veh
		BUS	819,668	780,125	712,250	629,831	587,314	
		C2E	399,980	395,019	391,580	394,578	432,180	
		CM2	836,659	821,979	806,343	790,497	716,121	
	Interzonal	VL	177,674	178,446	178,852	176,132	150,540	
		BUS	632,562	629,949	624,530	618,736	594,893	
		C2E	373,837	369,123	365,444	369,170	413,505	
		CM2	664,959	652,196	638,492	625,680	566,807	
Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CO	Intrazonal	VL	0,667	0,372	0,279	0,262	0,169	g/km.veh
		BUS	1,532	1,048	0,449	0,175	0,083	
		C2E	0,570	0,384	0,201	0,137	0,089	
		CM2	1,155	0,738	0,286	0,176	0,133	
	Interzonal	VL	0,769	0,635	0,574	0,545	0,394	
		BUS	0,214	0,157	0,086	0,056	0,035	
		C2E	0,107	0,062	0,027	0,017	0,011	
		CM2	0,190	0,112	0,036	0,019	0,013	
Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
CH4	Intrazonal	VL	0,006	0,003	0,001	0,002	0,001	g/km.veh
		BUS	0,117	0,083	0,035	0,014	0,006	
		C2E	0,053	0,037	0,019	0,013	0,008	
		CM2	0,109	0,070	0,026	0,015	0,011	
	Interzonal	VL	0,006	0,003	0,001	0,002	0,001	
		BUS	0,112	0,086	0,050	0,033	0,021	
		C2E	0,051	0,035	0,016	0,010	0,006	
		CM2	0,109	0,070	0,026	0,015	0,011	
Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
VOC	Intrazonal	VL	0,061	0,031	0,019	0,017	0,011	g/km.veh
		BUS	0,330	0,205	0,078	0,030	0,014	
		C2E	0,167	0,096	0,042	0,026	0,017	
		CM2	0,301	0,178	0,057	0,030	0,021	
	Interzonal	VL	0,040	0,023	0,015	0,014	0,010	
		BUS	0,214	0,157	0,086	0,056	0,035	
		C2E	0,107	0,062	0,027	0,017	0,011	

		CM2	0,190	0,112	0,036	0,019	0,013	
Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
BC	Intrazonal	VL	0,006	0,003	0,001	0,001	0,000	g/km.veh
		BUS	0,079	0,056	0,031	0,012	0,005	
		C2E	0,042	0,026	0,012	0,006	0,004	
		CM2	0,088	0,057	0,028	0,009	0,003	
	Interzonal	VL	0,008	0,005	0,002	0,001	0,001	
		BUS	0,061	0,047	0,030	0,017	0,010	
		C2E	0,033	0,020	0,009	0,005	0,003	
		CM2	0,063	0,041	0,019	0,006	0,002	
Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
PM2.5	Intrazonal	VL	0,009	0,005	0,003	0,002	0,001	g/km.veh
		BUS	0,121	0,082	0,043	0,017	0,007	
		C2E	0,063	0,040	0,023	0,013	0,008	
		CM2	0,134	0,084	0,039	0,013	0,005	
	Interzonal	VL	0,013	0,008	0,004	0,002	0,001	
		BUS	0,091	0,068	0,043	0,024	0,014	
		C2E	0,049	0,031	0,017	0,009	0,006	
		CM2	0,096	0,059	0,026	0,008	0,003	
Contaminante	Categoría		2017	2020	2030	2040	2050	Unidades
Nox	Intrazonal	VL	0,299	0,232	0,189	0,141	0,090	g/km.veh
		BUS	6,646	5,103	3,010	1,165	0,525	
		C2E	2,949	2,308	1,645	1,402	0,989	
		CM2	6,534	4,893	2,929	1,228	0,675	
	Interzonal	VL	0,300	0,220	0,173	0,126	0,082	
		BUS	4,794	4,022	2,946	1,791	1,130	
		C2E	2,752	2,141	1,525	1,304	0,921	
		CM2	5,249	3,934	2,367	0,995	0,547	

Tabla 31:

Contaminante	Modo de transporte	Categoría	2020		2030		2040		2050		Unidad
			Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	
CO2	Ferrocarriles	Carga	21,7	21,7	21,5	21,7	21,3	21,7	21,2	21,7	g/tkm
		Pasajeros	74,5	74,5	74,3	75,2	73,6	75,3	72,9	75,4	g/pkm
	Aereo	CCD	60,3	60,352	53,7	55,6	45,9	50,0	40,7	45,1	g/pkm
		LTO	15514	15514	14099	14450	12236	13124	11037	11991	g/pax
	Maritimo	Océano	1,12	1,12	0,87	1,01	0,78	0,967	0,70	0,88	g/tkm
		Maniobras + Puerto	1042	1042	767	915	656	834	535	710	g/ton

Contaminante	Modo de transporte	Categoría	2020		2030		2040		2050		Unidad
			Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	
HC	Ferrocarriles	Carga	0,07	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07	g/tkm
		Pasajeros	0,22	0,22	0,22	0,23	0,22	0,23	0,22	0,23	g/pkm
	Aereo	CCD	0,0077	0,0077	0,0064	0,0070	0,0054	0,0061	0,0046	0,0054	g/pkm
		LTO	6,99	6,99	5,81	6,34	4,83	5,51	4,09	4,90	g/pax
	Maritimo	Océano	-	-	-	-	-	-	-	-	g/tkm
		Maniobras + Puerto	-	-	-	-	-	-	-	-	g/ton

Contaminante	Modo de transporte	Categoría	2020		2030		2040		2050		Unidad
			Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	
NOX	Ferrocarriles	Carga	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	g/tkm
		Pasajeros	2,7	2,7	2,6	2,7	2,6	2,7	2,6	2,7	g/pkm
	Aereo	CCD	0,30	0,30	0,26	0,28	0,22	0,24	0,19	0,21	g/pkm
		LTO	67,40	67,40	60,35	62,04	51,03	55,68	45,00	50,01	g/pax
	Maritimo	Océano	0,022	0,022	0,018	0,020	0,015	0,019	0,014	0,017	g/tkm
		Maniobras + Puerto	20,36	20,36	15,00	17,87	12,82	16,30	10,46	13,87	g/ton

Contaminante	Modo de transporte	Categoría	2020		2030		2040		2050		Unidad
			Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	
PM	Ferrocarriles	Carga	0,021	0,021	0,020	0,021	0,020	0,021	0,020	0,021	g/tkm
		Pasajeros	0,070	0,070	0,070	0,071	0,068	0,071	0,067	0,071	g/pkm
	Aereo	CCD	0,0032	0,0032	0,0029	0,0030	0,0025	0,0027	0,0023	0,0024	g/pkm
		LTO	0,51	0,51	0,45	0,47	0,38	0,42	0,33	0,37	g/pax
	Maritimo	Océano	0,00046	0,00046	0,00037	0,00041	0,00032	0,00040	0,00029	0,00036	g/tkm
		Maniobras + Puerto	0,30	0,30	0,22	0,26	0,19	0,24	0,15	0,20	g/ton

Contaminante	Modo de transporte	Categoria	2020		2030		2040		2050		Unidad
			Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	
CO	Ferrocarriles	Carga	-	-	-	-	-	-	-	-	g/tkm
		Pasajeros	-	-	-	-	-	-	-	-	g/pkm
	Aereo	CCD	0,045	0.045	0.038	0.041	0.032	0.036	0.027	0.032	g/pkm
		LTO	44.44	44.44	39.31	41.27	34.04	37.07	30.43	33.84	g/pax
	Maritimo	Océano	0.0018	0.0018	0.0014	0.0016	0.0012	0.0015	0.0011	0.0014	g/tkm
		Maniobras + Puerto	1.36	1.36	1.09	1.20	0.86	1.09	0.70	0.93	g/ton

Contaminante	Modo de transporte	Categoria	2020		2030		2040		2050		Unidad
			Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	Optimista	Pesimista	
SOx	Ferrocarriles	Carga	-	-	-	-	-	-	-	-	g/tkm
		Pasajeros	-	-	-	-	-	-	-	-	g/pkm
	Aereo	CCD	-	-	-	-	-	-	-	-	g/pkm
		LTO	-	-	-	-	-	-	-	-	g/pax
	Maritimo	Océano	0,0041	0,0041	0,0032	0,0037	0,0028	0,0035	0,0025	0,0032	g/tkm
		Maniobras + Puerto	2,57	2,57	1,89	2,26	1,62	2,06	1,32	1,75	g/ton

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.
CONTRAPARTE TÉCNICA : MOP - DIRPLAN
FINANCIADO POR : Banco Interamericano de Desarrollo

EQUIPO DE TRABAJO

Universidad Técnica Federico Santa María:

Mauricio Osses

Benjamin Gomez

Matias Concha

Adolfo Gaete

En coordinación con el equipo del Ministerio de Obras Públicas:

Dirección de Planeamiento: Vianel Gonzalez, Felipe Livert, Mauricio Carrasco, Mónica Baeza.

Dirección General de Concesiones: Patricia Henríquez

Dirección de Aeropuertos: Rodrigo Aranda

Dirección de Obras Portuarias: Ariel Grandón

Dirección de Vialidad: Christian Vigouroux

Asesores externos: Marcial Echenique y Gonzalo Vejar

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	7
2	ESCENARIOS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES	9
2.1	Transporte vial	10
2.2	Transporte marítimo	14
2.3	Transporte aéreo	20
2.4	Transporte ferroviario	24
2.5	Resumen escenarios propuestos	25
3	FACTORES DE EMISIÓN	27
3.1	Metodologías seleccionadas para la estimación de emisiones	28
3.2	Factores de emisión transporte vial	29
3.3	Factores de emisión transporte marítimo	32
3.4	Factores de emisión transporte aéreo	33
3.5	Factores de emisión transporte ferroviario	34
4	EMISIONES ANUALES 2017-2050	36
4.1	Emisiones de dióxido de carbono CO ₂	36
4.2	Emisiones de material particulado MP2.5	40
4.3	Emisiones de óxidos de nitrógeno NO _x	45
4.4	Emisiones de carbono negro CN	49
4.5	Análisis de resultados	54
5	CONCLUSIONES	60
6	BIBLIOGRAFÍA	64

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1: Factor de crecimiento capacidad de carga escenario Bajo Carbono.....	16
Tabla 2: Factor de crecimiento capacidad de carga escenario Conservador.....	16
Tabla 3: Escenario Bajo Carbono de la flota marítima en Chile 2020-2050.....	16
Tabla 4: Escenario Conservador de la flota marítima en Chile 2020-2050.....	17
Tabla 5: Capacidad de carga por tipo de buque.....	19
Tabla 6: Factores de ocupación estimados para el periodo 2020-2050 por tipo de buque.....	19
Tabla 7: Escenario Bajo Carbono de la flota aérea en Chile 2020-2050.....	21
Tabla 8: Escenario Conservador de la flota aérea en Chile 2020-2050.....	22
Tabla 9: Factores de ocupación estimados para el periodo 2020-2050.....	24
Tabla 10: Proyecciones de participación por tecnología en el transporte ferroviario.....	25
Tabla 11: Compuestos para los cuales se reporta factor de emisión.....	27
Tabla 12: Factores de emisión transporte vial CO ₂	29
Tabla 13: Factores de emisión transporte vial interzonal CO ₂ escenario Bajo Carbono.....	29
Tabla 14: Factores de emisión transporte vial interzonal CO ₂ escenario Conservador.....	31
Tabla 15: Factores de emisión transporte marítimo.....	32
Tabla 16: Reducción factores de emisión transporte marítimo.....	33
Tabla 17: Factores de emisión transporte aéreo.....	33
Tabla 18: Reducción factores de emisión transporte aéreo.....	34
Tabla 19: Factores de emisión transporte ferroviario.....	34
Tabla 20: Reducción factores de emisión transporte ferroviario.....	35
Tabla 21: Emisiones CO ₂ en miles de toneladas anuales.....	36
Tabla 22: Emisiones CO ₂ transporte vial en miles de toneladas anuales.....	38
Tabla 23: Emisiones CO ₂ transporte vial en miles de toneladas anuales.....	38
Tabla 24: Emisiones CO ₂ transporte ferroviario en miles de toneladas anuales.....	39
Tabla 25: Emisiones CO ₂ transporte aéreo en miles de toneladas anuales.....	39
Tabla 26: Emisiones CO ₂ transporte marítimo en miles de toneladas anuales.....	40
Tabla 27: Emisiones MP _{2.5} en toneladas anuales.....	41
Tabla 28: Emisiones MP _{2.5} transporte vial en toneladas anuales.....	42
Tabla 29: Emisiones MP _{2.5} transporte vial en toneladas anuales.....	43
Tabla 30: Emisiones MP _{2.5} transporte ferroviario en toneladas anuales.....	44
Tabla 31: Emisiones MP _{2.5} transporte aéreo en toneladas anuales.....	44
Tabla 32: Emisiones MP _{2.5} transporte marítimo en toneladas anuales.....	44
Tabla 33: Emisiones NO _x en toneladas anuales.....	45

Tabla 34: Emisiones NOx transporte vial en toneladas anuales	47
Tabla 35: Emisiones NOx transporte vial en toneladas anuales	47
Tabla 36: Emisiones NOx transporte ferroviario en toneladas anuales.....	48
Tabla 37: Emisiones NOx transporte aéreo en toneladas anuales	48
Tabla 38: Emisiones NOx transporte marítimo en toneladas anuales.....	49
Tabla 39: Emisiones CN en toneladas anuales	49
Tabla 40: Emisiones CN transporte vial en toneladas anuales	51
Tabla 41: Emisiones CN transporte vial en toneladas anuales	52
Tabla 42: Emisiones CN transporte ferroviario en toneladas anuales.....	53
Tabla 43: Emisiones CN transporte aéreo en toneladas anuales	53
Tabla 44: Emisiones CN transporte marítimo en toneladas anuales.....	53
Tabla 45: Emisiones anuales CO2	61

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1: Escenario Bajo Carbono de la flota marítima en Chile 2020-2050.	17
Figura 2: Escenario Conservador de la flota marítima en Chile 2020-2050.	18
Figura 3: Escenario Bajo Carbono de la flota aérea en Chile 2020-2050.	22
Figura 4: Escenario Conservador de la flota aérea en Chile 2020-2050.	23
Figura 5: Emisiones totales de CO ₂	37
Figura 6: Proporción emisiones de CO ₂ año 2017 y 2050 por modo de transporte.....	37
Figura 7: Proporción emisiones de CO ₂ año 2017 modos de transporte vial.....	39
Figura 8: Proporción entre modos de transporte para CO ₂	40
Figura 9: Emisiones totales de MP _{2.5}	41
Figura 10: Proporción emisiones de MP _{2.5} año 2017 y 2050, por modo de transporte.	42
Figura 11: Proporción emisiones de MP _{2.5} año 2017 modos de transporte vial.....	43
Figura 12: Proporción entre modos de transporte para MP _{2.5}	45
Figura 13: Emisiones totales de NOx.....	46
Figura 14: Proporción emisiones de NOx año 2017 y 2050, por modo de transporte.....	46
Figura 15: Proporción emisiones de NOx año 2017 modos de transporte vial.....	48
Figura 16: Proporción entre modos de transporte para NOx.....	49
Figura 17: Emisiones totales de CN.....	50
Figura 18: Proporción emisiones de CN año 2017 y 2050, por modo de transporte.....	51
Figura 19: Proporción emisiones de CN año 2017 modos de transporte vial.....	52
Figura 20: Proporción entre modos de transporte para CN.....	54
Figura 21: Tendencias en la reducción de factores de emisión promedio.	55
Figura 22: Tasas de crecimiento 2017-2050 de movilidad y emisiones anuales.	56
Figura 23: Diferencia porcentual entre situación Plan Bajo Carbono 2050 y caso base 2017. 58	
Figura 24: Emisiones anuales CO ₂	60
Figura 25: Emisiones anuales MP _{2.5}	62
Figura 26: Emisiones anuales NOx.....	63

1 Introducción

El presente Informe corresponde al estudio “**Consultoría para la cuantificación de emisiones del Plan Nacional de Infraestructura para la Movilidad 2020-2050**”. 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).

Este estudio ha sido financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), con los siguientes objetivos:

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 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

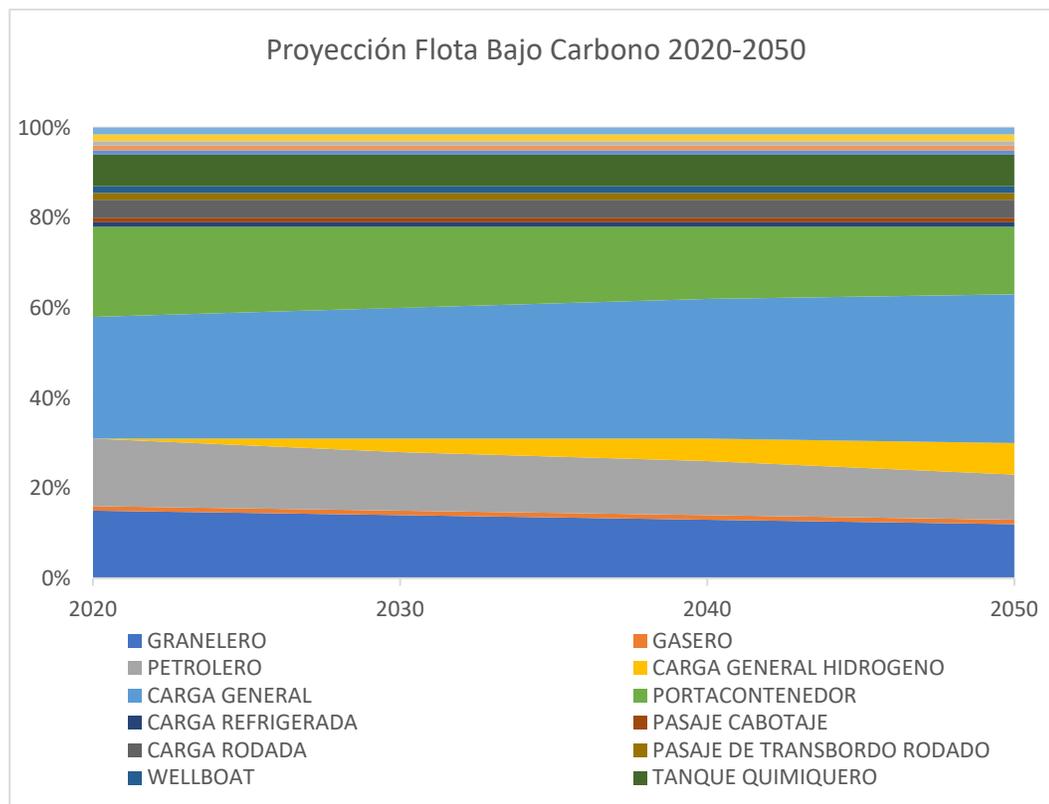


Figura 1: Escenario Bajo Carbono de la flota marítima en Chile 2020-2050.

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

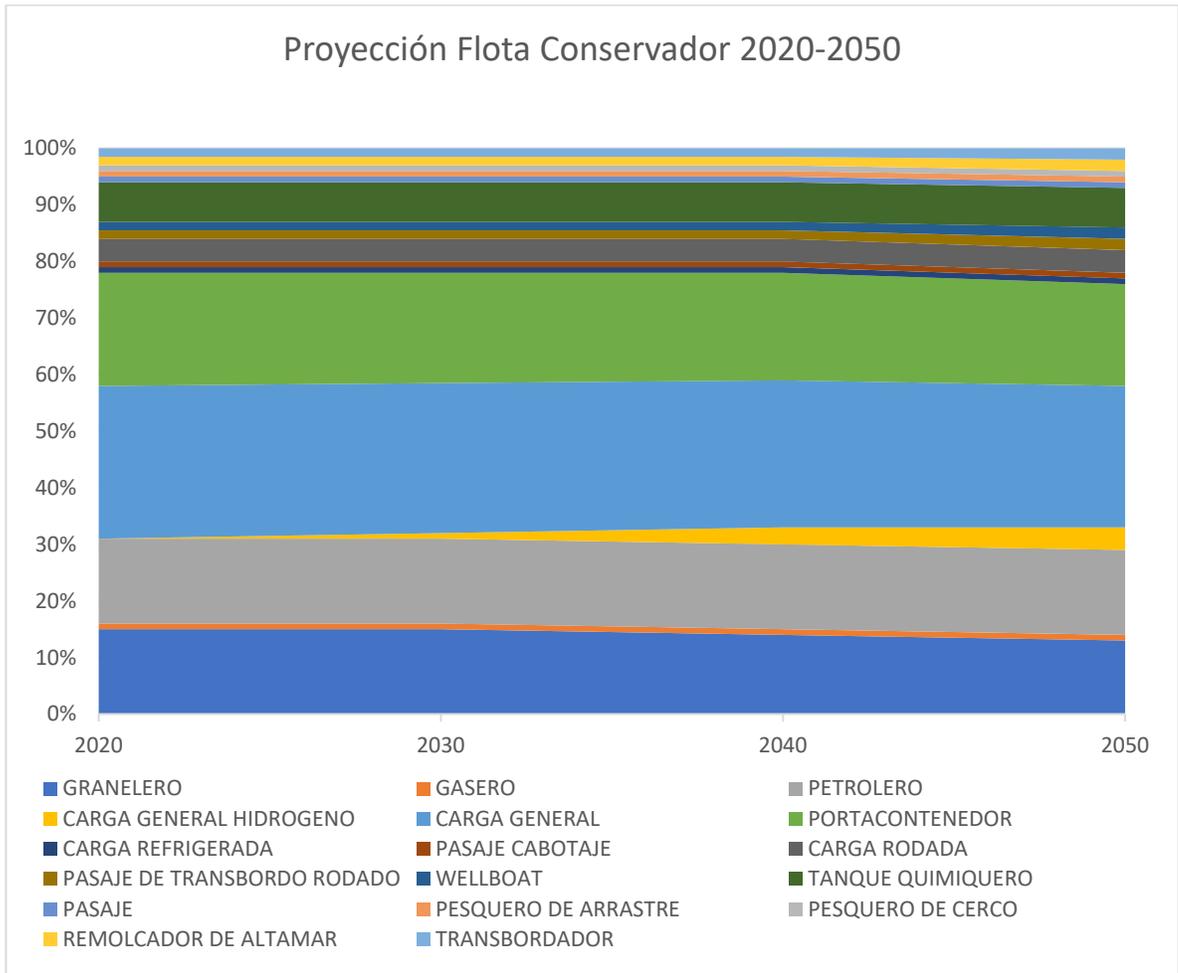


Figura 2: Escenario Conservador de la flota marítima en Chile 2020-2050.

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

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

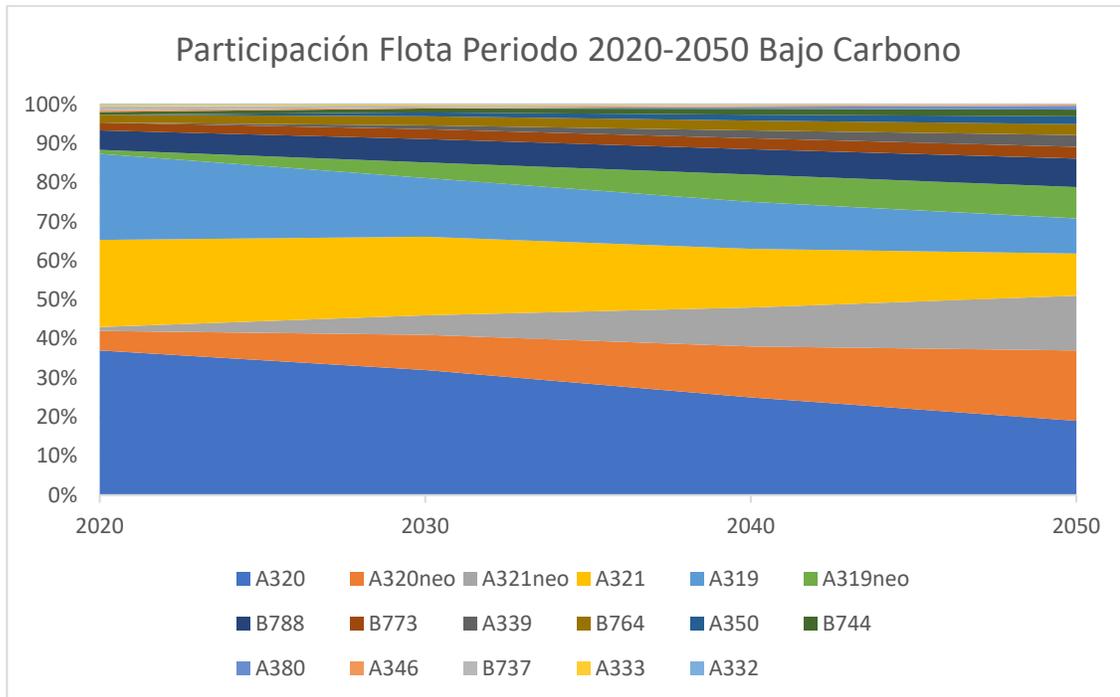


Figura 3: Escenario Bajo Carbono de la flota aérea en Chile 2020-2050.

Tabla 8: Escenario Conservador de la flota aérea en Chile 2020-2050.

Modelo	2020	2030	2040	2050
A320	37	35	30	25
A320neo	5	7	10	15
A321neo	1	2	5,5	9
A321	22	21	18	13
A319	22	19	15	11
A319neo	1	2,5	4,5	6,5
B788	5	5,5	6	6,3
B773	2	2	2,3	2,6
A339	0	1	2	3
B764	2	2,3	2,5	2,8

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

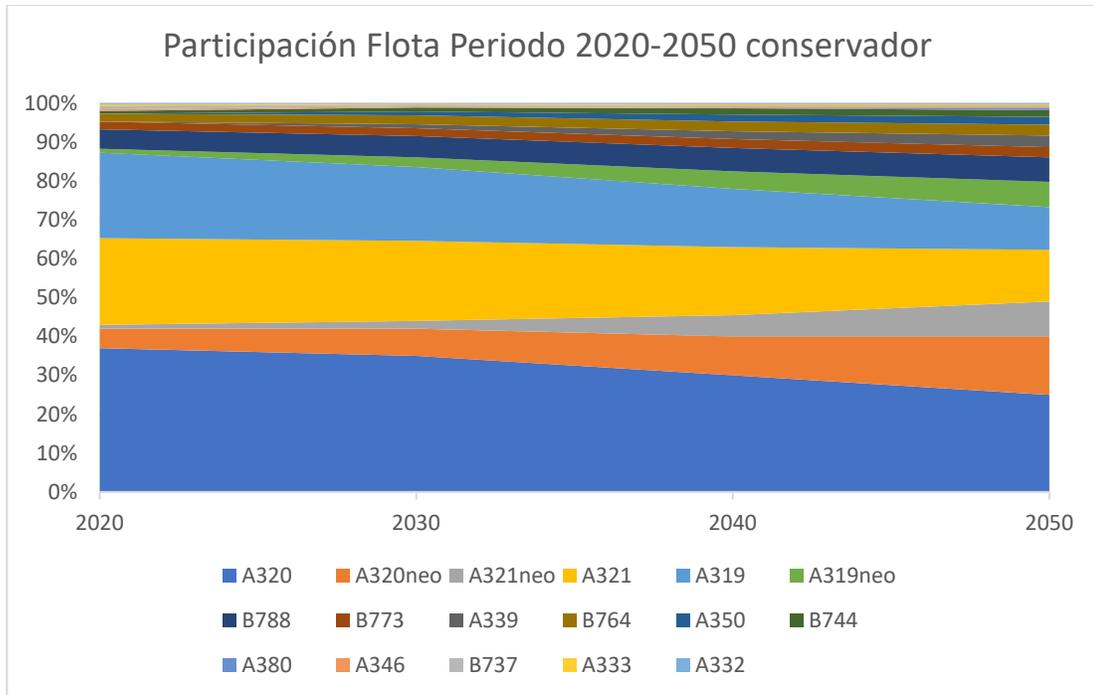


Figura 4: Escenario Conservador de la flota aérea en Chile 2020-2050.

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

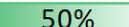
A continuación, se reportan los factores de emisión de todos los compuestos obtenidos para transporte ferroviario, considerando movilidad de pasajeros y carga.

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:

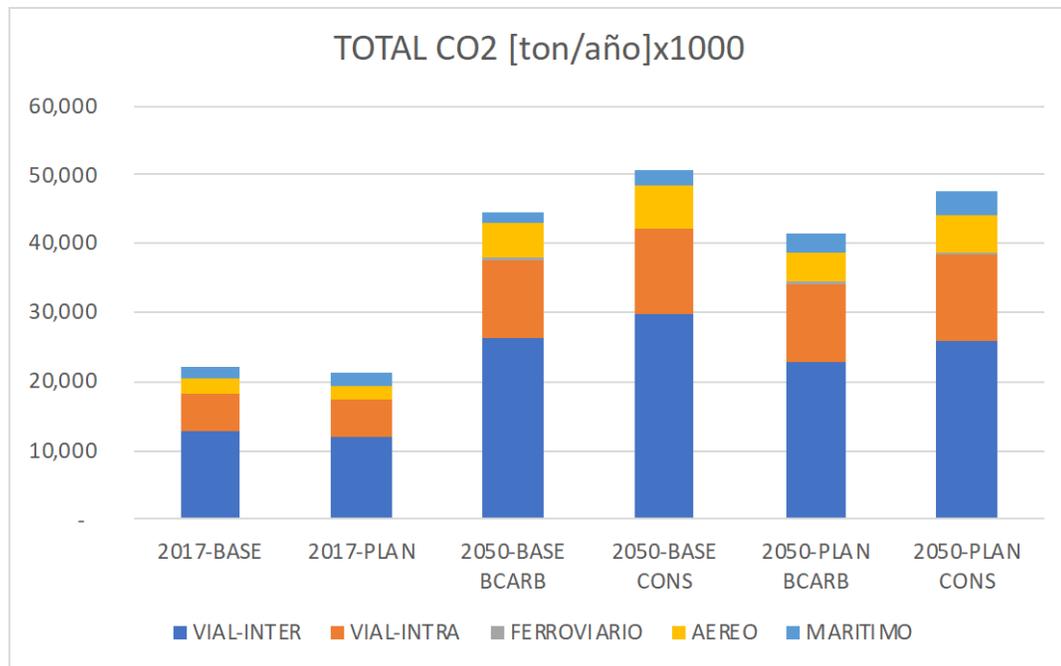


Figura 5: Emisiones totales de CO₂

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:

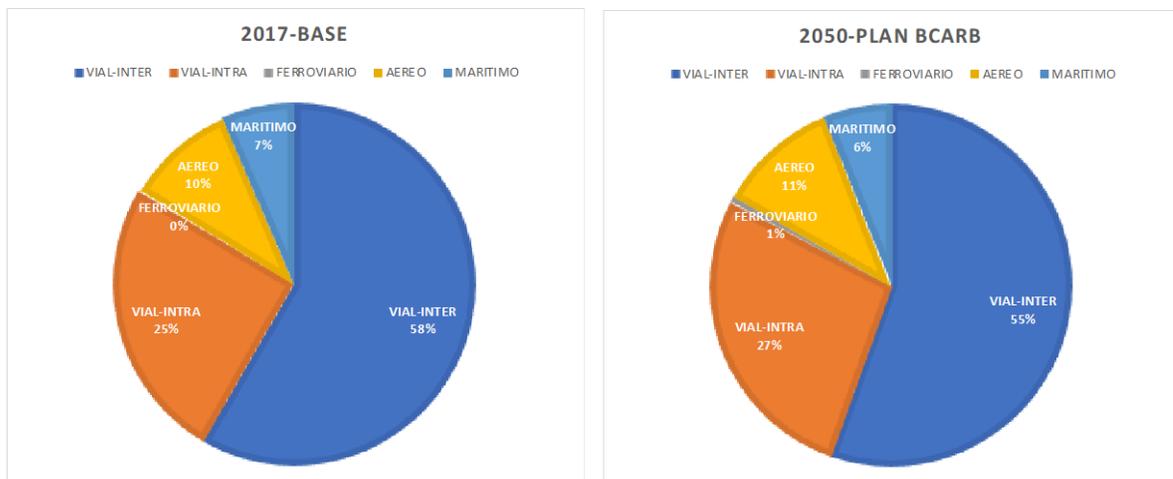


Figura 6: Proporción emisiones de CO₂ año 2017 y 2050 por modo de transporte

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:

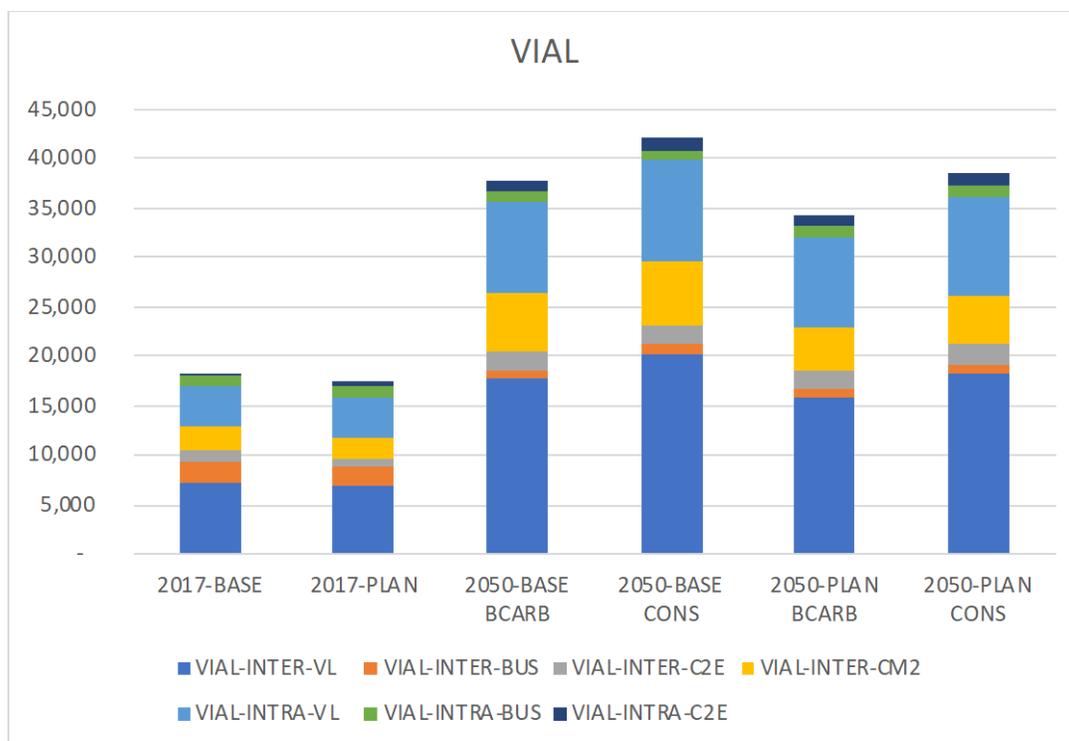


Figura 7: Proporción emisiones de CO₂ año 2017 modos de transporte vial.

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:

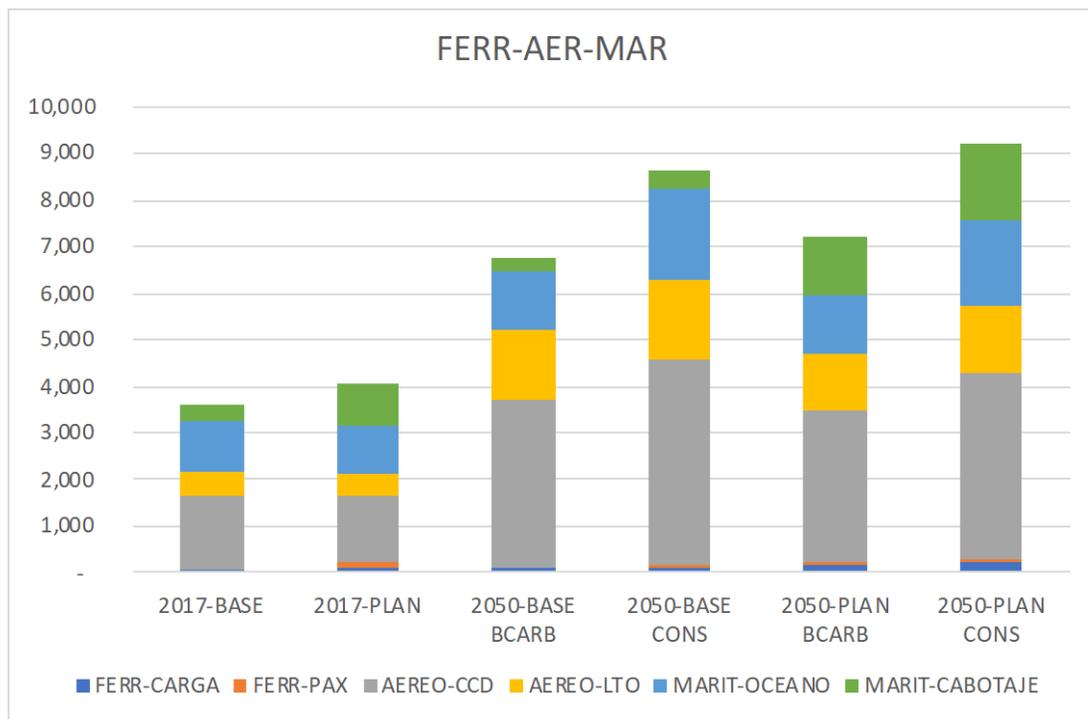


Figura 8: Proporción entre modos de transporte para CO₂

4.2 Emisiones de material particulado MP_{2.5}

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:

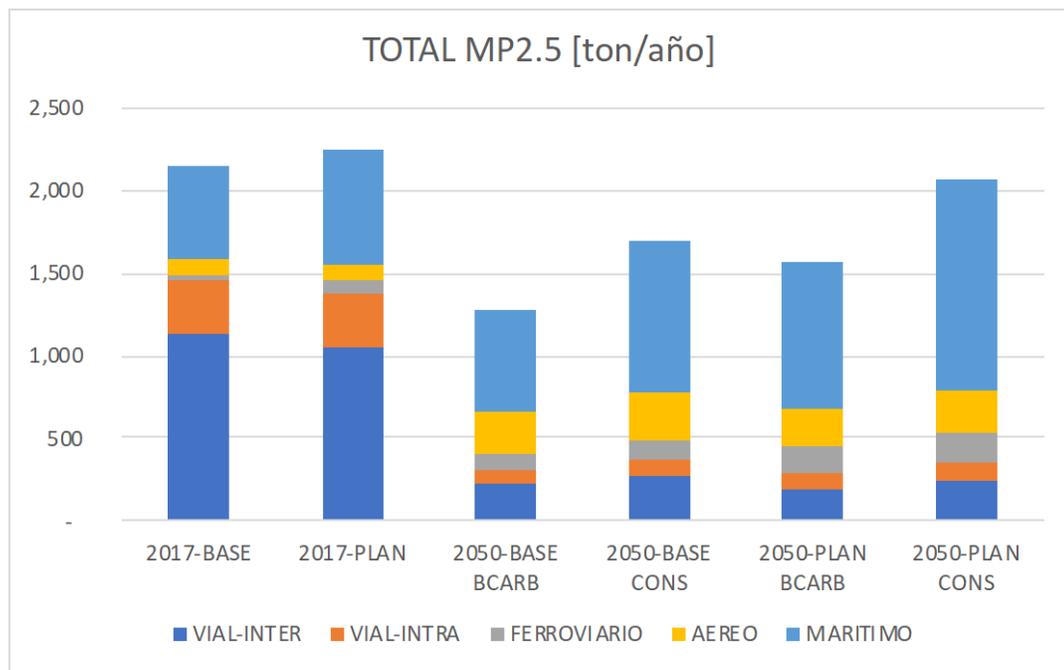


Figura 9: Emisiones totales de MP_{2.5}

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:

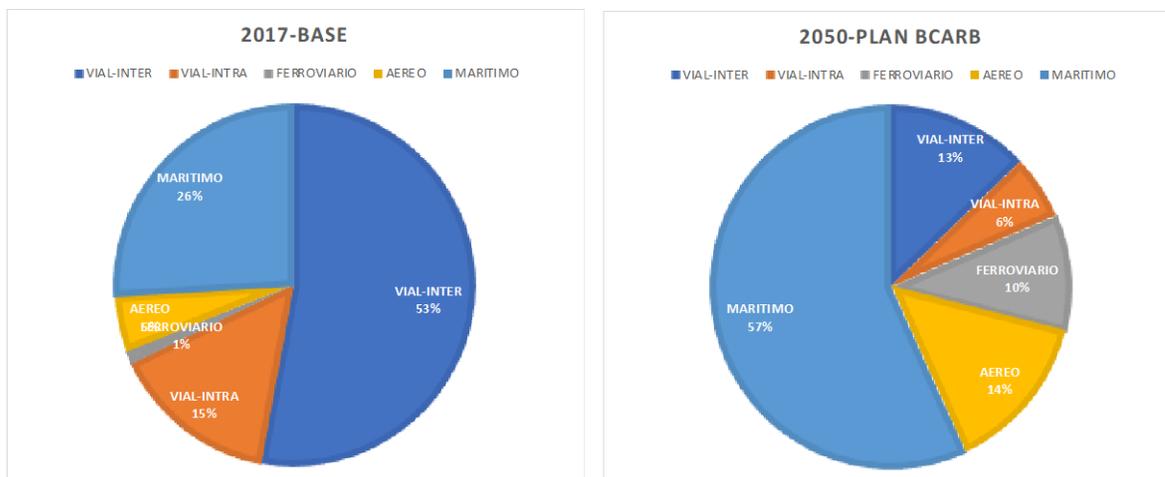


Figura 10: Proporción emisiones de MP_{2.5} año 2017 y 2050, por modo de transporte.

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:

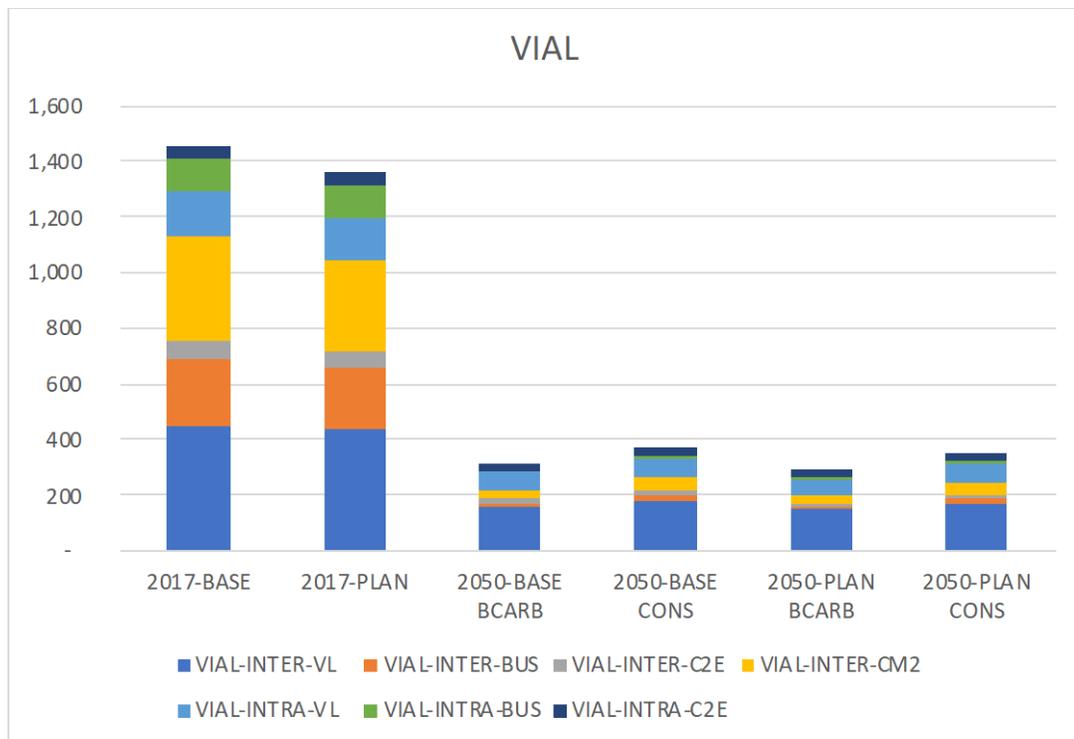


Figura 11: Proporción emisiones de MP_{2.5} año 2017 modos de transporte vial

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:

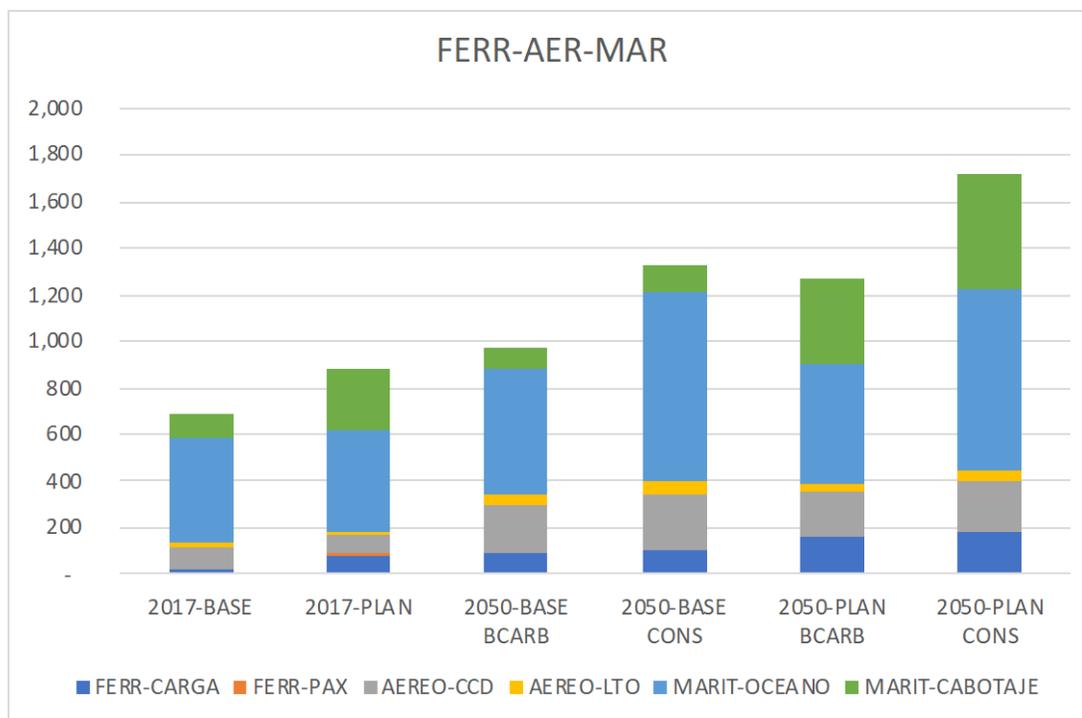


Figura 12: Proporción entre modos de transporte para MP_{2.5}

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:

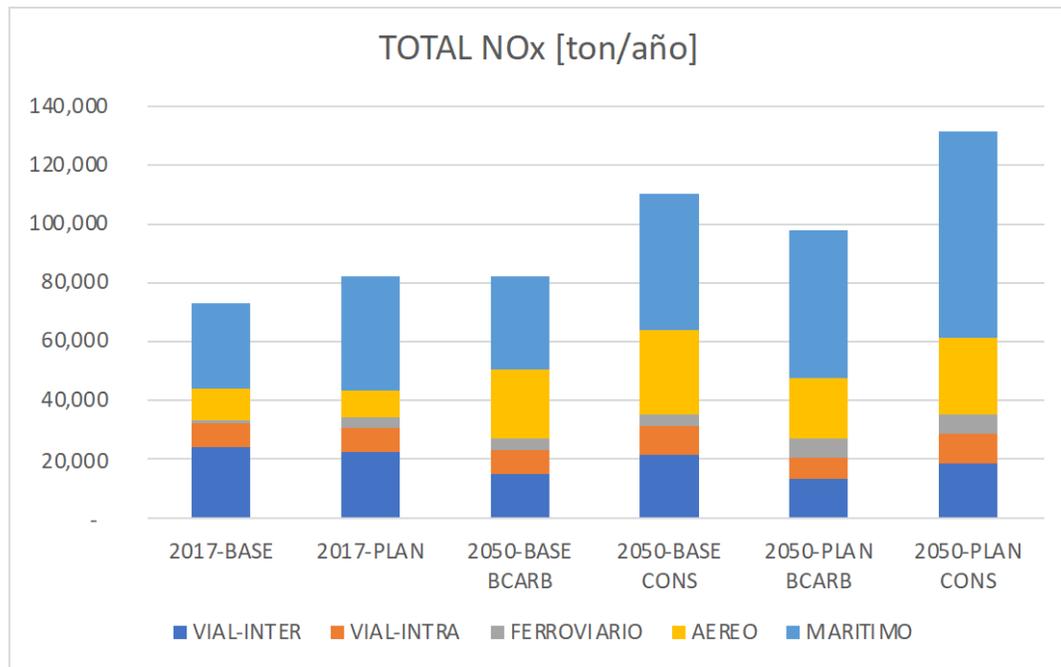


Figura 13: Emisiones totales de NOx

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:

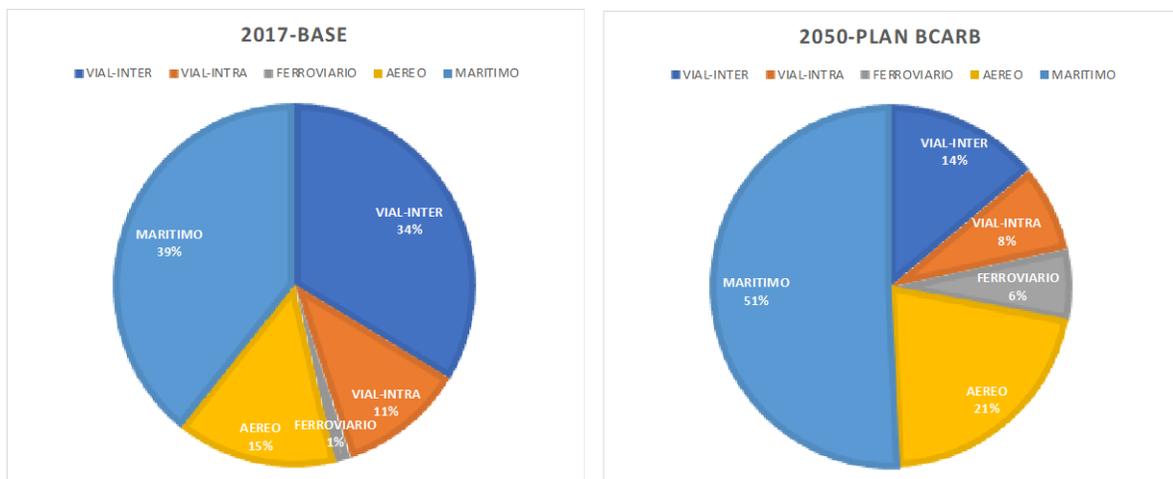


Figura 14: Proporción emisiones de NOx año 2017 y 2050, por modo de transporte

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:

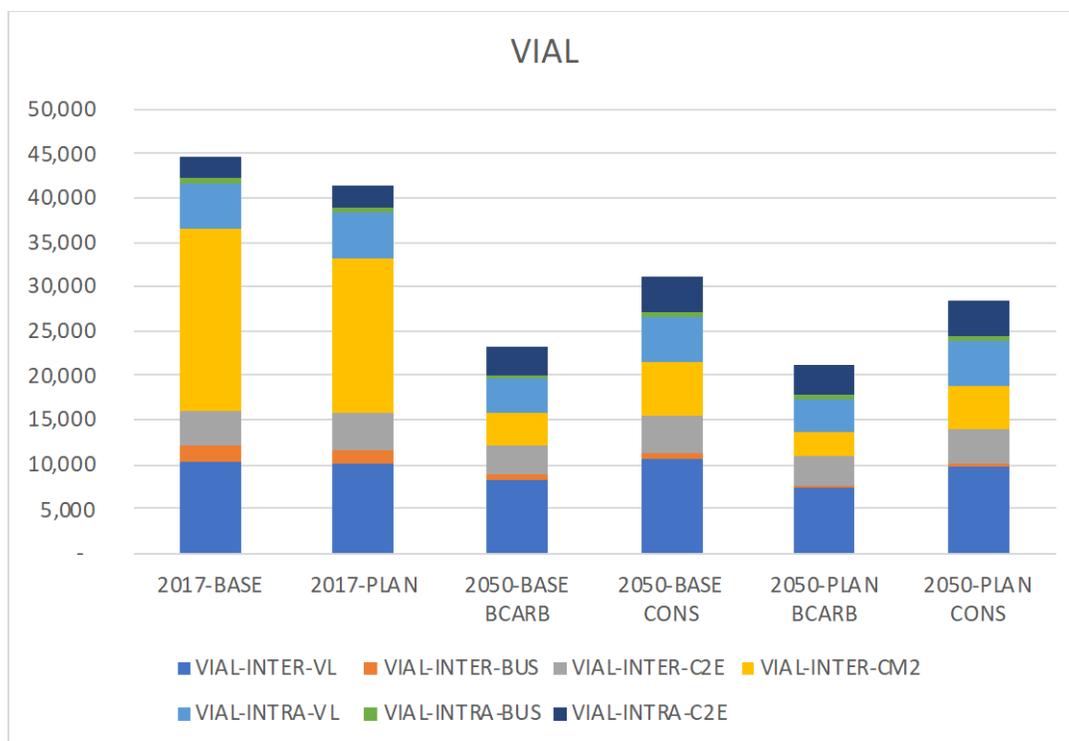


Figura 15: Proporción emisiones de NOx año 2017 modos de transporte vial

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:

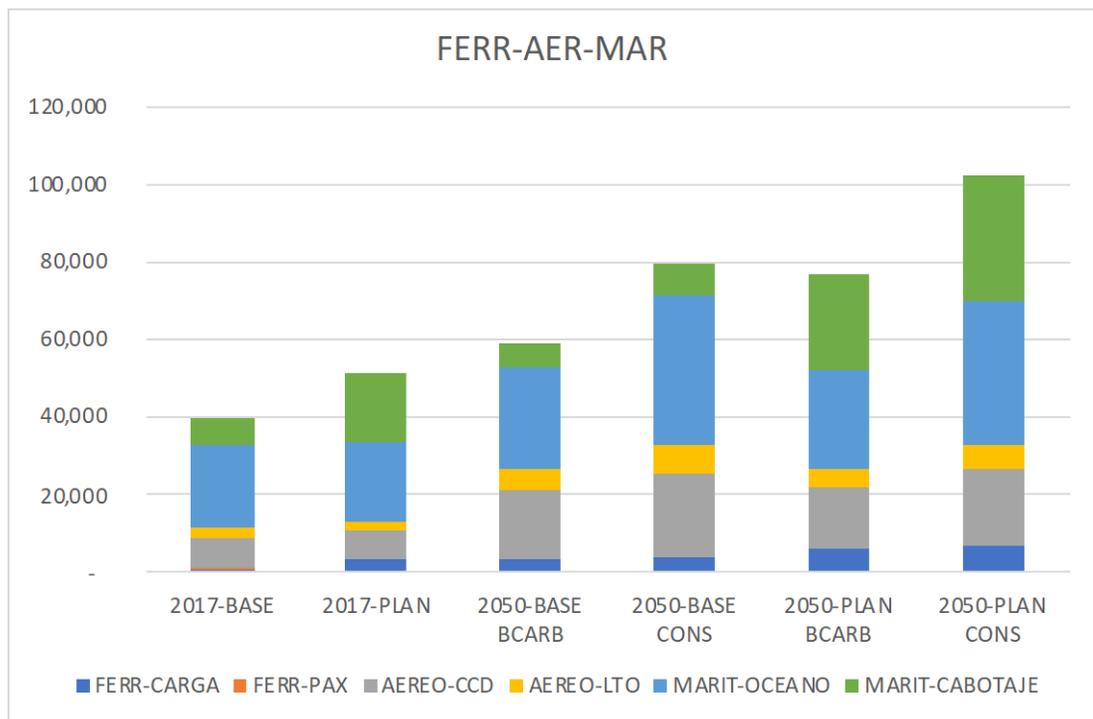


Figura 16: Proporción entre modos de transporte para NOx

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:

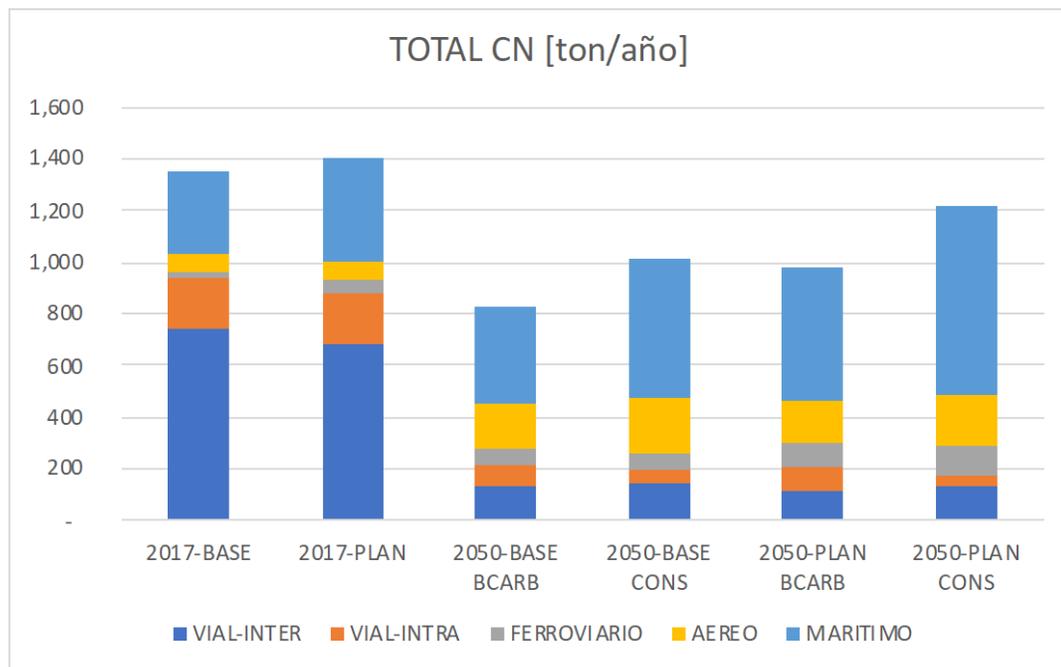


Figura 17: Emisiones totales de CN

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:

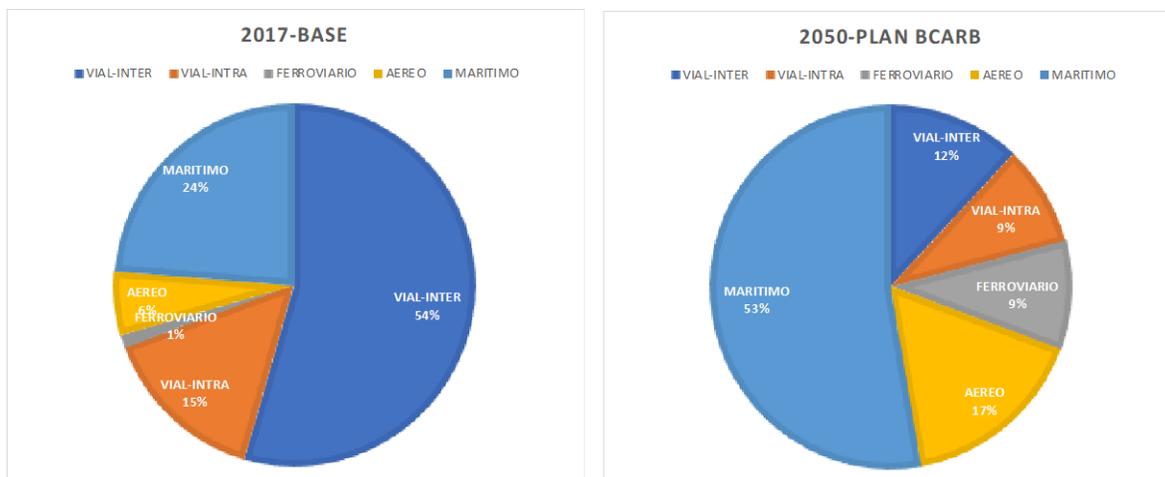


Figura 18: Proporción emisiones de CN año 2017 y 2050, por modo de transporte

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:

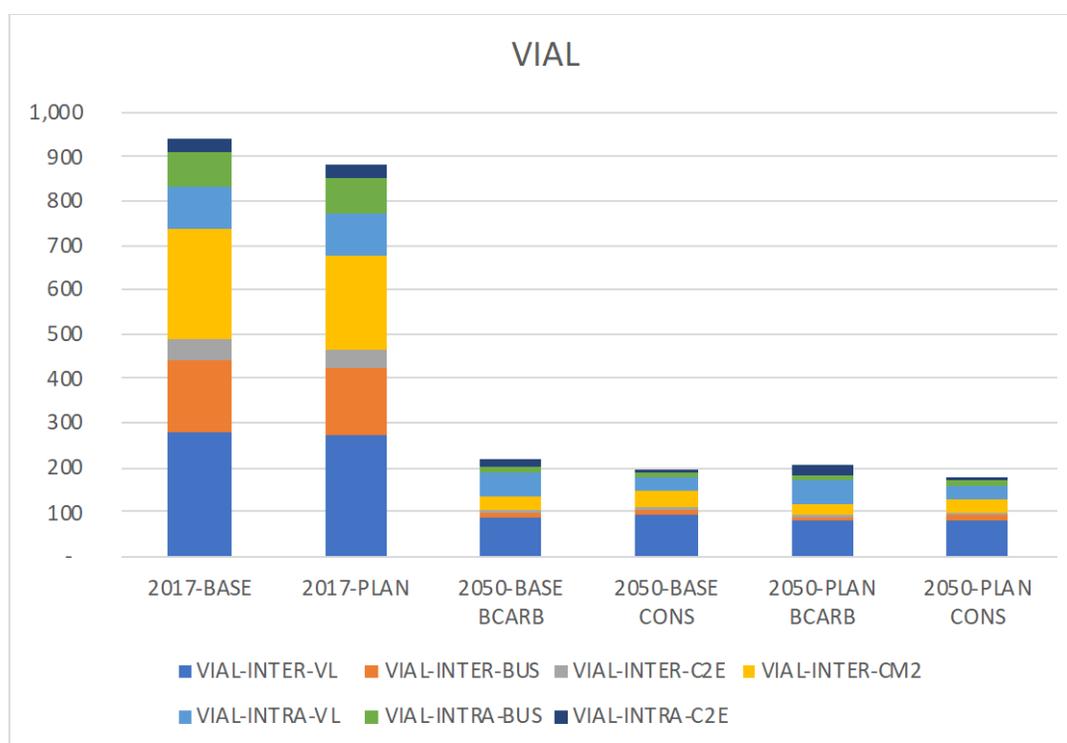


Figura 19: Proporción emisiones de CN año 2017 modos de transporte vial

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:

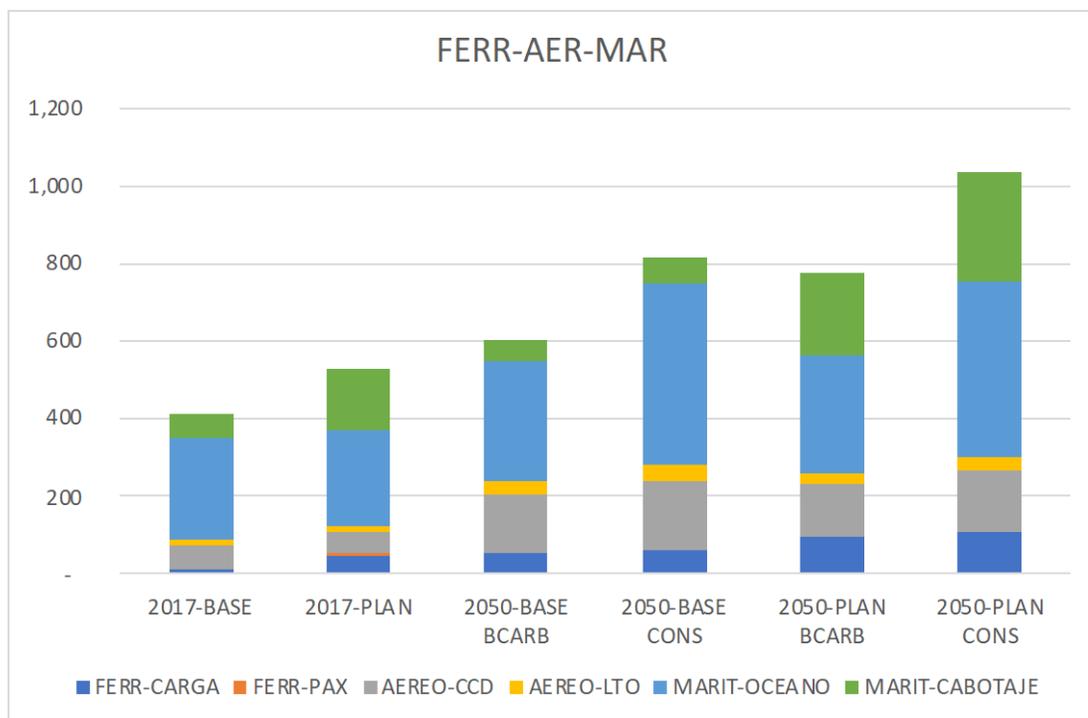


Figura 20: Proportión entre modos de transporte para CN

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.

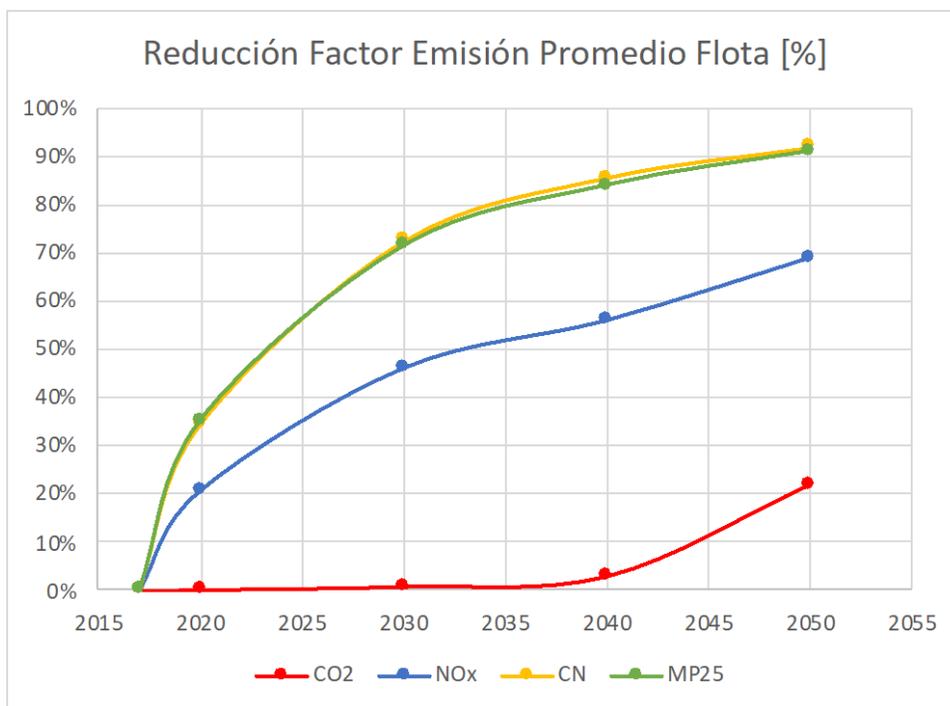


Figura 21: Tendencias en la reducción de factores de emisión promedio.

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.

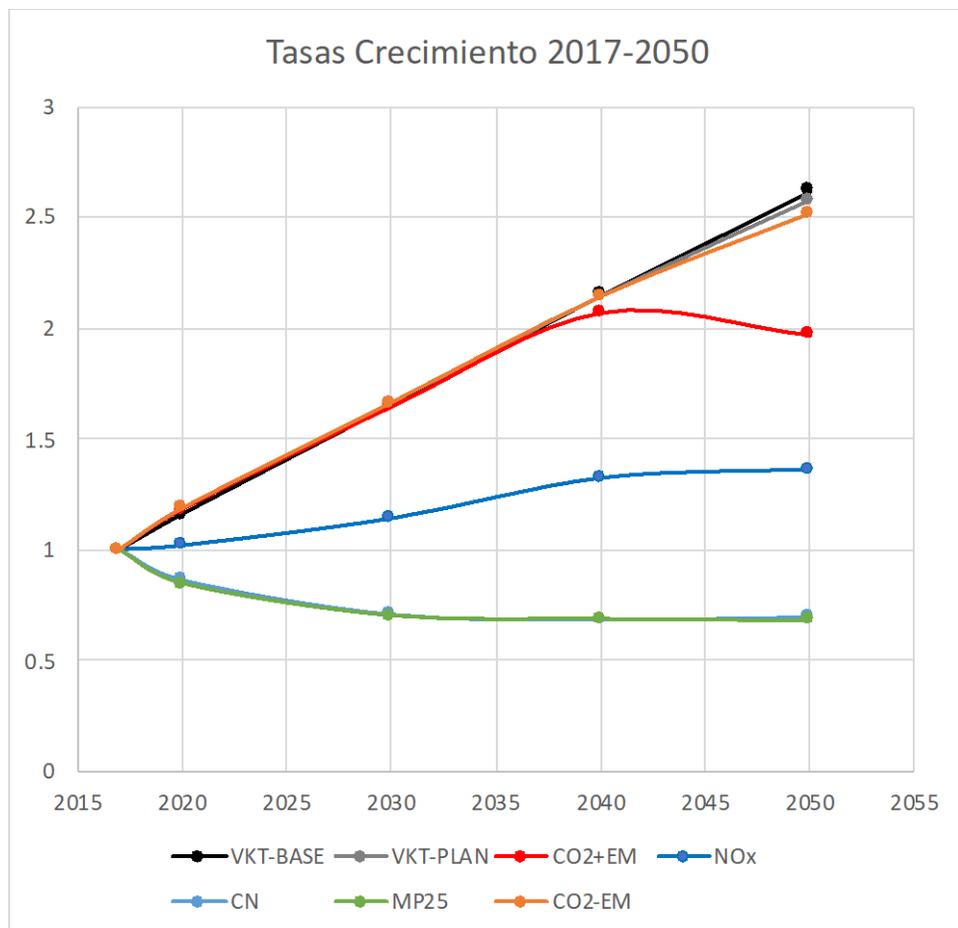


Figura 22: Tasas de crecimiento 2017-2050 de movilidad y emisiones anuales.

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%.

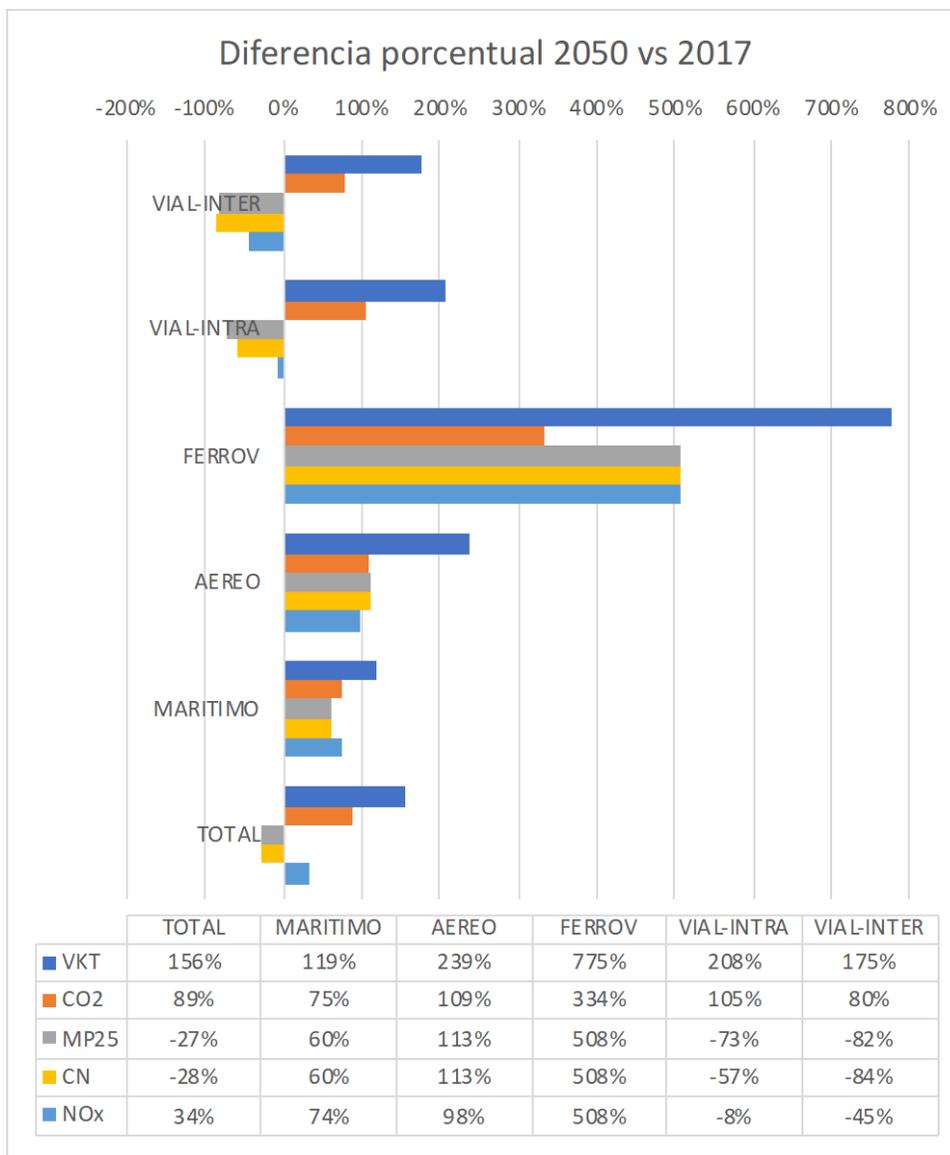


Figura 23: Diferencia porcentual entre situación Plan Bajo Carbono 2050 y caso base 2017.

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.

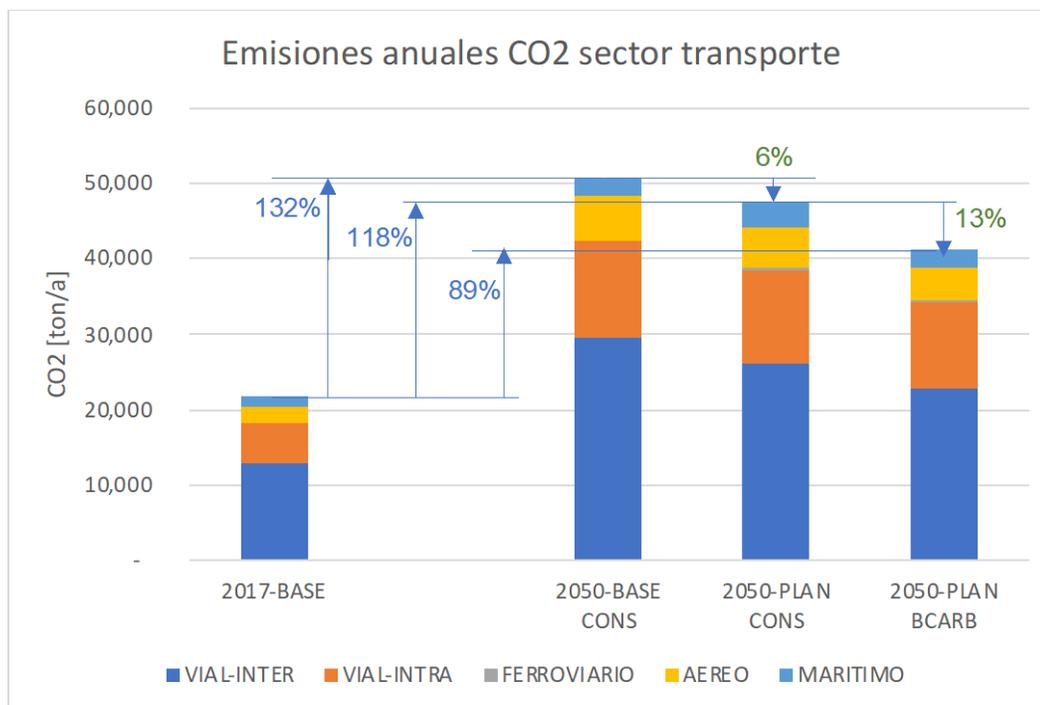


Figura 24: Emisiones anuales CO₂

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

CO2 [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.

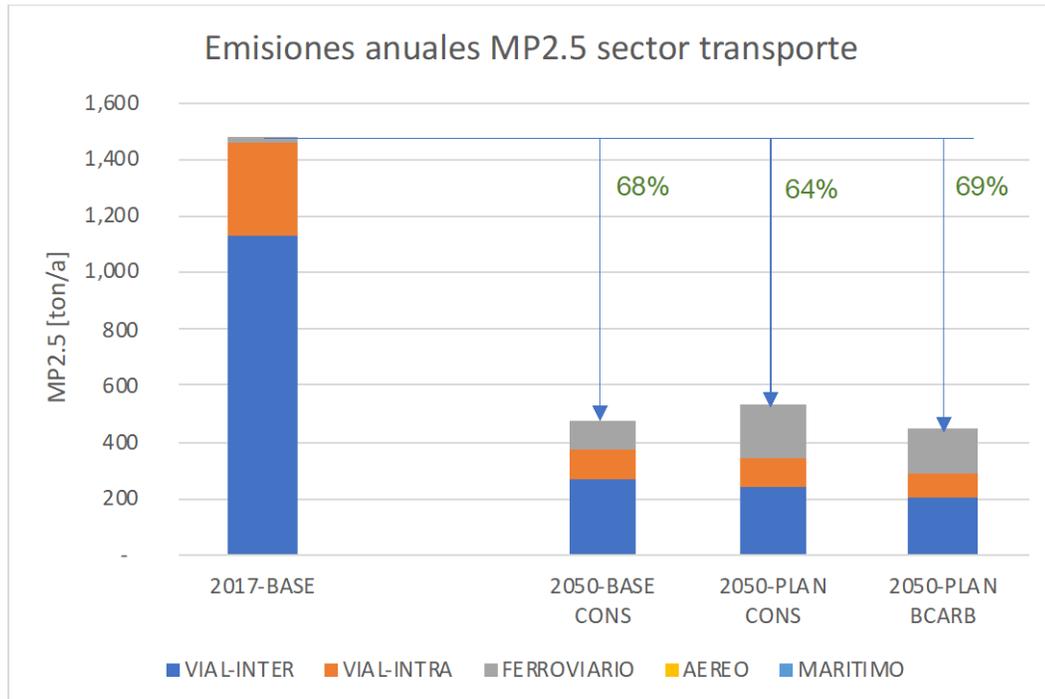


Figura 25: Emisiones anuales MP2.5

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.

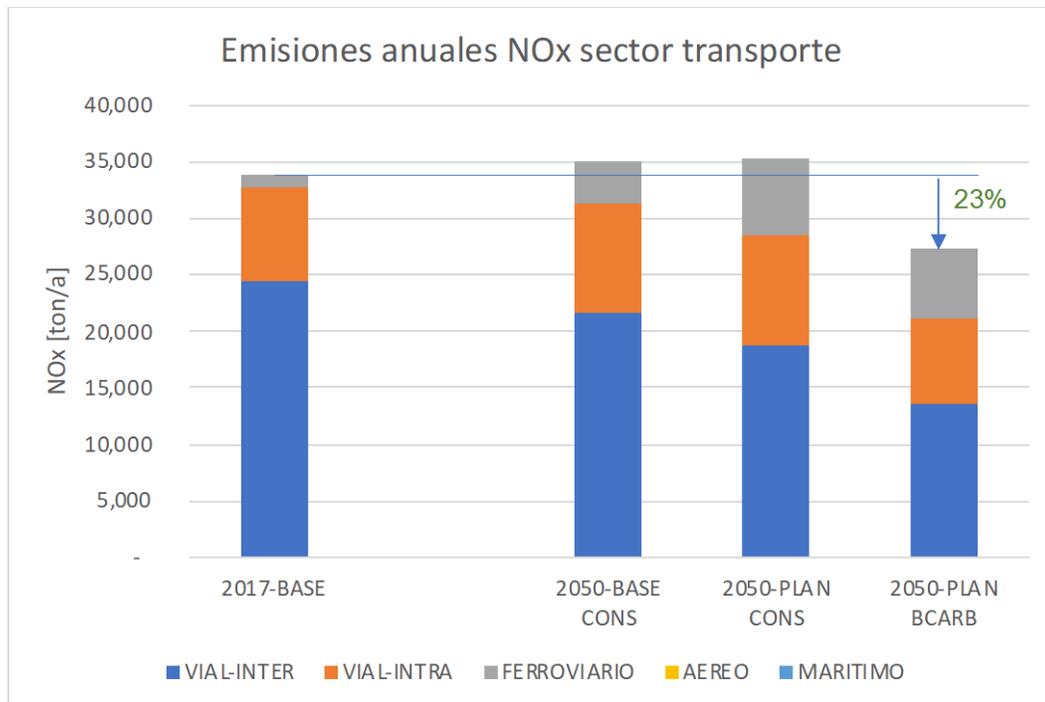


Figura 26: Emisiones anuales NOx

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. **Farías, 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.