



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE MITIGACIÓN DEL CAMBIO  
CLIMÁTICO EN CHILE CON RESPECTO AL OBJETIVO  
ESTABLECIDO EN EL ACUERDO DE PARÍS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL

EDUARDO ARIEL LOYOLA AVILÉS

PROFESOR GUÍA:  
ALBERTO DE LA FUENTE STRANGER

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JANNIK HAAS  
MARCELA MUNIZAGA MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE  
2019

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL  
TÍTULO DE: Ingeniero Civil  
POR: Eduardo Ariel Loyola Avilés  
FECHA: 13/09/2019  
PROFESOR GUÍA: Alberto de la Fuente Stranger

## EVALUACIÓN DE ESCENARIOS DE MITIGACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN CHILE CON RESPECTO AL OBJETIVO DEFINIDO EN EL ACUERDO DE PARÍS

El año 2015 la mayor parte de los países miembros de la ONU acordó en París el objetivo de "mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C". Esta meta determina un presupuesto limitado de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente CO<sub>2</sub>, que las actividades humanas pueden permitirse hasta antes del 2100. En base a este límite, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) desarrolló una serie de trayectorias de emisiones compatibles con un calentamiento global de 1,5 °C, según las cuales durante la década del 2030 las emisiones anuales de GEI deben reducirse a la mitad y alrededor del 2050 deben llegar a un valor neto igual a cero.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar escenarios que contemplan medidas de mitigación en la generación de electricidad y en el transporte de pasajeros en Chile, estimando y comparando los niveles de emisiones de GEI resultantes con los escenarios compatibles con el objetivo global de 1,5 °C de aumento en la temperatura superficial del planeta. Los escenarios evaluados consideran el programa de retiro gradual de centrales termoeléctricas en base a carbón hasta el 2040, el reemplazo gradual de los buses del transporte urbano de pasajeros hasta el 2040, la electrificación de vehículos livianos, el aumento en la tasa de ocupación de vehículos particulares y el aumento en el uso del transporte público.

Se concluye que el programa de retiro de centrales termoeléctricas en base a carbón, que plantea su cierre total al 2040, permite reducir un 25% del total nacional de emisiones acumuladas en el período 2020-2050. En el sector transporte, por otra parte, se obtiene que las medidas enfocadas en el transporte público de pasajeros no impiden que el nivel de emisiones de GEI del sector continúe aumentando, a causa del incremento sostenido en el uso de automóvil y de vehículos de carga. Esta tendencia al alza se invierte solamente en los escenarios que consideran la rápida electrificación del parque de vehículos livianos.

Finalmente, el conjunto de medidas analizadas permite estabilizar las emisiones nacionales de GEI, hasta el año 2030, en un nivel cercano al límite superior de la zona de compatibilidad con 1,5 °C de calentamiento. Sin embargo, los escenarios descritos no muestran un descenso que acerque a Chile a convertirse en un país carbono neutral en el mediano plazo. Por lo tanto, para lograr una reducción en las emisiones de GEI compatible con el objetivo global, se requieren esfuerzos de mitigación adicionales en el transporte y en otros sectores importantes como la agricultura y los procesos industriales.

- *There are ways of preventing this grim future, or at least making it a lot less dire. But the catch is that these also involve changing everything.*

Naomi Klein

## Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1.	Motivación.....	1
1.2.	Objetivos.....	2
1.2.1.	Objetivo General.....	2
1.2.2.	Objetivos Específicos.....	2
1.3.	Estructura del trabajo de título.....	2
2.	Revisión Bibliográfica.....	3
2.1.	Cambio climático, causas y consecuencias.....	3
2.1.1.	Antropoceno.....	3
2.1.2.	Riesgos e impactos del cambio climático.....	4
2.2.	Contexto político: Acuerdo de París.....	6
2.2.1.	Definición del límite de 1,5 °C.....	6
2.2.2.	Contribuciones determinadas a nivel nacional.....	7
2.3.	Trayectorias globales compatibles con la meta del Acuerdo de París.....	8
2.3.1.	Tecnologías de captura de carbono.....	9
2.4.	Inventarios nacionales de emisiones de GEI.....	12
2.4.1.	Sector Energía.....	14
2.5.	Compromisos de Chile a la carbono neutralidad global.....	15
2.5.1.	Política energética de Chile 2050.....	15
2.5.2.	Contribuciones determinadas a nivel nacional.....	15
3.	Inventario de emisiones Chile 1990 – 2016.....	16
3.1.	Evolución de las emisiones totales de GEI entre 1990 y 2006.....	16
3.2.	Sector Energía.....	18
3.2.1.	Industrias de la energía.....	20
3.2.2.	Transporte.....	23
4.	Mitigación en la generación eléctrica.....	25
4.1.	Retiro de centrales a carbón del Sistema Eléctrico Nacional.....	25
4.1.1.	Escenario A1.....	25
4.1.2.	Escenario A2.....	26
4.1.3.	Escenario A3.....	27
4.1.4.	Escenario A4.....	27

4.1.5.	Escenario A5.....	28
4.1.6.	Escenario A6.....	28
4.2.	Emisiones de GEI en base al programa cierre de centrales termoeléctricas a carbón ....	30
4.2.1.	Factores de emisión .....	30
4.2.2.	Emisiones de GEI en base al programa de descarbonización .....	32
5.	Mitigación en el transporte terrestre.....	34
5.1.	Modelo MAPS Chile .....	34
5.1.1.	Transporte terrestre.....	34
5.1.2.	Transporte marítimo .....	39
5.1.3.	Transporte aéreo .....	39
5.2.	Línea base .....	41
5.3.	Escenarios de mitigación en el transporte terrestre de pasajeros.....	43
5.3.1.	Aumento en el uso del transporte público (escenario TP20).....	43
5.3.2.	Aumento en la tasa de ocupación vehicular (escenario TO1) .....	43
5.3.3.	Electrificación total del transporte público urbano al 2040 (escenario TPE).....	43
5.3.4.	Electrificación del mercado de vehículos livianos (escenario VE) .....	44
5.3.5.	Electrificación total del transporte urbano de pasajeros (escenario TPE + VE) .....	46
5.3.6.	Todas las medidas de mitigación del transporte urbano de pasajeros (escenario ambicioso) .....	46
5.4.	Emisiones de GEI bajo escenarios de mitigación .....	47
6.	Evaluación de escenarios de mitigación.....	50
6.1.	Criterios de evaluación .....	50
6.1.1.	Trayectorias de emisiones propuestas para Chile como contribución a la meta global de mitigación .....	50
6.1.1.	Trayectorias de emisiones netas considerando el sector UTCUTS.....	51
6.1.2.	Contribución determinada a nivel nacional (NDC).....	53
6.2.	Escenario Business As Usual.....	54
6.2.1.	Emisiones compatibles con la meta de 1,5 °C de calentamiento.....	54
6.2.2.	NDC.....	55
6.3.	Evaluación de escenarios con respecto a las trayectorias compatibles con la meta de 1,5 °C	57
6.4.	Evaluación de escenarios con respecto a las emisiones netas compatibles con la meta de 1,5 °C	60
6.5.	Evaluación de escenarios con respecto al Compromiso Determinado a nivel Nacional (NDC).....	63
7.	Discusión .....	65

7.1.	Inventario nacional de emisiones 1990-2016 .....	65
7.2.	Mitigación en la generación eléctrica .....	65
7.3.	Mitigación en el transporte terrestre .....	66
8.	Conclusiones.....	67
9.	Bibliografía.....	68
Anexos.....		70
Anexo A: Cronograma de retiro de centrales a carbón .....		70
Anexo B: Proyecciones de la demanda de transporte.....		71
B.1.	PKM urbano caminero .....	71
B.2.	TKM caminero .....	72
B.3.	PKM aéreo.....	74

# 1. Introducción

## 1.1. Motivación

Desde el comienzo de la Revolución Industrial el promedio combinado de la temperatura media de la tierra y del océano en el planeta ha aumentado sostenidamente. Actualmente dicha temperatura crece a una tasa de casi  $0,2^{\circ}\text{C}$  por década, alcanzando un aumento promedio de  $0,87^{\circ}\text{C}$  en lo que va de la década de los 2010s con respecto al período 1861-1880, mientras que el año 2015 por primera vez se registró un aumento de más de  $1^{\circ}\text{C}$  en la media mensual con respecto al mismo período (Millar, y otros, 2017). Hoy en día es aceptado que dicho calentamiento se debe al incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera producto de las emisiones antrópicas, principalmente de  $\text{CO}_2$  proveniente del consumo de combustibles fósiles para la generación de energía (IPCC, 2013). Desde 1850 la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera ha aumentado de 278 ppm a más de 400 ppm, cantidad superada por primera vez el año 2015 (Dlugokencky & Tans, 2018), siendo el principal GEI que ha influido sobre el balance de energía en la Tierra debido a su elevado tiempo de residencia, según el cual tardaría cientos de miles de años en removerse de forma natural todo el  $\text{CO}_2$  emitido por el ser humano a la atmósfera (IPCC, 2013).

De continuar la tendencia en las emisiones y sin realizar esfuerzos para limitarlas, al año 2100 se proyecta una concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera de a lo menos 670 ppm y un aumento en la temperatura media superficial de entre  $2,6$  y  $4,8^{\circ}\text{C}$  en el período 2081-2100 con respecto al período 1861-1880 (IPCC, 2013), escenario que provocaría impactos graves sobre la vida tal como la conocemos en el planeta. En este contexto, el año 2015 representantes de 195 naciones del mundo se reunieron en la 21ª Conferencia de las Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), realizada en París (COP21), en la cual sus miembros comprometieron medidas para reducir sus emisiones con el objetivo de “mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de los  $2^{\circ}\text{C}$  con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a  $1,5^{\circ}\text{C}$  con respecto a los niveles preindustriales” (CMNUCC, 2015). Esta meta obliga a detener el aumento en las emisiones anuales entre los años 2020 y 2030 y disminuirlas hasta alcanzar emisiones negativas durante la segunda mitad de este siglo (Schleussner, 2016).

Lo anterior solo se logrará implementando cambios radicales en sectores como la agricultura, la silvicultura, la construcción, la industria, el transporte y principalmente la energía, para disminuir las emisiones de carbono desde 52 Gt  $\text{CO}_2\text{eq/año}$ , registrados el 2016, a un nivel entre 25 y 30 Gt  $\text{CO}_2\text{eq/año}$  el 2030 (IPCC, 2018). De los sectores económicos mencionados el mayor potencial de reducción de emisiones se presenta en los sectores energético e industrial, con 10 Gt  $\text{CO}_2\text{eq}$  y 5,4 Gt $\text{CO}_2\text{e}$  anuales respectivamente, dentro de un potencial total de 33 Gt $\text{CO}_2\text{e}$  anuales sumando el aporte de todos los sectores a un costo bajo los US\$100/t $\text{CO}_2\text{e}$  (UNEP, 2017). En este contexto, la recomendación para Latinoamérica es satisfacer toda nueva demanda con energías renovables a partir del 2020, aumentando la capacidad hidroeléctrica complementada con nuevas centrales de energía eólica, solar y geotérmica, y dismantelar todas las plantas de producción de combustibles fósiles diferentes al gas antes del 2030 (Vergara, 2016). En el caso chileno, actualmente la capacidad total de generación eléctrica instalada en Chile es de 22,7 GW, de los cuales un 18,7% corresponde a energías renovables no convencionales (ERNC) y un 27,3% a hidroeléctricas de

embalse y de pasada, mientras que el objetivo al 2035 es que las energías renovables en conjunto constituyan el 60% de la generación y un 70% al 2050 (MINENERGIA, 2016).

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo General**

El objetivo general de este trabajo es evaluar distintos escenarios de mitigación del cambio climático en Chile, en la industria de la generación eléctrica y en el transporte terrestre de pasajeros, en función de su efecto sobre el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), en el contexto del objetivo establecido en el Acuerdo de París: mantener el aumento de la temperatura de la superficie terrestre en torno a 1,5 °C con respecto a la era pre industrial.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- a) Caracterizar las fuentes de emisiones de GEI en Chile, identificando sectores críticos y posibilidades de mitigación.
- b) Definir objetivos de mitigación para Chile compatibles con las metas establecidas a nivel mundial.
- c) Evaluar los compromisos y medidas asumidos por Chile, en base a los objetivos definidos anteriormente.
- d) Evaluar escenarios de mitigación ambiciosa en el transporte terrestre de pasajeros adicionales a las medidas ya comprometidas.

## **1.3. Estructura del trabajo de título**

En primer lugar, en el capítulo 2, se presenta una revisión bibliográfica con el objetivo de establecer el estado del arte en lo que respecta a los objetivos globales y nacionales de mitigación del cambio climático. En el capítulo 3, se analizan las tendencias históricas de las emisiones nacionales de GEI para determinar las actividades más relevantes en el total de emisiones y, en particular, determinar la importancia de las categorías de la generación eléctrica y el transporte. Posteriormente, en el capítulo 4, se describen los escenarios que contemplan medidas de mitigación comprometidas en el sector de la generación eléctrica y se estiman sus impactos, asimismo, en el capítulo 5 se repite este análisis para el sector transporte. En el capítulo 6 se evalúan los escenarios de mitigación en relación a los objetivos locales y globales determinados. Por último, en el capítulo 7 se presenta la discusión y en el capítulo 8 las conclusiones de este trabajo.

## **2. Revisión Bibliográfica**

En este capítulo se presenta una revisión del consenso mundial, tanto científico como político, en relación a las causas y consecuencias del cambio climático, así como a los límites y objetivos definidos para detener el calentamiento global.

### **2.1. Cambio climático, causas y consecuencias**

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define el calentamiento global como un aumento en la temperatura combinada del aire y del mar, promediado sobre toda la superficie terrestre y en un período de 30 años. Generalmente este aumento se expresa en relación al período 1850-1900, considerado como una representación de la era pre industrial (IPCC, 2013). Hoy en día, este calentamiento es parte de una serie de cambios en el sistema Tierra, que ocurren a tasas sin precedentes, dando origen a una nueva época geológica que sucedería al holoceno, denominada antropoceno.

#### **2.1.1. Antropoceno**

Durante los 4.500 millones de años de existencia de la Tierra los cambios en el sistema planetario han sido forzados por variables astronómicas y geofísicas y por la dinámica interna del mismo. Sin embargo, durante las últimas seis décadas, la magnitud del impacto de la actividad humana sobre la tasa de cambio del sistema ha causado que su efecto predomine por sobre los factores naturales. Los cambios provocados por la especie humana se producen a una velocidad tal, que variables como la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera aumenta 500 veces más rápido que en el holoceno, la acidificación de la superficie oceánica ocurre 70 veces más rápido que durante una deglaciación y la temperatura aumenta 170 veces más rápido que el promedio del holoceno (Gaffney & Steffen, 2017).

Esta velocidad sin precedentes y la escala global del impacto de la influencia humana sobre el sistema terrestre ha llevado a interpretar que la Tierra ha entrado a una nueva época geológica llamada antropoceno. Esta época sería sucesora del holoceno, que se inició luego de la última glaciación hace 11.700 años, y no estaría gobernada por el régimen de ciclos glacial-interglaciales característicos del cuaternario reciente, sino que dominada por los desbalances provocados por la acción humana en los equilibrios de escala geológica.

En el caso particular de los gases de efecto invernadero, se estima que durante los últimos 7.000 años la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera se mantuvo en torno a 280 ppm, variando lentamente a una tasa de -0,1 ppm/siglo. En contraste, en el período 1970-2015 esta concentración ha aumentado a una tasa promedio de 166 ppm/siglo, superando las 400 ppm en la actualidad. La tasa de variación de concentración de metano (CH<sub>4</sub>), por su parte, ha aumentado de un promedio de 2 ppb/siglo durante el holoceno a 575 ppb/siglo en el período 1984-2015, pasando de 722 ppb en el año 1750 a 1810 ppb el 2012 (Gaffney & Steffen, 2017).

Como consecuencia, desde 1970 la temperatura media global ha estado creciendo a una tasa de 1,7 °C por siglo, mientras que durante los últimos 7.000 años se estima una disminución de 0,01 °C/siglo. El pH de los océanos ha disminuido 0,1 unidades desde la era pre industrial, siendo el cambio más grande y rápido de los últimos 300 millones de años, cuando esta variación ocurría a

una tasa de entre 0,0014 y 0,0024 unidades de pH por año. Otro cambio reciente se observa en el nivel del mar, cuya variación media actualmente es la más rápida de los últimos 115.000 años, aumentando  $3,2 \pm 0,4$  mm/año (IPCC, 2013).

### 2.1.2. Riesgos e impactos del cambio climático

Se pueden identificar riesgos asociados al cambio climático en la disponibilidad de agua dulce, en los ecosistemas terrestres, en la física y química del océano, en los sistemas costeros, en la seguridad alimentaria, en la salud humana y en el turismo. Así mismo, el IPCC establece cinco “motivos de preocupación” (RFCs) que resumen los principales impactos y riesgos que el cambio climático causa sobre las personas, las economías y los ecosistemas. Cada uno de estos sistemas y RFCs tienen un nivel de riesgo que varía en función del aumento de la temperatura media de la tierra, como se observa en la Figura 1. En ella se compara el impacto de un calentamiento futuro de 1,5 °C y de 2 °C.

Los RFCs definidos son los siguientes (IPCC, 2018):

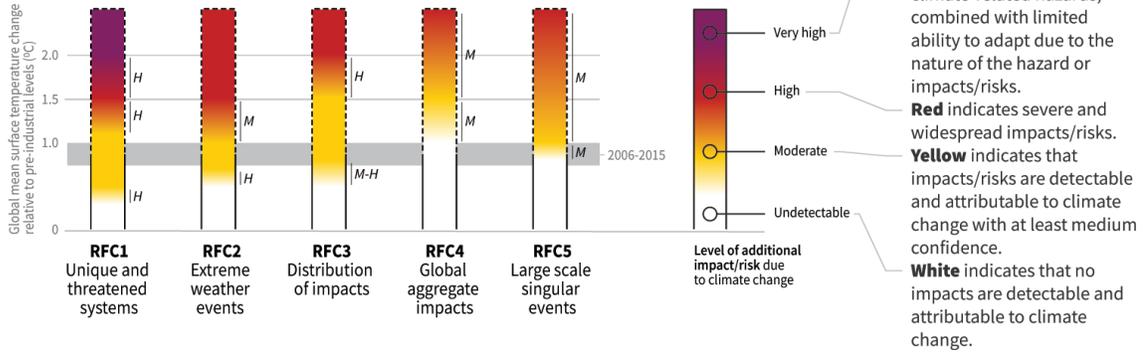
- **Sistemas únicos y amenazados (RFC1):** Sistemas ecológicos y humanos restringidos geográficamente y con un alto endemismo. Arrecifes de coral y glaciares de montaña son ejemplos de estos sistemas.
- **Eventos meteorológicos extremos (RFC2):** Riesgos/impactos producidos por olas de calor, tormentas, sequías, incendios, inundaciones y otros eventos extremos, sobre la salud humana, el sustento, los bienes y los ecosistemas.
- **Distribución de los impactos (RFC3):** Riesgos/impactos que afectan desproporcionadamente a un grupo particular, debido a la distribución desigual de peligros físicos asociados al cambio climático.
- **Impactos agregados globalmente (RFC4):** Degradación y pérdida de biodiversidad y ecosistemas a escala global.
- **Eventos singulares de gran escala (RFC5):** Grandes y abruptos cambios, a veces irreversibles, producto del calentamiento global, sobre ciertos sistemas. Ejemplo de ello es el derretimiento de las capas de hielo de Groenlandia y de la Antártica.

Algunos impactos de un calentamiento de 1,5 °C pueden ser irreversibles, como la pérdida de ecosistemas como los arrecifes de coral. Sin embargo, la mayoría de los riesgos son significativamente mayores en un escenario de calentamiento de 2 °C que en uno de 1,5 °C. Así, por ejemplo, la pérdida de arrecifes de coral será mayor al 99% en un escenario de 2 °C, mientras que con 1,5 °C de calentamiento sería de entre 70% y 90%. En cuanto a las consecuencias sociales, alcanzando un límite de 1,5 °C de calentamiento en vez de 2 °C, la población expuesta a la escasez de agua se reduciría a la mitad y se evitaría que hasta varios cientos de millones de personas queden expuestas a riesgos relacionados con el clima y susceptibles a la pobreza para 2050.

En el caso de Chile, se han identificado riesgos como la pérdida de biodiversidad, una reducción significativa de los recursos hídricos, aumento de enfermedades, pérdida de infraestructura, menor capacidad de generación eléctrica, desplazamiento de cultivos hacia la zona sur, mermas en el turismo y densificación de ciudades producto de la migración (MMA, 2016).

Five Reasons For Concern (RFCs) illustrate the impacts and risks of different levels of global warming for people, economies and ecosystems across sectors and regions.

### Impacts and risks associated with the Reasons for Concern (RFCs)



### Impacts and risks for selected natural, managed and human systems

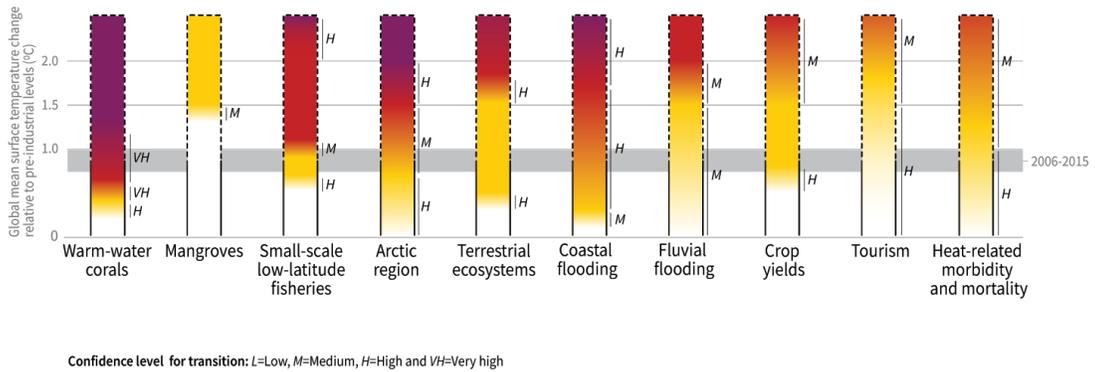


Figura 1: Riesgos e impactos del calentamiento global sobre los sistemas terrestres. Fuente: IPCC, 2018

## **2.2. Contexto político: Acuerdo de París**

En el año 1994 entra en vigencia la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), con el objetivo de “lograr la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropógenas peligrosas en el sistema climático”. La CMNUCC establece la Conferencia de las Partes (COP) como el órgano supremo encargado de examinar su cumplimiento y de tomar las decisiones necesarias para promover su eficaz aplicación. Para ello, la COP debe sesionar anualmente de forma ordinaria, lo cual ha ocurrido ininterrumpidamente desde la Primera Conferencia de las Partes realizada en Berlín en 1995.

En diciembre de 2015 se celebró en París la XXI Conferencia de las Partes de la CMNUCC (COP21), cuyo hito principal fue la firma del denominado Acuerdo de París. Este acuerdo tiene tres objetivos principales (CMNUCC, 2015, Art. 2 – 1.):

- a) "Mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales.”
- b) “Aumentar la capacidad de adaptación a los efectos adversos del cambio climático y promover la resiliencia al clima y un desarrollo con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.”
- c) “Situar los flujos financieros en un nivel compatible con un camino que conduzca a un desarrollo resiliente al clima y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero.”

### **2.2.1. Definición del límite de 1,5 °C**

La primera vez que se menciona un límite de 1,5 °C al calentamiento global es en el Acuerdo de Cancún, adoptado en la XVI Conferencia de las Partes de la CMNUCC (COP16) celebrada el 2010. En este documento se acuerda mantener el aumento de la temperatura media del planeta por debajo de 2 °C sobre niveles preindustriales, reconociendo la necesidad de examinar periódicamente la idoneidad de dicho objetivo, considerando la posibilidad de robustecerlo hasta un aumento de 1,5 °C en base a los mejores conocimientos científicos disponibles.

Posteriormente, la COP18 mandató a un “diálogo de expertos estructurado” (SED, por sus siglas en inglés), con el fin de evaluar la idoneidad del objetivo mundial a largo plazo y el progreso general realizado en los esfuerzos por alcanzarlo. Entre 2013 y 2015 se reunieron más de 70 expertos con las Partes de la CMNUCC, concluyendo que “en algunas regiones y ecosistemas vulnerables se proyectan altos riesgos incluso para un calentamiento de 1,5 °C”. En ese sentido, el SED recomendó considerar la temperatura límite del objetivo global a largo plazo como una “línea de defensa” o una “zona de amortiguamiento”, en lugar de una barrera detrás de la cual todos estarían a salvo. Este nuevo enfoque es la base del primer objetivo del Acuerdo de París: “mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2 °C con respecto a los niveles preindustriales, y proseguir los esfuerzos para limitar ese aumento de la temperatura a 1,5 °C”.

### **2.2.2. Contribuciones determinadas a nivel nacional**

En la XIX Conferencia de las partes de la CMNUCC (COP19), celebrada en Varsovia en 2013, se introdujeron las llamadas Contribuciones previstas determinadas a nivel nacional (INDC, por sus siglas en inglés), como un llamado al compromiso concreto de los distintos países miembros a la mitigación del cambio climático. Estas contribuciones tomaron forma en la conferencia del año siguiente en Lima (COP20) y en ella se instó a las partes a comunicarlas antes de la COP21.

El contenido que debe proporcionar la comunicación de una INDC (y posteriormente las NDC) incluye información cuantificable con respecto a un punto de referencia indicando un año base, los plazos y/o períodos de aplicación, el ámbito y la cobertura, los procesos de planificación, los supuestos y enfoques metodológicos, y los motivos por los cuales se considera que la contribución prevista es justa y ambiciosa (CMNUCC, 2015).

Semanas antes de la COP21, la CMNUCC presentó un informe de síntesis (CMNUCC, 2015) que estima el efecto agregado de ejecutar todas las INDC comunicadas hasta ese momento, las que representaban un 86% del total global de emisiones. Este informe concluye que, teniendo en cuenta las INDC, las emisiones mundiales per cápita descenderán como máximo un 8% en 2025 y un 9% en 2030, alcanzando el mismo nivel per cápita que se registró el año 2000. Adicionalmente, en dicho informe se indica que los niveles anuales estimados de las emisiones mundiales resultantes de la aplicación de las INDC no se corresponden con los escenarios compatibles con un aumento en la temperatura media global de 2 °C.

En la COP21 las Partes se propusieron lograr que las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero alcancen su máximo lo antes posible y a partir de ese momento las reduzcan rápidamente, para alcanzar un equilibrio entre las emisiones antropógenas y la absorción antropógena en la segunda mitad de siglo (CMNUCC, 2015, Art. 4 – 1.). En este contexto, cada Parte debe “preparar, comunicar y mantener las sucesivas contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC, por sus siglas en inglés)” y para alcanzar los objetivos de dichas contribuciones “procurarán adoptar medidas de mitigación internas” (CMNUCC, 2015, Art. 4 – 2.).

### 2.3. Trayectorias globales compatibles con la meta del Acuerdo de París

Con la adopción del Acuerdo de París, la CMNUCC invitó al Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) a elaborar un reporte especial sobre los impactos de un calentamiento global de 1,5 °C sobre niveles preindustriales y las trayectorias de emisiones globales de gases de efecto invernadero compatibles con esta temperatura. Este informe fue publicado el 2018 y se titula “Informe especial sobre cambio climático de 1,5 °C” (SR1.5, por sus siglas en inglés) (IPCC, 2018). En él se estima un presupuesto restante de carbono (*remaining carbon budget*) de 420 Gt CO<sub>2</sub> hasta el 2100 para limitar el calentamiento global en 1,5 °C con un 67% de probabilidad y un presupuesto de 580 Gt CO<sub>2</sub> con probabilidad del 50%.

En base a este presupuesto, el SR1.5 presenta una serie de curvas de emisiones globales de gases de efecto invernadero, desarrolladas con distintos modelos y escenarios, compatibles con un aumento de la temperatura media de la superficie terrestre por debajo de los 1,5 °C el año 2100. Estos escenarios se clasifican en dos grandes grupos (ver Figura 2):

- a) Escenarios sin Overshoot: aquellos en los cuales el aumento de temperatura se mantiene por debajo de los 1,5°C durante todo el siglo XXI (curvas celestes).
- b) Escenarios con Overshoot: aquellos en los cuales el aumento de temperatura puede superar los 1,5 °C antes de 2100, sin embargo, al final del siglo se estabiliza en 1,5°C (curvas grises).

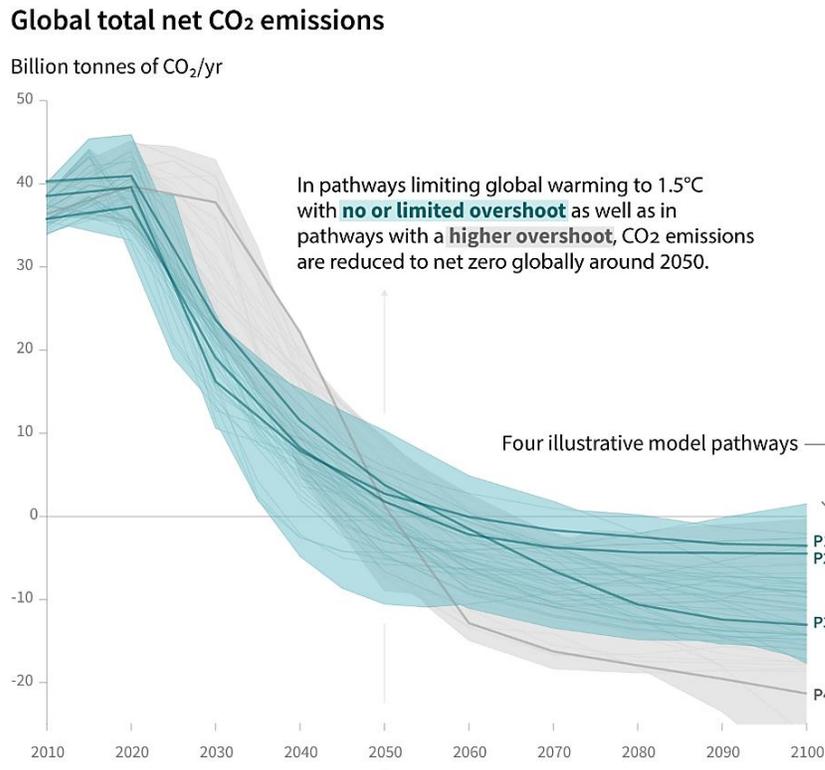


Figura 2: Trayectorias de emisiones globales de GEI que limitan el calentamiento global en 1,5 °C. Fuente: IPCC, 2018

A su vez, estos escenarios quedan bien representados por cuatro trayectorias características, identificadas en la Figura 2 y detalladas en la Figura 3, que se definen en base a distintas estrategias de mitigación:

**P1:** (sin Overshoot) Caracterizado por la baja demanda de energía, debido a las innovación social, económica y tecnológica, sin detener el crecimiento del estándar de vida de las personas, principalmente en los países del hemisferio sur. La forestación es el único mecanismo de captura de carbono implementado (área marrón en la Figura 3).

**P2:** (sin Overshoot) Escenario enfocado en la sustentabilidad y la cooperación internacional, mientras se transita hacia patrones de consumo sustentables y saludables, junto con el desarrollo de tecnologías bajas en carbono, la gestión del uso del suelo y la adopción limitada de Bioenergía con Captura y Almacenamiento de Carbono (BECCS por sus siglas en inglés. Área amarilla en la Figura 3).

**P3:** (sin Overshoot) Camino intermedio, según el cual continúan los patrones históricos de desarrollo social y tecnológico. La reducción en las emisiones se debe principalmente a la forma en la cual la energía y los productos son generados y en menor medida por la mayor eficiencia energética.

**P4:** (con Overshoot) Escenario de consumo intenso de recursos y energía. Continúa el estilo de vida basado en el consumo de combustibles fósiles. Reducción de emisiones basada principalmente en tecnologías de captura de carbono a través de la utilización de BECCS.

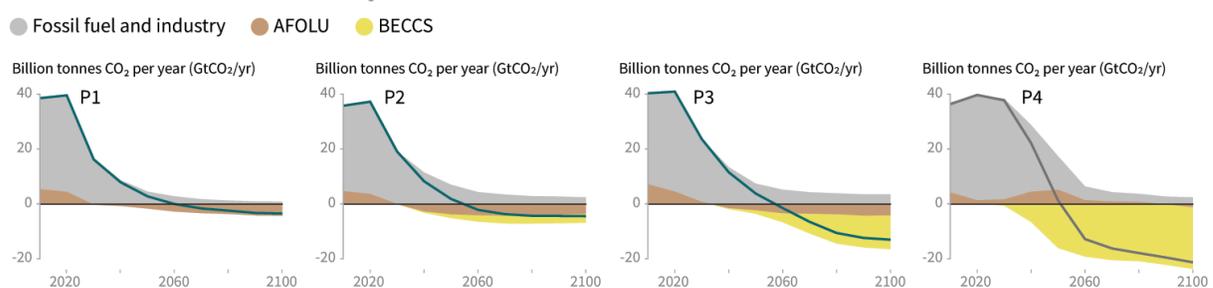


Figura 3: Contribuciones a las emisiones netas en las cuatro trayectorias representativas. Fuente: IPCC, 2018

### 2.3.1. Tecnologías de captura de carbono

Como se observa en la Figura 3, la mayor parte de los escenarios compatibles con un calentamiento de 1,5 °C consideran la captura de carbono durante la segunda mitad de este siglo para alcanzar emisiones netas negativas. En ese sentido, se han desarrollado varias tecnologías de captura de CO<sub>2</sub>, entre las cuales se encuentran aquellas que capturan el gas desde la fuente de emisión y aquellas que lo capturan directamente desde la atmósfera. Las primeras, en principio, están acotadas a fuentes estacionarias como las industrias de la energía y otras como la producción de cemento, mientras que las segundas permiten extraer el CO<sub>2</sub> que se encuentra presente en la atmósfera, independiente del origen y ubicación de la fuente (Fasihi, Efimova, & Breyer, 2019).

Dentro de las tecnologías que permiten extraer CO<sub>2</sub> de la atmósfera destacan dos: la bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS) y la captura directa del aire (DAC). A continuación se describe cada una de ellas.

### 2.3.1.1. *Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS)*

La captura de carbono mediante la tecnología BECCS consiste en dos etapas. En primer lugar, plantaciones de bosques y cultivos extraen CO<sub>2</sub> del aire por medio de la fotosíntesis durante todo su crecimiento. Luego, la biomasa resultante es aprovechada como fuente de energía y las emisiones generadas en el proceso son capturadas en su punto de origen y almacenadas. En la Figura 4 se esquematiza este mecanismo.

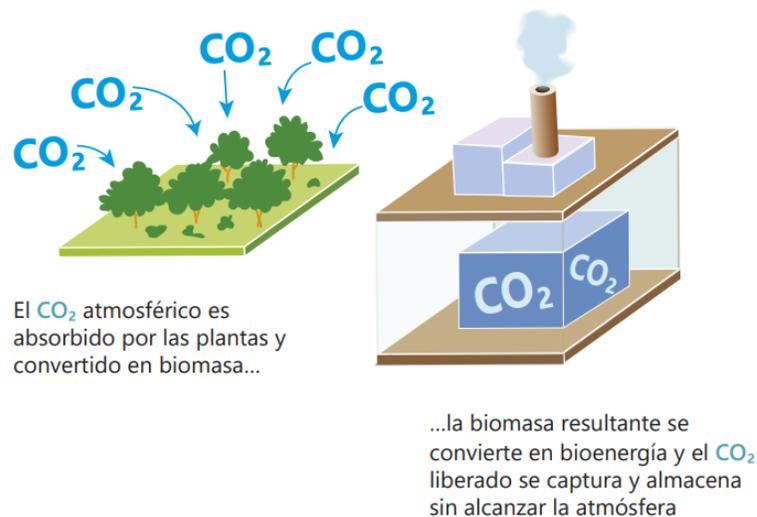


Figura 4: Bioenergía con captura y almacenamiento de carbono (BECCS). Fuente: AEMET & OECC, 2018.

El IPCC considera la tecnología BECCS en la mayor parte de los escenarios compatibles con el calentamiento de 1,5 °C, como se observa en la Figura 3. Sin embargo, este método de captura de carbono todavía se encuentra en desarrollo y aún presenta incertidumbre en la capacidad de almacenamiento, la disponibilidad de biomasa, costos y oportunidades de financiamiento y competencia con otros sectores por recursos como la tierra, el agua y los fertilizantes. Además, sus críticos argumentan que su implementación a gran escala amenaza la biodiversidad, la disponibilidad de agua y la seguridad alimentaria, ya que se caracteriza por un enorme requerimiento de suelo. ( Fridahl & Lehtveer, 2018).

### 2.3.1.2. *Captura directa del aire (DAC)*

La captura directa del aire es otra forma para extraer CO<sub>2</sub> de la atmósfera, esta vez mediante procesos industriales que utilizan hidróxidos y carbonatos que absorben o adsorben el gas. Existen métodos de alta temperatura, cuyas reacciones requieren temperaturas de hasta 900 °C, y otros de baja temperatura, que alcanzan menos de 100 °C.

En la Figura 5 se esquematiza un mecanismo de captura a alta temperatura que utiliza como solvente una solución acuosa de hidróxido de sodio (NaOH) o de hidróxido de potasio (KOH). Este proceso consiste en dos ciclos que pueden ocurrir simultáneamente. En el primero, llamado

absorción, el CO<sub>2</sub> del aire reacciona con el NaOH formando una solución de carbonato de sodio (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) y agua (ecuación (1)). En el segundo ciclo, conocido como regeneración, se mezcla el Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> producido el ciclo anterior con hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) para producir carbonato de calcio (CaCO<sub>3</sub>) y NaOH (ecuación (2)), que se reintegra como reactante al primer ciclo, como se observa en la Figura 5 (Fasihi, Efimova, & Breyer, 2019).

A partir de aquí comienza la etapa más intensiva en consumo de energía, en la cual el CaCO<sub>3</sub> es calentado hasta alcanzar 900 °C, liberando CO<sub>2</sub> en estado puro y óxido de calcio (CaO) (ecuación (3)). El CO<sub>2</sub> resultante puede almacenarse mediante tecnologías conocidas de captura y almacenamiento, mientras que el CaO se hidrata para producir Ca(OH)<sub>2</sub> (ecuación (4)), el que se reintegra al ciclo de regeneración.

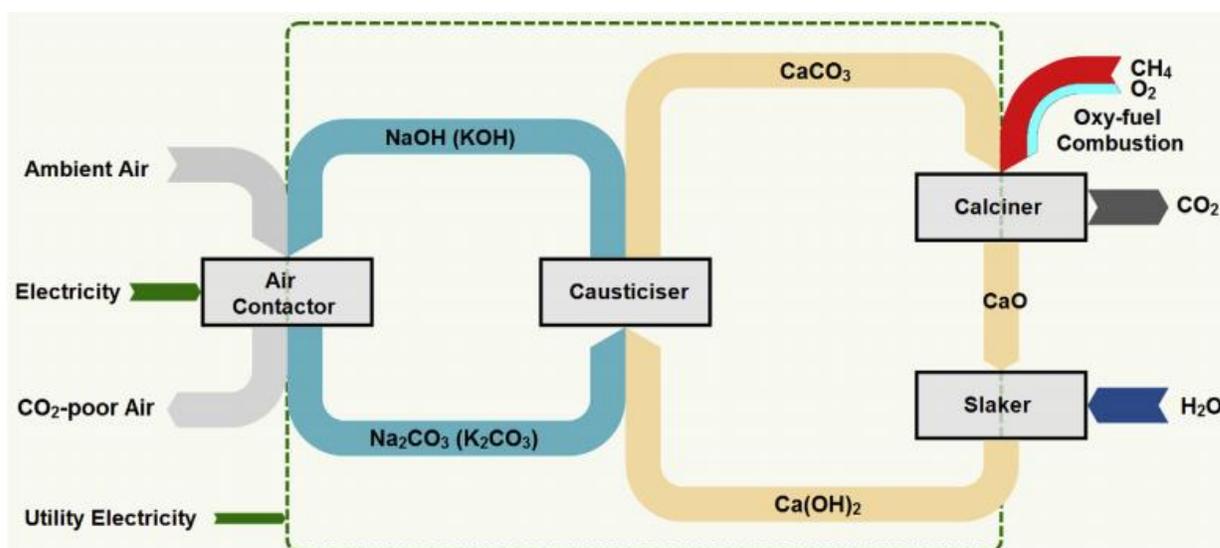
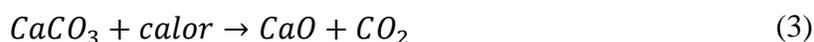
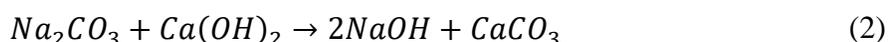
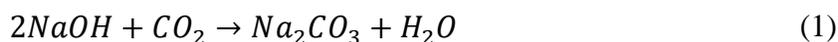


Figura 5: Ejemplo de captura de CO<sub>2</sub> directa del aire basada en una solución acuosa de hidróxido de sodio. Fuente: Fasihi, Efimova, & Breyer, 2019

Este proceso involucra una demanda energética superior a la tecnología BECCS, sin embargo, en la medida en que se utilice electricidad en base a fuentes renovables en el proceso, la captura de CO<sub>2</sub> mediante este método, implementado a gran escala, puede contribuir significativamente a alcanzar el objetivo de emisiones netas negativas a mediados de este siglo. (Fasihi, Efimova, & Breyer, 2019)

## 2.4. Inventarios nacionales de emisiones de GEI

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) define las directrices para la elaboración periódica de inventarios nacionales de emisiones de gases de efecto invernadero, con el fin de estandarizar la cuantificación de dichas emisiones y facilitar el reporte de los países miembros de la CMNUCC a través un Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) (IPCC, 2006).

Según estas directrices, las emisiones de GEI se dividen en sectores principales, que corresponden a grupos de procesos, fuentes y sumideros relacionados. Estos sectores son los siguientes:

- 1) Energía: Comprende la exploración y explotación de fuentes primarias de energía, la conversión de fuentes primarias en refinerías y centrales eléctricas, la transmisión y distribución de combustibles y el uso de combustibles en fuentes estacionarias y móviles.
- 2) Procesos industriales y uso de productos (IPPU): Emisiones por el uso de gases de efecto invernadero en productos y por los usos no energéticos del carbono contenido en combustibles fósiles.
- 3) Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU): Absorción de CO<sub>2</sub> a través de la fotosíntesis vegetal, emisiones de GEI de la materia orgánica muerta por descomposición y quema, emisiones de metano (CH<sub>4</sub>) por la fermentación entérica del sistema digestivo del ganado y por la gestión del estiércol e intercambio de GEI entre el suelo y la atmósfera.
- 4) Desechos: Principalmente la emisión de CH<sub>4</sub> proveniente de la descomposición de materia orgánica en los sitios de eliminación de desechos sólidos y de aguas residuales, además de la emisión de GEI de la incineración de desechos.
- 5) Otros

Cada sector comprende categorías y subcategorías, de tal forma que cada país estima sus emisiones por subcategoría y obtiene subtotaes por categoría y por sector realizando la sumatoria correspondiente.

En cuanto a los gases de efecto invernadero considerados en los inventarios de emisiones, estos son los siguientes:

- Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- Metano (CH<sub>4</sub>)
- Óxido nitroso (N<sub>2</sub>O)
- Hidrofluorocarbonos (HFC)
- Perfluorocarbonos (PFC)
- Hexafluoruro de azufre (SF<sub>6</sub>)
- Trifluoruro de nitrógeno (NF<sub>3</sub>)
- Trifluorometil pentafluoruro de azufre (SF<sub>5</sub>CF<sub>3</sub>)
- Éteres halogenados
- Otros halocarbonos

Cada uno de estos gases tiene un potencial de calentamiento global (PCG), el cual compara el forzamiento radiativo de una tonelada de un GEI, en un período de tiempo determinado, con el forzamiento radiativo de una tonelada de CO<sub>2</sub> (PCG=1) en el mismo período. Para los inventarios nacionales este período corresponde a 100 años y en particular el inventario chileno utiliza los valores PCG del Cuarto Informe de Evaluación (AR4) del IPCC, indicados en la Tabla 1.

Tabla 1: Fórmula química y potencial de calentamiento global (PCG) de GEIs. Fuente: MMA, 2018

Nombre del GEI	Fórmula Química	PCG
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	1
Metano	CH <sub>4</sub>	25
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	298
HFC-23	CHF <sub>3</sub>	14,8
HFC-32	CH <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	675
HFC-125	CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	3,5
HFC-134a	CHF <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	1,43
HFC-143a	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	4,47
HFC-152a	CH <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub>	124
HFC-227ea	CH <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> F	3,22
HFC-236fa	CF <sub>3</sub> CHF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	9,81
HFC-245fa	CH <sub>2</sub> FCF <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	1,03
HFC-365mfc	CHF <sub>2</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	794
HFC-43-10mee	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	1,64
Perfluorometano	CF <sub>4</sub>	7,39
Hexafluoruro de azufre	SF <sub>6</sub>	22,8

En general, el cálculo de emisiones de un GEI asociadas a una actividad humana se realiza multiplicando un dato que representa el nivel alcanzado por dicha actividad (AD) por un coeficiente que cuantifica las emisiones o absorciones por actividad unitaria (EF). De esta forma, la ecuación básica para el cálculo de emisiones es:

$$Emisiones = AD * EF \quad (5)$$

Así, por ejemplo, el factor AD de las actividades del sector Energía está representado por el consumo energético de combustible y el factor de emisión corresponde a la masa de CO<sub>2</sub> emitido por unidad de energía del combustible consumido. Los factores de emisión por defecto están definidos por el IPCC para cada actividad, de acuerdo a los distintos tipos de combustible utilizado y a las distintas tecnologías empleadas en cada proceso. Sin embargo, se recomienda a cada país definir sus propios factores de emisión en función de los estándares propios de cada uno de ellos (IPCC, 2006).

### **2.4.1. Sector Energía**

En particular el sector energía se divide en tres subsectores, cuyos códigos estándar y nombres son los siguientes:

- 1.A. Actividades de quema de combustibles.
- 1.B. Emisiones fugitivas de combustible.
- 1.C. Transporte y almacenamiento de CO<sub>2</sub>.

En Chile el subsector 1.A. Actividades de quema de combustibles corresponde al 98,9% del total de emisiones del sector Energía. Este subsector a su vez se divide en cinco categorías con sus respectivas subcategorías cada una:

- 1.A.1. Industrias de la energía
  - 1.A.1.a. Producción de electricidad y calor como actividad principal
  - 1.A.1.b. Refinación de petróleo
  - 1.A.1.c. Manufactura de combustibles sólidos y otras industrias de la energía
- 1.A.2. Industrias manufactureras y de la construcción
- 1.A.3. Transporte
  - 1.A.3.a. Aviación civil
  - 1.A.3.b. Transporte terrestre
  - 1.A.3.c. Ferrocarriles
  - 1.A.3.d. Navegación marítima y fluvial
  - 1.A.3.e. Otro tipo de transporte
- 1.A.4. Otros sectores (Comercial, residencial, etc.)
- 1.A.5. No especificado.

## **2.5. Compromisos de Chile a la carbono neutralidad global**

### **2.5.1. Política energética de Chile 2050**

El 2015 el Ministerio de Energía presentó una proyección de su política energética hasta el 2050, fundada en cuatro pilares, dentro de los cuales se consideran criterios de sustentabilidad:

- 1) Seguridad y calidad del suministro
- 2) Energía como motor de desarrollo
- 3) Energía compatible con el medio ambiente
- 4) Eficiencia y educación energética

Dentro del tercer pilar se plantea como meta que al menos un 60% de la generación eléctrica nacional provenga de energías renovables al 2035 y un 70% al 2050. Además, se considera plausible que el 40% de la generación provenga de energías renovables no convencionales (ERNC) el 2030. Cabe destacar que la hidroelectricidad se considera una fuente relevante en todos los escenarios analizados para este informe, ya que contar con un nivel de capacidad de regulación es necesario para facilitar una mayor penetración de ERNC, dando flexibilidad al sistema y minimizando costos económicos.

Por otra parte, se plantea como meta a 2050 que las emisiones del sector energético chileno sean “coherentes con los límites definidos por la ciencia a nivel global y con la correspondiente meta nacional de reducción, promoviendo medidas costo-efectivas”.

### **2.5.2. Contribuciones determinadas a nivel nacional**

El año 2015 Chile comunicó sus primeras contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC), las cuales deben ser actualizadas antes del 2020. Actualmente estas NDCs corresponden dos puntos:

- Meta de intensidad de carbono sin incluir el sector forestal y de uso de suelo:
  - a) Reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de PIB en un 30% con respecto al nivel alcanzado en 2007, considerando un ritmo de crecimiento de la economía similar al logrado en la última década anterior a 2015 exceptuando los años de crisis económica mundial 2008-2009.
  - b) Reducción de entre 35% y 45% en las emisiones de CO<sub>2</sub> por unidad de PIB, considerando un crecimiento económico que permita implementar las medidas adecuadas para este propósito y condicionado a la obtención de aportes monetarios internacionales.
- Contribución específica para el sector UTCUTS:
  - a) Recuperación y manejo sustentable de 100.000 hectáreas de bosque, principalmente nativo, que representará la captura de 600 [ktCO<sub>2</sub>e] anuales a partir de 2030. Este compromiso está condicionado a la aprobación de modificaciones a la Ley sobre recuperación de bosque nativo y fomento forestal.
  - b) Forestación de 100.000 hectáreas de bosque, en su mayoría especies nativas, que representará capturas de entre 900 [ktCO<sub>2</sub>e] y 1.200 [ktCO<sub>2</sub>e] anuales a partir de 2030. Este compromiso está condicionado a la prórroga del Decreto ley 701 y a la aprobación de una nueva ley de fomento forestal.

### **3. Inventario de emisiones Chile 1990 – 2016**

En este capítulo se presenta y analiza el estado actual de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en Chile, a partir de lo publicado en el tercer informe bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático (MMA, 2018).

Dentro de los compromisos que asumieron las naciones que forman parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), se encuentra informar periódicamente sus emisiones de GEI a través de un inventario anual de emisiones (INGEI) que comprenda desde el año 1990 en adelante. En el caso de Chile, al pertenecer al grupo de países no industrializados o no pertenecientes al Anexo I del CMNUCC, dicho inventario debe ser reportado cada dos años como parte de su Informe Bienal de Actualización Sobre el Cambio Climático.

La tercera entrega del Informe Bienal fue publicada en 2018 y presenta las emisiones anuales estimadas entre los años 1990 y 2016, las cuales se detallan a continuación.

#### **3.1. Evolución de las emisiones totales de GEI entre 1990 y 2006**

Según la metodología establecida por el IPCC, los datos reportados en un inventario de emisiones deben agruparse en cinco categorías: Energía; Procesos industriales y uso de recursos (IPPU); Agricultura; Uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS) y Residuos. Cada uno de estos sectores presenta diversas categorías y subcategorías bien definidas, para asegurar la consistencia y comparabilidad entre los distintos miembros del CMNUCC (IPCC, 2006). En Chile, las emisiones asociadas a la actividad forestal son negativas debido a la absorción de CO<sub>2</sub> asociada a ella. Por esta razón, en lo que sigue de este análisis solo se consideran las otras cuatro actividades.

Según el INGEI 1990-2016, las emisiones totales anuales en Chile se duplicaron el año 2012 con respecto a 1990, pasando de 52.000 [kt CO<sub>2</sub>eq] a 104.500 [kt CO<sub>2</sub>eq], como se observa en la Figura 6. Por otra parte, el sector energético es el que más aporta a las emisiones de GEI, representando un 78% del total el año 2016 (ver Figura 7), lo que además implica un aumento en relación al 65% que aportaba el año 1990. Le siguen la agricultura con 11%, el sector IPPU, con 6% y los residuos con 5%.

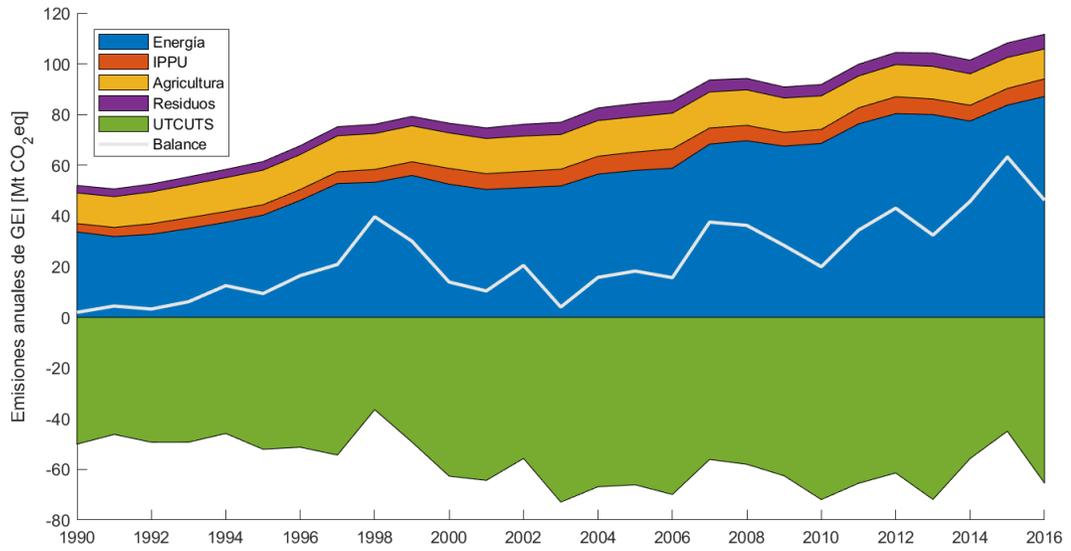


Figura 6: Emisiones anuales de GEI por categoría del inventario en Chile en el período 1990 – 2016. Fuente: MMA, 2018

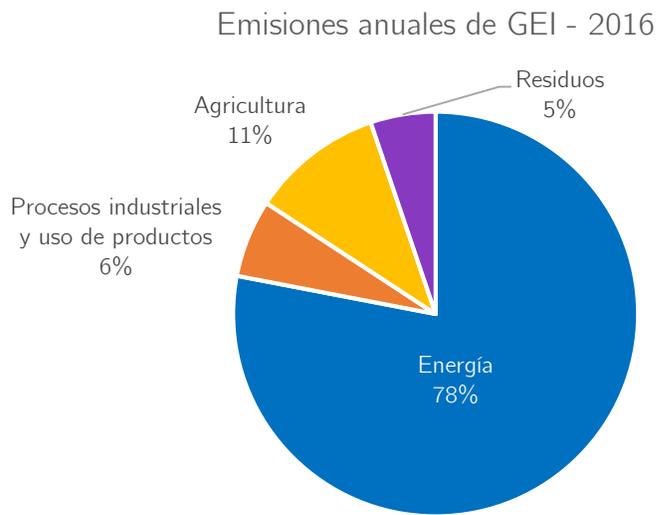


Figura 7: Emisiones de GEI por sector en Chile el año 2016

### 3.2. Sector Energía

El sector Energía comprende principalmente las actividades de quema de combustibles, dentro de las cuales las categorías más significativas son: Industrias de la energía, Transporte e Industrias manufactureras y de la construcción. De estos, el sector que mayores cambios ha experimentado en el tiempo es el de las industrias de la energía, con un aumento de 5 veces en sus emisiones de GEI entre 1990 y 2016 (ver Figura 8), pasando a representar un 41% del total de emisiones del sector energético que contrasta con el 19% del inicio del período. Actualmente le siguen en cantidad de emisiones el sector Transporte con un 31%, el sector manufacturero con 19% y finalmente Otros sectores con un 9%.

Las emisiones del sector de la industria manufacturera y de la construcción se han mantenido relativamente estables, aumentando solo de 12,3 [Mt CO<sub>2</sub>eq] a 16,1 [Mt CO<sub>2</sub>eq] y bajando su aporte de un 39% del total de emisiones del sector a un 19% (Figura 9), mientras que el transporte a aumentado considerablemente sus emisiones pasando de 9,2 [Mt CO<sub>2</sub>eq] en 1990 a 26,9 [Mt CO<sub>2</sub>eq] el 2016.

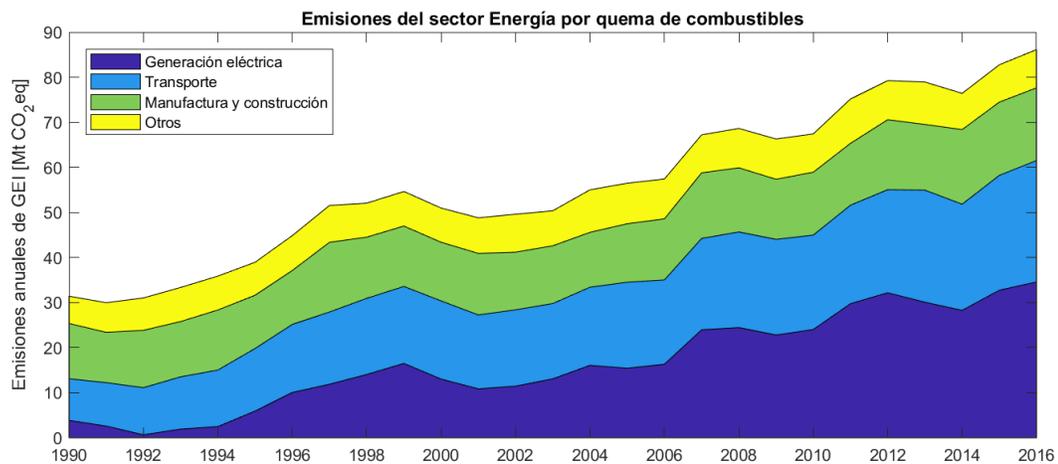


Figura 8: Emisiones del sector Energía por quema de combustibles entre 1990 y 2016. Fuente:Elaboración propia en base a MMA (MMA, 2018)

### Emisiones del sector energía - 2016

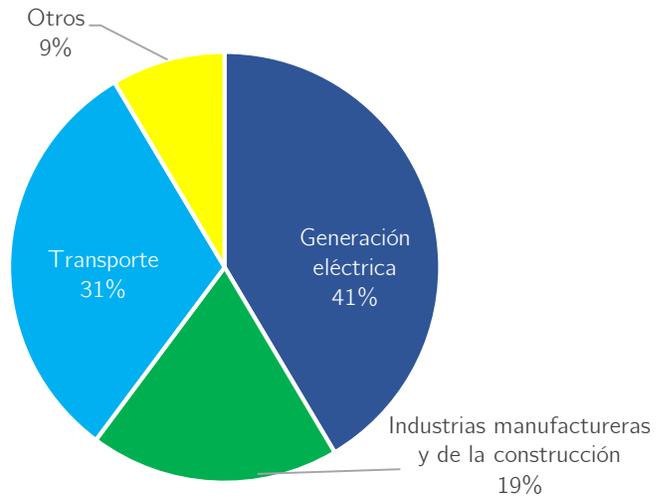


Figura 9: Aporte en emisiones de GEI de las subcategorías dentro del sector energético. Fuente:Elaboración propia en base a MMA (MMA, 2018)

### 3.2.1. Industrias de la energía

La industria de la Energía es la mayor fuente de emisiones de GEI en Chile con 35,7 [Mt CO<sub>2</sub>eq] el año 2016, según la actualización del inventario nacional de emisiones de 2018. De esta cantidad, el 97% corresponde a la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles en centrales termoeléctricas, 2% proviene de la manufactura de combustibles sólidos y el 1% de la refinación de petróleo.

En términos generales, en Chile la generación eléctrica proviene de tres tipos de fuentes principales, las de origen térmico por combustión, la hidráulica y las energías renovables no convencionales (ERNC), que incluyen la energía eólica, la solar, la geotérmica y la pequeña hidroeléctrica (centrales hasta 20 MW). Las centrales hidráulicas a su vez se clasifican en embalse y pasada.

En la Figura 10 se muestra la generación anual del país por fuente de energía. Desde el año 2002 se observa una clara tendencia al crecimiento de la generación termoeléctrica, posicionando a este tipo de fuente muy por sobre otras alternativas, llegando a representar el 67% de la generación eléctrica anual el 2013, en comparación al 44% que representaba el 2002. A partir de 2013, sin embargo, se observa una estabilización en la generación a partir de fuentes térmicas. De esta forma, en 2018 se registra una generación térmica anual de 41,3 [TWh], cifra que se encuentra por debajo de los 43,1 [TWh] que se generaron el 2012 por el mismo tipo de fuente. Esta estabilización ha sido compensada por una creciente incorporación de energías renovables no convencionales a la matriz energética de Chile, las cuales alcanzan una generación de 12,8 [TWh] el 2017, superando por segundo año consecutivo a la generación en centrales hidroeléctricas de embalse.

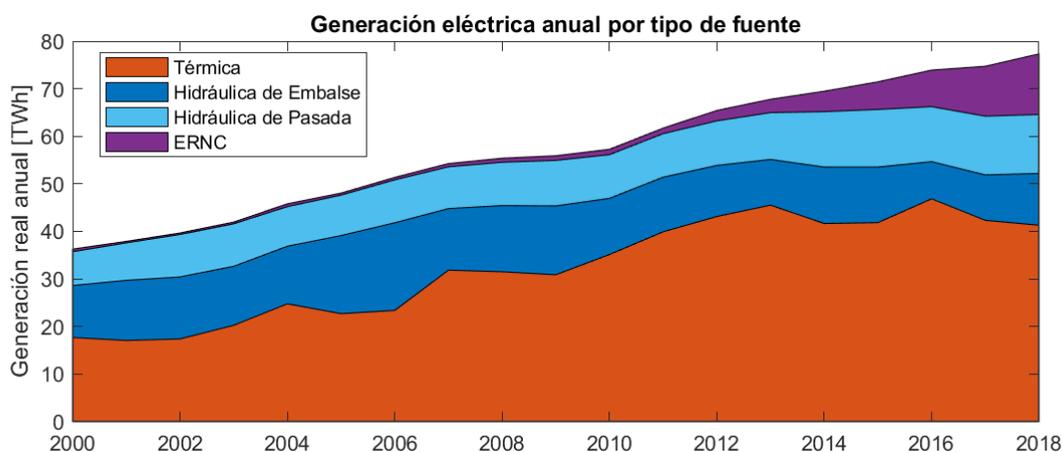


Figura 10: Generación eléctrica anual en Chile por tipo de fuente. Fuente: Elaboración propia en base a datos del Coordinador Eléctrico Nacional

En cuanto a los combustibles utilizados en la generación de electricidad en centrales termoeléctricas, en las últimas dos décadas los más significativos son tres: el carbón (28,8 [TWh] el 2018), el gas natural (11,7 [TWh] el 2018) y el diésel. Aunque este último ha disminuido notablemente en los últimos años, pese a que fue muy importante a partir de 2007 luego del corte de suministro de gas natural por parte de Argentina, como se observa en la Figura 11, llegando a representar un 20% de la generación termoeléctrica ese año. Adicionalmente, a partir del 2007 la oferta hídrica disminuyó considerablemente producto de la escasez hídrica que obligó a reemplazar

más de 5,4 [TWh], que ya no se generan en centrales de embalse, por fuentes térmicas con respecto al año anterior (MMA, 2018).

Esta condición de escasez hídrica se ha visto agravada a partir de la mega sequía que afecta a la zona central de Chile, la cual se manifiesta en un déficit de precipitaciones de entre 20% y 40% entre las regiones de Coquimbo y del Biobío en el período 2010-2018 (Garreaud, y otros, 2019).

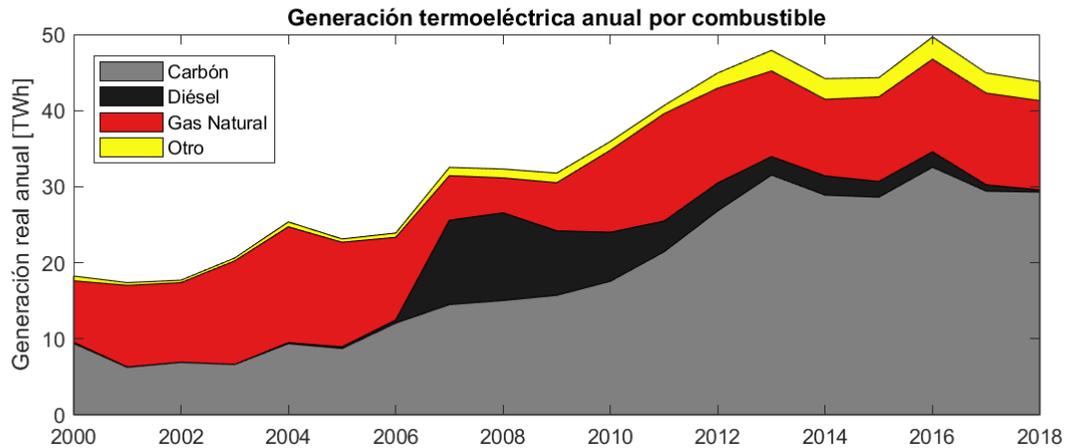


Figura 11: Generación eléctrica anual en centrales termoeléctricas por tipo de combustible. Fuente: Elaboración propia en base a datos del Coordinador Eléctrico Nacional

### 3.2.1.1. Emisiones por tipo de combustible

Para estimar las emisiones de GEI de la industria de la generación eléctrica, desagregada por combustible, se utilizan los factores de emisión por defecto establecidos en la Guía metodológica para inventarios nacionales (IPCC, 2006), resumidos en la Tabla 2 para los combustibles utilizados en las centrales termoeléctricas en Chile. Las unidades corresponden a kilogramos de gas por terajoule de combustible consumido.

Tabla 2: Factores de emisión por defecto para combustión estacionaria en las industrias energéticas. Fuente: IPCC, 2006

Combustible	CO2 [kg/TJ]	CH4 [kg/TJ]	NO2 [kg/TJ]
Carbón	94600	1	1,5
Diésel	74100	3	10
Gas Natural	56100	1	0,1
Coque de Petróleo	97500	3	0,6
Fuelóleo residual	77400	3	0,6
Gas Licuado	64200	3	0,6
Gas de Refinería	57600	1	0,1

Por otra parte, el consumo de combustible por parte de las industrias energéticas se encuentra en el Balance Nacional de Energía (BNE), publicado anualmente por el Ministerio de Energía, cuyo registro está disponible entre los años 2008 y 2017. Con estos datos y los factores de emisión de la Tabla 2 se obtienen los niveles de emisión de GEI que se observan en la Figura 12. Existe una diferencia promedio del 14% con respecto al INGEI, la que se vuelve más significativa el año 2014, cuando alcanza un 24% por sobre el inventario. Esta diferencia se puede explicar por diferencias metodológica en el cálculo.

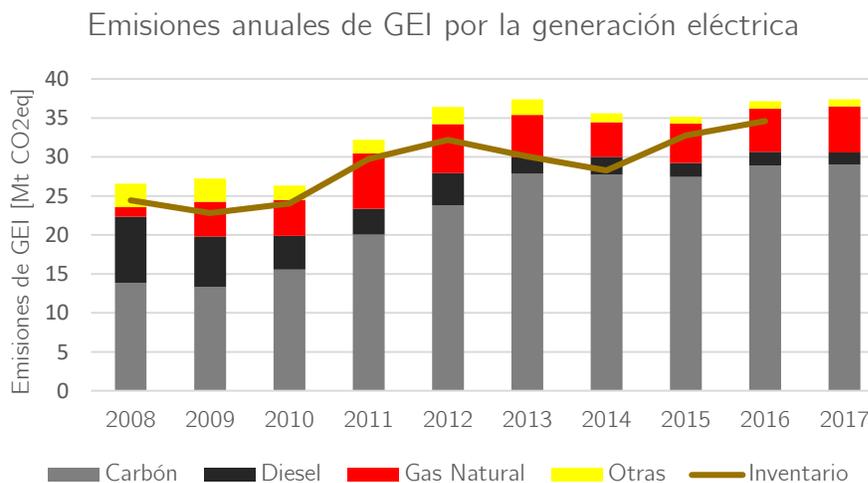


Figura 12: Emisiones de GEI por combustible utilizado en la generación eléctrica. Fuente: Elaboración propia

### 3.2.2. Transporte

Esta subcategoría incluye todas las emisiones de GEI generadas por la quema de combustibles fósiles para el transporte nacional. Dentro de ella, el transporte terrestre es el de mayor relevancia con un 87% de las emisiones, seguido por el transporte aéreo con 6% y el transporte marítimo con un 3%, como se observa en la Figura 13. En total, el transporte fue responsable de 27 [Mt CO<sub>2</sub>e] el 2016, que corresponde al 25% del total nacional de emisiones de GEI.

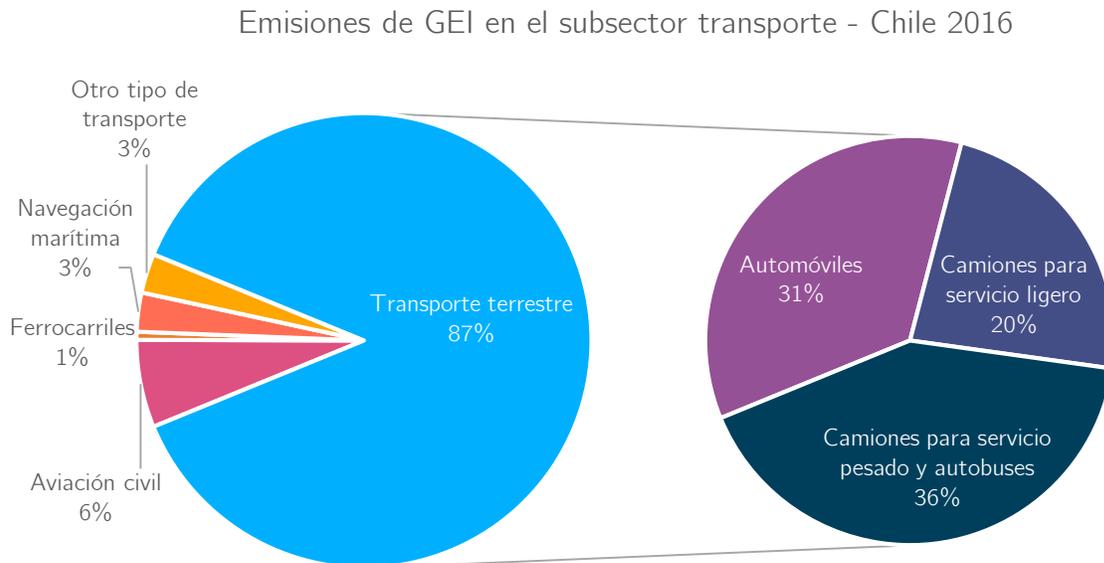


Figura 13: Emisiones de GEI del transporte en Chile en 2016. Fuente: Elaboración propia en base a MMA (MMA, 2018)

De los tipos de transporte que han experimentado mayor incremento en su nivel de emisiones destaca el automóvil, que en los últimos 10 años (2007-2016) lo duplicó, alcanzando un total de 8,3 [MtCO<sub>2</sub>e] y creciendo a una tasa media de 437 [ktCO<sub>2</sub>e/año], que contrasta con la década anterior en la que mantuvo un nivel anual de emisiones prácticamente constante. De seguir esa tendencia, el automóvil se convertirá en el modo de transporte que más emisiones aporta al sector el 2020, superando a buses y camiones de carga pesada, cuyas emisiones en conjunto solo crecen a una tasa de 59 [ktCO<sub>2</sub>e/año] en el mismo período. En la Tabla 3 se muestran las tasas de incremento anual de emisiones de GEI para los distintos tipos de transporte medidas en el período 2007-2016.

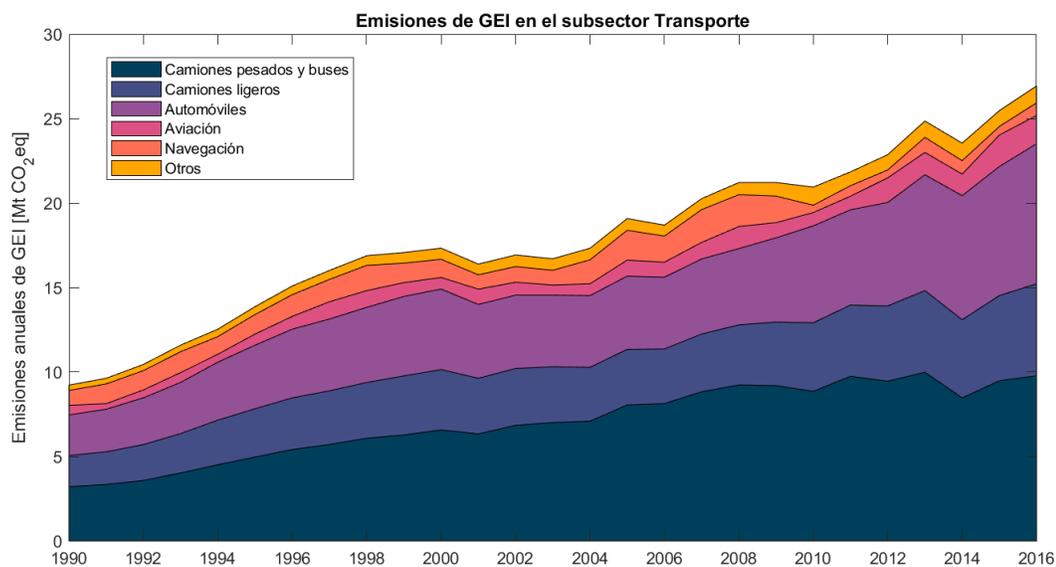


Figura 14: Emisiones anuales de GEI en Chile generadas por el transporte, desagregadas por tipo de transporte. Fuente: elaboración propia en base a MMA (MMA, 2018)

Tabla 3: Tasa de incremento anual medio en el período 2007- 2016 para el transporte

Tipo de transporte	Tasa de incremento medio anual [kt CO <sub>2</sub> eq / año]
Aviación civil	87
Automóviles	437
Camiones para servicio ligero	215
Camiones para servicio pesado y autobuses	59
Total transporte terrestre	719
Ferrocarriles	4
Navegación marítima	-140
Otro tipo de transporte	23

## **4. Mitigación en la generación eléctrica**

Como se mostró en el capítulo 3, la generación eléctrica representa el 40% de las emisiones totales de GEI en nuestro país. Además, el 70% de la energía generada en centrales térmicas proviene de unidades a carbón. En este contexto, existe un consenso en que es necesario modificar drásticamente la matriz eléctrica para alcanzar los objetivos compatibles con la meta global sobre el cambio climático.

En este capítulo se presentan los distintos escenarios contemplados en un plan de retiro de centrales termoeléctricas a carbón y se estima el nivel de emisiones que resulta de su aplicación. Para ello se determinan factores de emisión en función de la energía anual generada, a partir de datos del consumo de combustibles por el sector energético y de los factores de emisión por defecto definidos por el IPCC.

### **4.1. Retiro de centrales a carbón del Sistema Eléctrico Nacional**

En el marco de los objetivos de la Política Energética 2050, el Ministerio del Medio ambiente convocó a una mesa para analizar los aspectos tecnológicos, ambientales, sociales y económicos, de seguridad y de suficiencia del sistema eléctrico, que permitan establecer un cronograma y las condiciones para el cese o reconversión programada y gradual de la operación de plantas térmicas a carbón (Coordinador Eléctrico Nacional, 2018).

Con este propósito, el Coordinador Eléctrico Nacional (CEN) analizó el impacto sobre la expansión de la capacidad de generación, transmisión y la operación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) para el período 2020-2040, bajo el escenario de retiro gradual de centrales de generación eléctrica en base a carbón que se encuentra en el Anexo 1. A partir de este cronograma se establecen 6 escenarios con variaciones en los costos de inversión en tecnología y en los grados de oposición social a nuevos proyectos. Los resultados para estos escenarios se describen a continuación.

#### **4.1.1. Escenario A1**

La tecnología de expansión predominante en este escenario corresponde a la tecnología solar, llegando a una potencia instalada de 11.000 [MW] al año 2040, con un crecimiento acelerado hasta el 2030, año a partir del cual comienza una marcada inserción de la tecnología de Concentración Solar de Potencia (CSP), como se observa en la Figura 15. Al mismo tiempo, se observa una creciente participación de la tecnología de geotermia e hidráulica de pasada como energía de base sustituta de las fuentes contaminantes desconectadas.

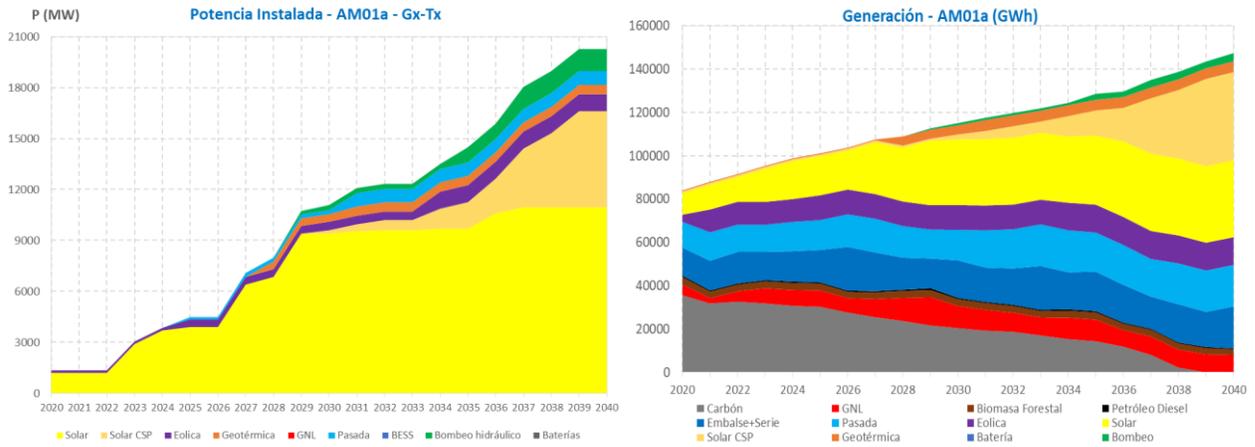


Figura 15: Nueva potencia instalada y generación anual, Escenario A1. Fuente: CEN, 2018

#### 4.1.2. Escenario A2

La principal diferencia de este escenario con el escenario A1 está relacionado con el costo de inversión de la tecnología CSP, que en este caso se considera más alto. Como consecuencia, la presencia de la tecnología solar fotovoltaica es mayor en el escenario A2 partir del 2030, la cual llega a una potencia instalada de 19.500 [MW] al año 2040, como se observa en la Figura 16. Además, se aprecia una incorporación adicional de centrales eólicas y de bombeo hidráulico. Las primeras, operando en combinación con las centrales solares y con el almacenamiento en base bombeo hidráulico, son capaces de proveer la energía base sustituta de las centrales a carbón retiradas.

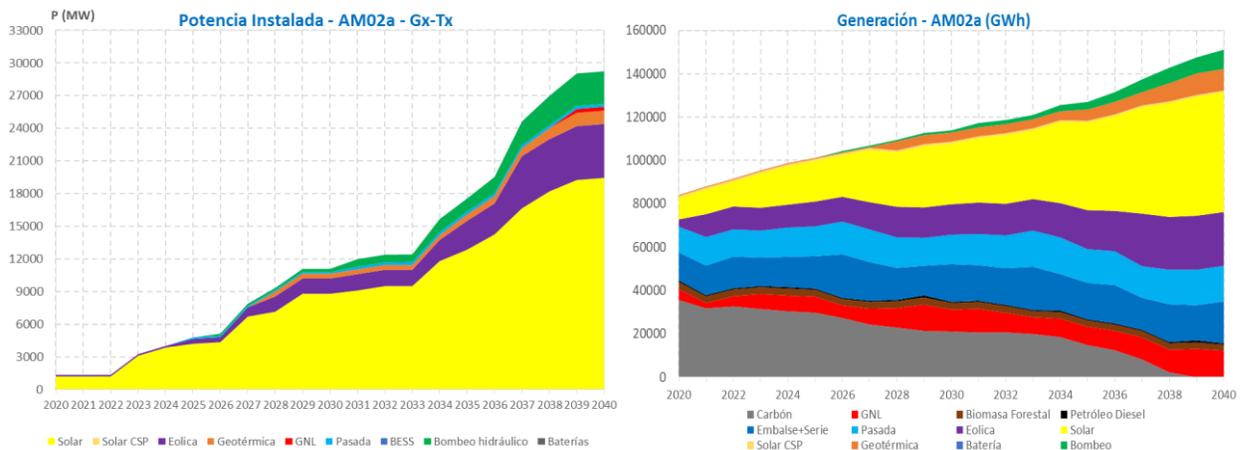


Figura 16: Nueva potencia instalada y generación anual, Escenario A2. Fuente: CEN, 2018

### 4.1.3. Escenario A3

Este escenario se diferencia del escenario A1 en el supuesto de mayores costos de inversión de la tecnología CSP y en el mayor costo proyectado de combustible gas natural licuado (GNL). El resultado es la ausencia de nuevos proyectos de CSP y GNL y una mayor incorporación de centrales eólicas y de bombeo hidráulico, que en conjunto con la energía solar sustituyen a las centrales a carbón desconectadas, como se observa en la Figura 17.

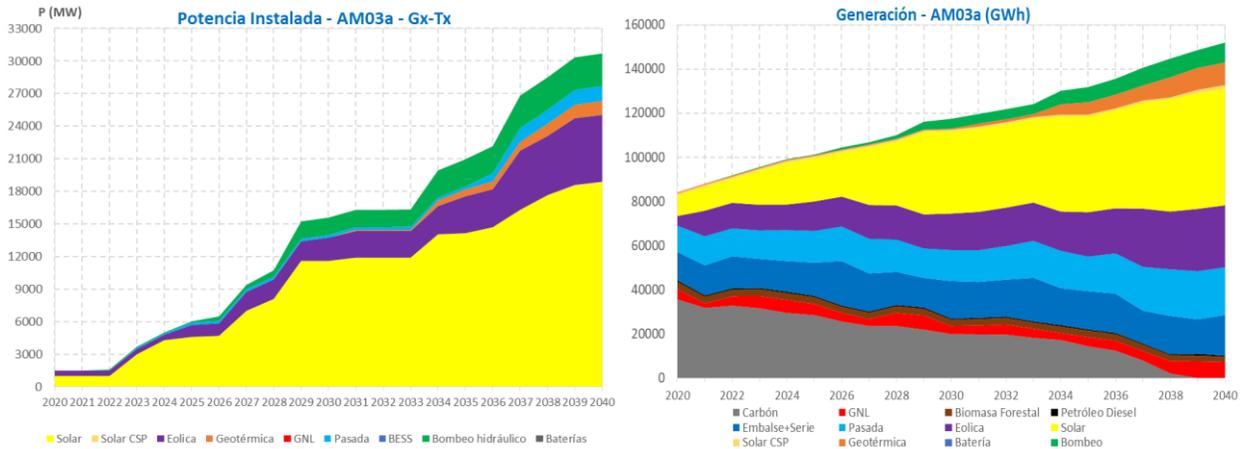


Figura 17: Nueva potencia instalada y generación anual, Escenario A3. Fuente: CEN, 2018

### 4.1.4. Escenario A4

Este escenario se diferencia del escenario A1 en que se consideran costos altos en inversión de la tecnología CSP y en el combustible GNL, mientras que los costos de inversión asociados a los sistemas de almacenamiento se asumen más bajos. Esto último explica que la incorporación del bombeo hidráulico sea mayor que en el escenario A3, aunque en general los resultados son similares entre ambos escenarios, como se observa en la Figura 18.

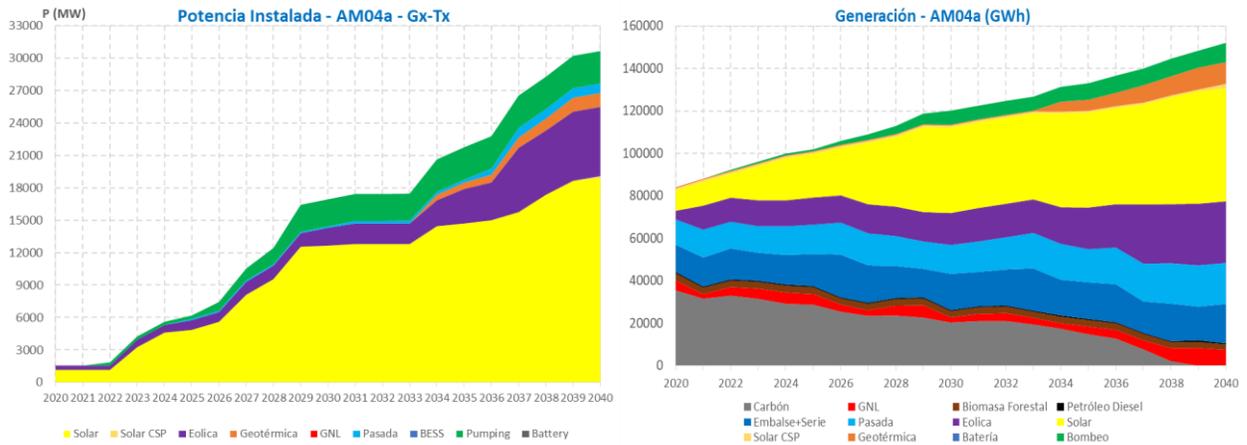


Figura 18: Nueva potencia instalada y generación anual, Escenario A4. Fuente: CEN, 2018

#### 4.1.5. Escenario A5

A diferencia del escenario A1, este escenario considera altos costos de inversión de la tecnología CSP y la dificultad en la ejecución de proyectos geotérmicos, hidráulicos de pasada y de bombeo por oposición social. Como consecuencia, se proyecta el desarrollo de nuevas centrales de GNL a partir del año 2033, como se muestra en la Figura 19, lo cual implica una menor disminución en las emisiones de GEI del sector energético, como se verá más adelante.

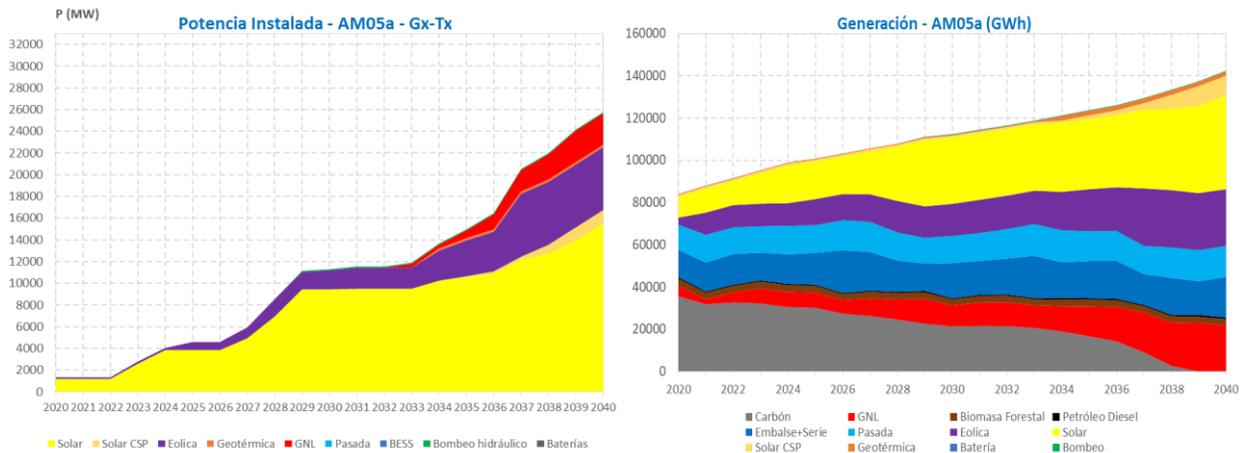


Figura 19: Nueva potencia instalada y generación anual, Escenario A5. Fuente: CEN, 2018

#### 4.1.6. Escenario A6

En este escenario se consideran proyecciones de alto costo para la tecnología CSP, de bajo costo para centrales solares, eólicas y de almacenamiento, y oposición social a proyectos geotérmicos, hidráulicos de pasada y de bombeo. Por lo tanto, la sustitución de centrales a carbón está dada por una combinación de energía eólica, solar y térmica en base a GNL, como se observa en la Figura 20. Los bajos costos de inversión en energías eólica y solar implican una incorporación más intensiva de estas tecnologías, en comparación con el escenario anterior y, como consecuencia, la nueva potencia instalada proveniente de centrales térmicas recién se inicia el año 2038 y solo

alcanza los 1.300 [MW] en 2040, en contraste con los 2.900 [MW] alcanzados en el escenario A5 el mismo año.

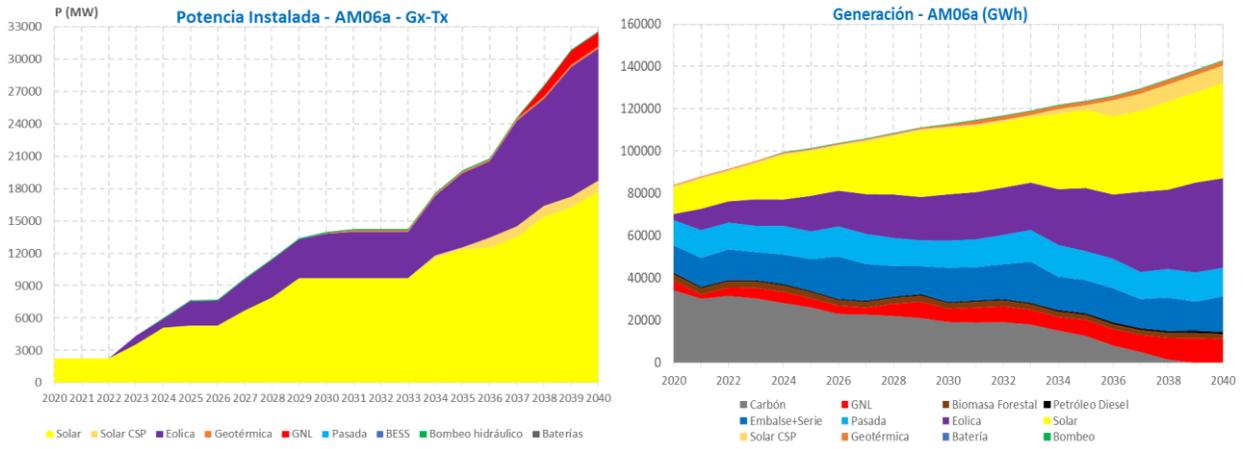


Figura 20: Nueva potencia instalada y generación anual Escenario A6. Fuente: CEN, 2018

## 4.2. Emisiones de GEI en base al programa cierre de centrales termoeléctricas a carbón

Dado que las proyecciones presentadas en la sección anterior se expresan en términos de la generación eléctrica real anual y no se cuenta con información sobre el consumo proyectado de combustible, a continuación se determinan factores de emisión definidos como la masa de CO<sub>2</sub> equivalente emitida por unidad de energía eléctrica generada por un combustible determinado. Posteriormente, se calculan las emisiones anuales asociadas a cada escenario, multiplicando los factores de emisión obtenidos por la generación eléctrica anual proyectada.

### 4.2.1. Factores de emisión

Para obtener el nivel de emisiones de GEI por tipo de combustible utilizado en la industria de la generación eléctrica, se correlacionan las emisiones calculadas en base al BNE (ver Figura 12 en la sección 3.2.1.1) con la generación real anual reportada por el Coordinador Eléctrico Nacional en el período común (2008-2017), mediante una regresión lineal, para obtener nuevos factores de emisión definidos como masa de CO<sub>2</sub> equivalente por unidad de energía generada. Este proceso se muestra en la Figura 21, donde la pendiente de cada recta ajustada corresponde al factor de emisión buscado. Cabe mencionar que cada ajuste lineal pasa por el origen para que tenga sentido físico, es decir, que se cumpla el supuesto de que si no hay generación no hay emisiones.

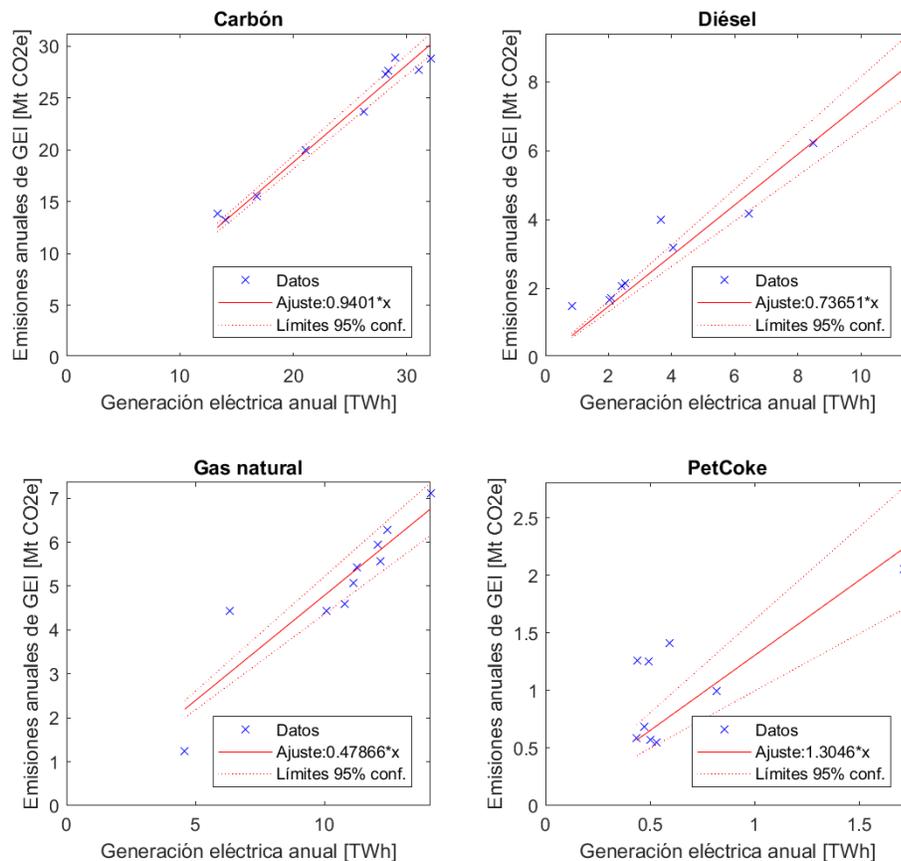


Figura 21: Ajuste lineal para obtener factores de emisión en función de la generación eléctrica real. Fuente: Elaboración propia

Según se observa en la Figura 21, el coque de petróleo (PetCoke) presenta una correlación de peor calidad ( $R^2 = 0,75$ ) entre las emisiones anuales de GEI y la energía anual generada. Sin embargo, es uno de los combustibles que tiene menor participación en el sistema, por lo tanto el error en su estimación no debiera influir mayormente en los resultados que siguen. Los combustibles más relevantes y que se consideran en los escenarios de descarbonización, en cambio, presentan valores de  $R^2$  superiores a 0,8 en sus correlaciones, por ende, los factores de emisión obtenidos pueden considerarse una buena aproximación para poder expresar los escenarios de descarbonización en términos de emisiones de GEI. Los factores de emisión obtenidos se resumen en la Tabla 4.

Tabla 4: Factores de emisión en unidad de masa de CO<sub>2</sub>eq por unidad de energía generada

Combustible	Factor de emisión [tCO <sub>2</sub> eq/GWh]	Coef. R <sup>2</sup> del ajuste
Gas Natural	0,48 ± 0,02	0,83
Diésel	0,74 ± 0,03	0,93
Carbón	0,94 ± 0,01	0,97
PetCoke	1,3 ± 0,1	0,75

Finalmente, multiplicando los factores de emisión determinados por la generación real anual se obtienen las emisiones anuales para el período 2000 – 2018, (Figura 22). Aunque en el período 2000-2006 se observa un ajuste casi exacto con el inventario, a partir del 2006 se observa una diferencia anual significativa de entre 1 y 8 [MtCO<sub>2</sub>eq] entre las emisiones calculadas y el INGEI. Esto puede explicarse por la diferencia con la metodología del INGEI, que estima las emisiones a partir del volumen de combustible consumido en vez de la energía generada, como se procedió aquí.

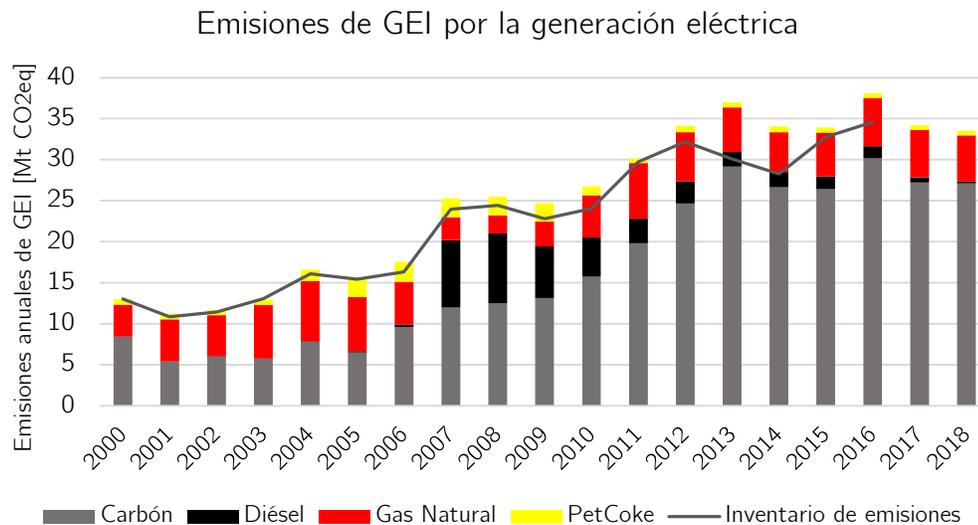


Figura 22: Emisiones de GEI generadas por la generación eléctrica obtenidas con los factores de emisión en función de la energía anual generada. Fuente: Elaboración propia.

## 4.2.2. Emisiones de GEI en base al programa de descarbonización

Con los factores de emisión determinados en la parte anterior se calculan las emisiones futuras en base a los 6 escenarios de generación que consideran el retiro de centrales a carbón, presentados en la sección 4.1. Multiplicando estos factores por la generación anual proyectada en cada escenario de descarbonización se obtienen los resultados graficados en la Figura 23.

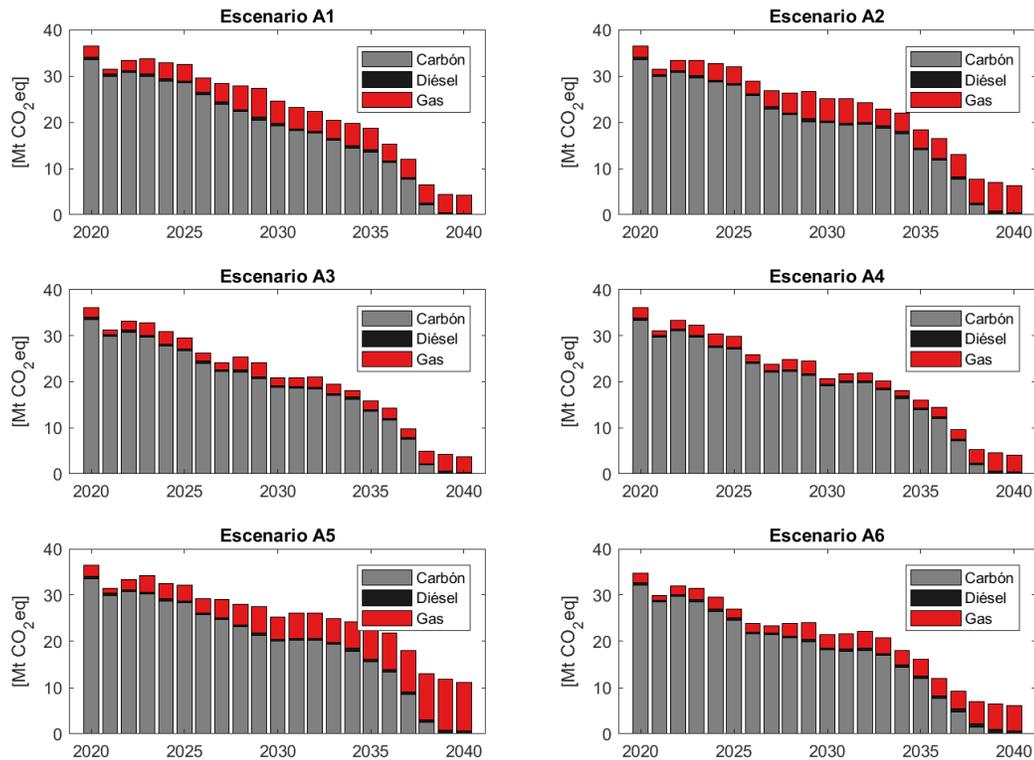


Figura 23: Emisiones anuales de GEI durante el período de descarbonización de la matriz de generación eléctrica 2020-2040. Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 5 se muestran las emisiones de GEI acumuladas en el periodo de descarbonización. Como se observa, el escenario A6 es el que menor nivel de emisiones acumula entre 2020 y 2040, principalmente a causa de la rápida inserción de energía solar y eólica, dado que este escenario supone los menores costos de inversión para estas tecnologías. Esto permite un reemplazo más acelerado del carbón por ERNC en la generación real del sistema, pese a que el cronograma de retiro de centrales térmicas sea el mismo para los seis escenarios.

En contraste, el escenario A5 presenta el mayor nivel de emisiones acumuladas en el mismo período, debido a la mayor inserción de centrales térmicas a GNL como sustituto del carbón. Esto se produce a causa de la mayor oposición social a proyectos hídricos, de bombeo y de geotermia que es el supuesto característico de este escenario.

Entre el escenario más optimista y el más pesimista se existe una diferencia 98 [Mt CO<sub>2</sub>eq] acumulados en el período 2020-2040, lo que equivale a casi un año de emisiones totales de GEI en Chile a los niveles actuales.

*Tabla 5: Emisiones de GEI acumuladas en el período 2020-2040 por la industria de la generación eléctrica bajo escenarios de descarbonización*

<b>Escenario</b>	<b>Emisiones acumuladas en el período 2020-2040 [Mt CO<sub>2</sub>eq]</b>			
	<b>Carbón</b>	<b>Diésel</b>	<b>Gas</b>	<b>Total</b>
<b>A1</b>	394	9	82	<b>485</b>
<b>A2</b>	402	9	85	<b>496</b>
<b>A3</b>	391	8	48	<b>447</b>
<b>A4</b>	397	8	44	<b>449</b>
<b>A5</b>	414	10	115	<b>539</b>
<b>A6</b>	365	10	66	<b>441</b>

## 5. Mitigación en el transporte terrestre

El transporte generó el 25% de las emisiones de GEI totales de Chile el 2016, de las cuales el 88% provienen del transporte terrestre, convirtiéndose en sector que presenta el mayor nivel de emisiones luego de la generación eléctrica.

En este capítulo se presentan escenarios que comprenden distintas de mitigación en el transporte, particularmente en el transporte terrestre de pasajeros. Para cada uno de ellos se estima un nivel de emisiones proyectado hasta el 2050 a partir de simulaciones realizadas con el modelo elaborado en el proyecto MAPS Chile (MAPS Chile, 2012).

### 5.1. Modelo MAPS Chile

El modelo que permite proyectar el consumo energético y las emisiones en el sector transporte fue desarrollado en el marco del proyecto MAPS (Mitigation Actions Plans and Scenarios) Chile (MAPS Chile, 2014). Este es un programa que apoya a países en desarrollo a elaborar planes compatibles con los desafíos que presenta el cambio climático. Esta iniciativa nace en Sudáfrica y el 2012 se desarrollaron proyectos MAPS en Chile, Colombia, Perú y Brasil. El año 2014, en su fase 2, MAPS Chile presentó trayectorias nacionales de emisiones de GEI desagregadas en los sectores generación eléctrica; transporte; industria y minería; agropecuario; forestal; comercio, público y residencial; y residuos.

En particular el modelo para el transporte presenta dos metodologías generales según se trate de proyectar el consumo energético para el transporte terrestre (camino y ferroviario) y para los modos aéreo y marítimo (MAPS Chile, 2012).

#### 5.1.1. Transporte terrestre

En este modelo el transporte terrestre se divide en los siguientes sectores y subsectores:

- Transporte de pasajeros
  - Transporte caminero de pasajeros
    - Urbano
    - Inter urbano
  - Transporte interurbano de pasajeros en modo ferroviario
- Transporte de carga
  - Transporte de carga caminero
    - Urbano
    - Inter urbano
  - Transporte ferroviario de carga
- Transporte marítimo nacional
- Transporte aéreo nacional

En general este modelo tiene como variables principales el PKM (pasajero-kilómetro) y el TKM (tonelada-kilómetro), que representan la demanda de transporte de pasajeros y de carga respectivamente. El cálculo de emisiones se realiza a partir del consumo energético desagregado por modo de transporte, tipo de tecnología y región del país.

Independiente del tipo de transporte, las emisiones de GEI quedan descritas por la ecuación (6).

$$E_{ik} = CC_i * FE_{ik} \quad (6)$$

Donde:

$E_i$ : Emisiones para el tipo de transporte  $i$  y el contaminante  $k$   $\left[\frac{kg}{año}\right]$

$CC_i$ : Consumo energético para el tipo de transporte  $i$   $\left[\frac{TJ}{año}\right]$

$FE_{ik}$ : Factor de emisión para el tipo de transporte  $i$  y el contaminante  $k$   $\left[\frac{kg}{TJ}\right]$

La diferencia entre los distintos tipos de transporte se encuentra en el cálculo del consumo energético  $CC_i$ , el cual se detallará a continuación.

#### 5.1.1.1. Transporte de pasajeros

El consumo energético por modo está dado por la ecuación (7).

$$CC_i = M_i * \frac{PKM * Pob}{TO_i * FdC_i} \quad (7)$$

Donde:

$CC_i$ : Consumo energético para el tipo de transporte  $i$   $\left[\frac{TJ}{año}\right]$

$M_i$ : Partición modal del tipo de transporte de pasajeros  $i$  [%]

$PKM$ : Demanda per cápita regional de transporte de pasajeros  $\left[\frac{km}{año}\right]$

$Pob$ : Población regional [per]

$TO_i$ : Tasa de ocupación del tipo transporte de pasajeros  $i$   $\left[\frac{per}{veh}\right]$

$FdC_i$ : Factor de consumo del tipo de transporte de pasajeros  $i$   $\left[\frac{km}{TJ}\right]$

A continuación se describen las variables principales de este modelo.

### **PKM**

La variable principal que modela la demanda de transporte de carga es el PKM (pasajero-kilómetro), que se expresa como demanda per cápita y cuya proyección se realiza en base a un modelo econométrico que relaciona dicha variable con el PIB nacional per cápita. El PKM per cápita expresa la distancia promedio anual recorrida por una persona en una región determinada, distribuida en los distintos modos de transporte. En este modelo se define un PKM urbano y un PKM interurbano caminero, ambos a nivel regional. Tanto las serie PKM como las series TKM, que se describirán más adelante, se consideran únicas en este trabajo y se conservan en todos los escenarios a evaluar. Los valores proyectados de la variable PKM urbano se encuentran resumidos en el Anexo B.1.

## **Población**

La proyección de la población hasta el 2050 considerada en el modelo MAPS Chile proviene de datos entregados por el Instituto Nacional de Estadísticas (INE) en base a la información del censo 2002. Estas proyecciones consideran que una tasa de crecimiento decreciente en el tiempo, igual a 0,89% el 2013 hasta alcanzar 0,01% el 2050.

Para distribuir regionalmente la población total del país, se consideró que el porcentaje de cada región por sobre el total al año 2020 se mantiene constante hasta el 2050.

## **Partición modal del PKM**

La partición modal usada en el modelo MAPS es diferente a la definición tradicional de la ingeniería de transportes, ya que en este caso se usa como una manera de distribuir porcentualmente los kilómetros totales recorridos por la población al conjunto del sistema de transporte de pasajeros, en vez de distribuir la demanda de viajes como en la definición tradicional. Los modos considerados son vehículos particulares, taxis, buses, metro y bicicleta.

Por otra parte, el modelo de proyección de partición modal solo considera el ingreso como variable de entrada, asumiendo que a mayor poder adquisitivo las personas prefieren el transporte particular por sobre el transporte público. Por esta razón se reconoce una alta incertidumbre en esta proyección.

Para el presente estudio, se corrigió la partición modal ajustando los resultados la línea base obtenida con el modelo MAPS con los resultados del último inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero (INGEI). Este ajuste se realizó en el período común entre ambas series (2013- 2016) y para los años posteriores se conservó la evolución porcentual del modelo MAPS Chile. De esta forma se obtuvo la partición modal mostrada en la Figura 24.

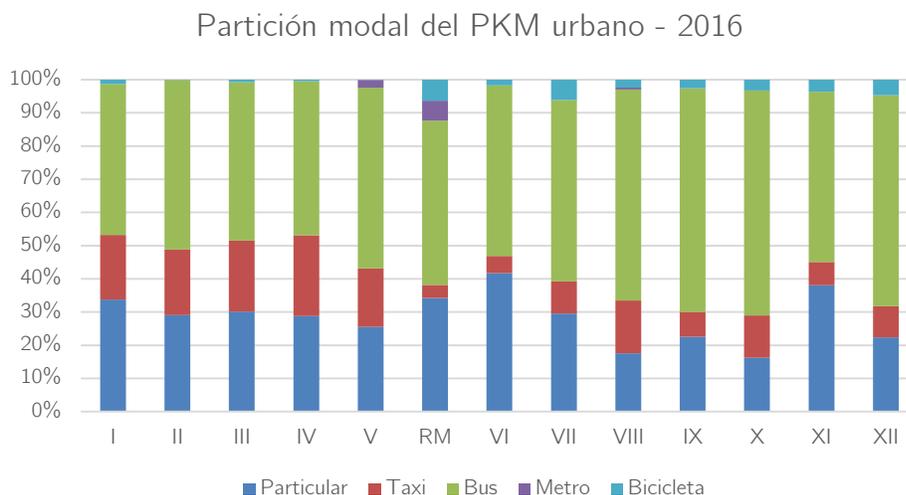


Figura 24: Partición modal del PKM urbano del año 2006 por región. Fuente: Elaboración propia.

## **Tasa de ocupación**

La tasa de ocupación representa la cantidad de pasajeros promedio por vehículo. Este valor se considera constante en la línea base y en la mayoría de los escenarios y fue elaborado por el proyecto MAPS Chile en base a información proporcionada por la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA). Las tasas de ocupación regionales se muestran en la Tabla 6.

*Tabla 6: Tasas de ocupación por modo de transporte y por región. Fuente MAPS CHILE, 2012*

<b>Región</b>	<b>Vehículo particular</b>	<b>Taxi/Taxi colectivo</b>	<b>Bus</b>
I	2,04	2,00	43,00
II	1,95	1,95	43,00
III	1,95	1,60	43,00
IV	1,95	1,60	32,10
V	1,67	1,83	21,56
RM	1,44	2,02	28,69
VI	1,67	1,83	21,56
VII	1,61	2,42	10,37
VIII	1,68	1,85	19,26
IX	1,67	1,83	21,56
X	1,53	1,69	6,10
XI	1,67	1,83	21,56
XII	1,67	1,83	21,56

## **Factor de consumo**

El factor de consumo es la medida del rendimiento de un modo de transporte motorizado y depende del modo de transporte y de la tecnología empleada (diésel, gasolina, eléctrico, etc). En el caso de los vehículos con motor a combustión, este factor se puede determinar a partir del rendimiento, que tiene unidades de [km/litro]. Dividiendo el rendimiento por el potencial calórico del combustible utilizado se obtiene el factor de consumo para cada tecnología. En la Tabla 7 se muestra el rendimiento medio regional al año 2013. Cabe mencionar que el modelo considera que el rendimiento medio mejora a una tasa anual decreciente del orden del 1%, asumiendo que los nuevos vehículos introducidos al mercado tienen mejoras tecnológicas que repercuten en su eficiencia.

Tabla 7: Rendimiento medio de vehículos particulares año 2013. Fuente: MAPS CHILE, 2012

Región	Rendimiento [km/lt]	
	Gasolina	Diésel
I	10,11	10,97
II	10,2	11,06
III	9,95	10,81
IV	10,97	11,83
V	11,41	12,27
RM	9,95	10,81
VI	11,03	11,89
VII	10,65	11,51
VIII	10,51	11,37
IX	10,01	10,87
X	10,23	11,09
XI	10,46	11,32
XII	10,46	11,32
XIV	10,23	11,09
XV	10,11	10,97

#### 5.1.1.2. Transporte de carga

La variable principal que modela la demanda de transporte de carga es el TKM (tonelada-kilómetro), cuya proyección se realiza en base a un modelo econométrico que relaciona dicha variable con el PIB nacional.

El consumo energético para el transporte de carga está dado por la ecuación (8).

$$CC_i = M_i * \frac{TKM}{L_i * FdC_i} \quad (8)$$

Donde:

$CC_i$ : Consumo energético para el tipo de transporte  $i$   $\left[ \frac{TJ}{año} \right]$

$M_i$ : Partición modal del tipo de transporte de carga  $i$  [%]

$TKM$ : Toneladas-kilómetro totales  $\left[ \frac{ton*km}{año} \right]$

$L_i$ : Factor de carga del tipo de transporte de carga  $i$   $\left[ \frac{ton}{veh} \right]$

$FdC_i$ : Factor de consumo del tipo de transporte de carga  $i$   $\left[ \frac{km*veh}{TJ} \right]$

A continuación se describen algunas de las variables relevantes del modelo.

#### TKM

La variable TKM (tonelada-kilómetro) representa la demanda total de transporte de carga, compuesta por la cantidad de masa transportada y la distancia recorrida. La proyección de MAPS

para esta variable se realiza en base a un modelo econométrico que toma como variable de entrada el PIB nacional. El resumen de la proyección de esta variable se encuentra en el Anexo B.2.

### **Partición modal del TKM**

La partición modal de transporte de carga se divide en urbana e interurbana y, a su vez cada una de estas categorías contiene camiones livianos, medianos y pesados. Las particiones modales se mantienen constantes en este modelo y son las que se muestran en la Tabla 8.

*Tabla 8: Partición modal del transporte de carga. Fuente: MAPS CHILE, 2012*

<b>Tipo transporte de carga</b>	<b>Partición Urbano</b>	<b>Partición Inter Urbano</b>
Liviano [%]	34%	0%
Mediano [%]	58%	0%
Pesado [%]	8%	100%

### **Factor de carga**

El factor de carga corresponde a la carga promedio por tipo de camión medida en toneladas. Sus valores se consideran fijos en todo el período de simulación y se resumen en la Tabla 9.

*Tabla 9: Factores de carga por tipo de transporte de carga. Fuente: MAPS CHILE, 2012*

<b>Tipo de transporte de carga</b>	<b>Factor de carga [ton / veh]</b>
Liviano	5,5
Mediano	9
Pesado	14

#### **5.1.2. Transporte marítimo**

El transporte marítimo en Chile es esencialmente un transporte de carga, por lo tanto, MAPS Chile modela su demanda a través de la variable TKM marítimo. Luego se obtiene el consumo de energético (CC) mediante la ecuación (9).

$$CC_{mar} = PKM_{mar} * IE_{mar} \quad (9)$$

Donde  $IE_{mar}$  es un factor de intensidad energética, el cual se supone constante e igual a 0,139 [Mcal/ton-km].

#### **5.1.3. Transporte aéreo**

Se considera que el transporte aéreo es principalmente un modo de transporte de pasajeros, por lo tanto, el consumo energético del transporte aéreo se modela a partir de la variable PKM aéreo, que representa la demanda de este modo de transporte, multiplicándola por un factor de intensidad energética (IE) constante igual a 0,034 [Mcal/pas-km], que representa el consumo energético por unidad de demanda, según la ecuación (10):

$$CC_{a\acute{e}reo} = PKM_{a\acute{e}reo} * IE_{a\acute{e}reo} \quad (10)$$

El modelo MAPS Chile proyecta la variable PKM, considerando un crecimiento acelerado en la demanda de transporte a\acute{e}reo, asociado al incremento en el nivel de ingresos de la poblaci3n, hasta el a\~no 2030, en el cual se asume una saturaci3n que se condice con el desarrollo de este mercado en pa\eds desarrollados. Sin embargo, este modelo presenta resultados que sobreestiman el nivel de emisiones de esta categor\eda en el per\edo 2013-2016 con relaci3n al INGEI. Por lo tanto, se ajust3 la variable PKM a\acute{e}reo correlacionando el resultado de MAPS con los datos presentados en el INGEI, obteniendo la proyecci3n que se encuentra en el Anexo B.3.

## 5.2. Línea base

El escenario Business As Usual (BAU) para las emisiones totales a nivel nacional se obtiene proyectando linealmente cada subcategoría del INGEI siguiendo la tendencia de los últimos 10 años, excepto para el transporte. Para incorporar este último sector se determina una línea base para el período 2017 - 2050 mediante el modelo MAPS Chile descrito en la sección 5.1.

En el caso del transporte terrestre, este modelo asume que a medida que aumenta el PIB per cápita del país, se incrementa el uso de transporte particular y decrece el uso de transporte público. A su vez, en el caso del transporte ferroviario de pasajeros se considera un mayor uso de metro a medida que aumenta la infraestructura en las regiones en que existe este modo de transporte urbano.

En la Figura 25 se muestra el resultado de emisiones proyectadas, clasificadas según las categorías del INGEI, para el sector transporte y para el subsector transporte caminero. En el total de emisiones del transporte se observa un aumento de 41% el 2030 y de 85% el 2050 en relación al año 2016. Actualmente el transporte caminero es el que genera mayor cantidad de emisiones de GEI, abarcando el 88% de las emisiones de todo el transporte con 23,6 [Mt CO<sub>2</sub>eq] (Tabla 10). El 2030 este sector muestra un aumento de 29% y el 2050 un aumento de 72% con respecto al 2016, llegando a 30 [Mt CO<sub>2</sub>eq] y a 40 [Mt CO<sub>2</sub>eq] anuales respectivamente. Aunque el mayor crecimiento se observa en el transporte aéreo, cuyas emisiones se triplican el 2030, pasando de representar el 6,2% al 13,4% del sector transporte.

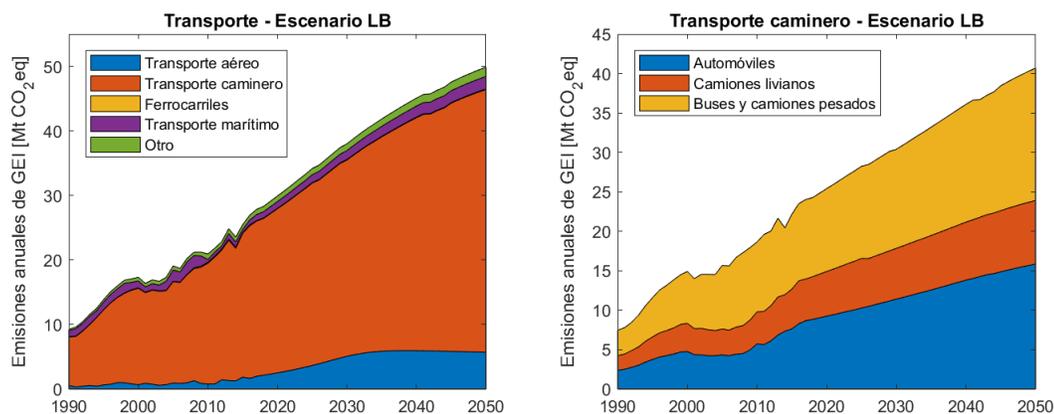


Figura 25: Emisiones anuales de GEI históricas (1990-2016) y Línea Base proyectada (2017-2050). Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10: Proyección de las emisiones anuales de GEI en el sector transporte, período 2016-2050

Tipo de transporte	Emisiones anuales [kt CO2eq]				
	2016	2020	2030	2040	2050
<b>Aéreo</b>	1.675	2.522	5.090	5.958	5.720
<b>Caminero</b>	23.611	25.421	30.402	36.101	40.700
<b>Ferrocarriles</b>	153	67	79	81	82
<b>Marítimo</b>	745	1.051	1.387	1.706	1.943
<b>Otro</b>	752	865	1.055	1.246	1.437
<b>Total Transporte</b>	26.936	29.926	38.013	45.093	49.882

En la Tabla 11 se resume el resultado de emisiones anuales de GEI del transporte caminero, donde se observa que el mayor incremento corresponde a los automóviles, cuyas emisiones se aumentan un 38% el 2030 y prácticamente se duplican el 2050 con respecto al 2016, pasando de representar el 35% de las emisiones del transporte caminero el 2016 al 39% el 2050, es decir, el 32% de todo el sector transporte.

Tabla 11: Proyección de las emisiones anuales de GEI en el subsector transporte caminero

Tipo de transporte	Emisiones anuales [Mt CO2eq]				
	2016	2020	2030	2040	2050
<b>Automóviles</b>	8,3	9,3	11,4	13,8	15,9
<b>Camiones livianos</b>	5,4	5,7	6,4	7,4	8,1
<b>Buses y camiones pesados</b>	9,8	10,5	12,6	14,9	16,8
<b>Total transporte Caminero</b>	<b>23,6</b>	<b>25,4</b>	<b>30,4</b>	<b>36,1</b>	<b>40,7</b>

### 5.3. Escenarios de mitigación en el transporte terrestre de pasajeros

Dentro del modelo descrito para el transporte terrestre de pasajeros se pueden identificar dos tipos de modificaciones que pueden ser incentivadas. El efecto de modificar una o varias de ellas genera distintos escenarios de mitigación a estudiar. Estas medidas y las variables involucradas son:

- **Cambios relativos al comportamiento de los usuarios del transporte.** Aquellos que no involucran inversión significativa en nuevas tecnologías: variaciones en la distribución de particiones modales y cambios en tasa de ocupación vehicular (promedio de pasajeros por vehículo).
- **Cambios relativos a la tecnología.** Aquellos que requiere inversión pública y/o privada para adquirir nueva tecnología: incorporación de vehículos livianos eléctricos y electrificación del transporte público.

#### 5.3.1. Aumento en el uso del transporte público (escenario TP20)

Se determina el efecto de variar el valor de la partición modal de buses urbanos de forma progresiva, creciendo linealmente entre el 2020 y el 2050, hasta alcanzar un aumento de 20 puntos porcentuales al 2050 en todas las regiones de Chile. Este aumento se realiza a costa de la partición modal de vehículos particulares y de taxis, que decae proporcionalmente.

#### 5.3.2. Aumento en la tasa de ocupación vehicular (escenario TO1)

Este escenario considera el aumento en la cantidad promedio de pasajeros por vehículo particular, asumiendo un alto nivel de conciencia en la población, en una sociedad que promueve la eficiencia energética, lo que incentiva la práctica de compartir el automóvil para viajes con fines laborales. Este incremento se incorpora linealmente entre el 2020 y el 2050 hasta sumar un pasajero más por vehículo el último año.

Algunas medidas aplicadas en el mundo para incentivar el aumento en la tasa de ocupación son la implementación de vías exclusivas para vehículos con un mínimo establecido de pasajeros, exención de peaje a vehículos con alta ocupación en autopistas, reducción en precios de estacionamientos a vehículos que transportan un mínimo de pasajeros, campañas de fomento del car-pooling (compartir vehículo) y la instalación de centros de encuentro entre “car-poolers” (Sammer, Meschick, & Roider, 1999).

Cabe mencionar que este aumento en la tasa de ocupación, equivalente a 0,03 [pas/veh/año], es poco probable y difícil de alcanzar. Aunque experiencias y simulaciones en ciudades europeas han logrado aumentar la tasa de ocupación a velocidades cercanas a la mitad de ese valor, tomando medidas como las descritas anteriormente (Sammer, Meschick, & Roider, 1999).

#### 5.3.3. Electrificación total del transporte público urbano al 2040 (escenario TPE)

A fines del 2018, en el contexto de la COP24, el Gobierno de Chile anunció la incorporación gradual de buses eléctricos a la flota del transporte público y se fijó la meta de que al año 2040 todos los buses del transporte público urbano nacional sean eléctricos.

Para evaluar el efecto de esta medida se consideró un incremento lineal en el porcentaje de buses eléctricos dentro de la flota urbana de cada región, desde 0% el 2020 hasta un 100% el 2040. Este escenario asume el supuesto de que la demanda eléctrica adicional es satisfecha por energías limpias, reduciendo efectivamente las emisiones de GEI asociadas al transporte público.

#### 5.3.4. Electrificación del mercado de vehículos livianos (escenario VE)

Como se vio en la sección 3.2.2, el 2016 los automóviles representaron el 31% de las emisiones de GEI del transporte terrestre y, de continuar con la tasa de incremento media anual de la última década, los vehículos livianos pasarán a ser el modo de transporte terrestre más contaminante el año 2020.

Este escenario considera una alta tasa de incorporación de vehículos particulares eléctricos, hasta alcanzar el 100% del parque automotriz el año 2050, asumiendo que la demanda eléctrica adicional es satisfecha por fuentes renovables. Para ello se utilizó un modelo de difusión tecnológica, basado en la ecuación (11).

$$S(P, t) = A(t) * M(P) \quad (11)$$

Donde:

$P$ : Período de retorno (“payback”) en el año  $t$ .

$S(P, t)$ : Participación en las ventas totales en el año  $t$  dado el período de retorno  $P$ .

$A(t)$ : Tasa de adopción de la tecnología en el año  $t$ .

$M(P)$ : Participación máxima en las ventas dado el período de retorno  $P$ .

Y la tasa de adopción de tecnología se calcula según el modelo de difusión de Bass descrito por la ecuación

$$A(t) = \frac{1 - e^{-(p+q)(t-t_0)}}{1 + \frac{p}{q} e^{-(p+q)(t-t_0)}} \quad (12)$$

Donde  $t_0$  es el año inicial de introducción de la nueva tecnología,  $p$  representa el coeficiente de innovación que caracteriza a los usuarios que adoptan la tecnología tempranamente y  $q$  un coeficiente de imitación que caracteriza a quienes adoptan la tecnología más tarde. En la Figura 26 se muestra el resultado de dos curvas de participación de vehículos eléctricos en las ventas totales, un escenario moderado (E2BIZ Consultores, 2017) y un escenario ambicioso que propone una participación de vehículos eléctricos que alcanza el 50% del mercado el año 2030 y que culmina con el 100% del parque vehicular liviano eléctrico el 2050.

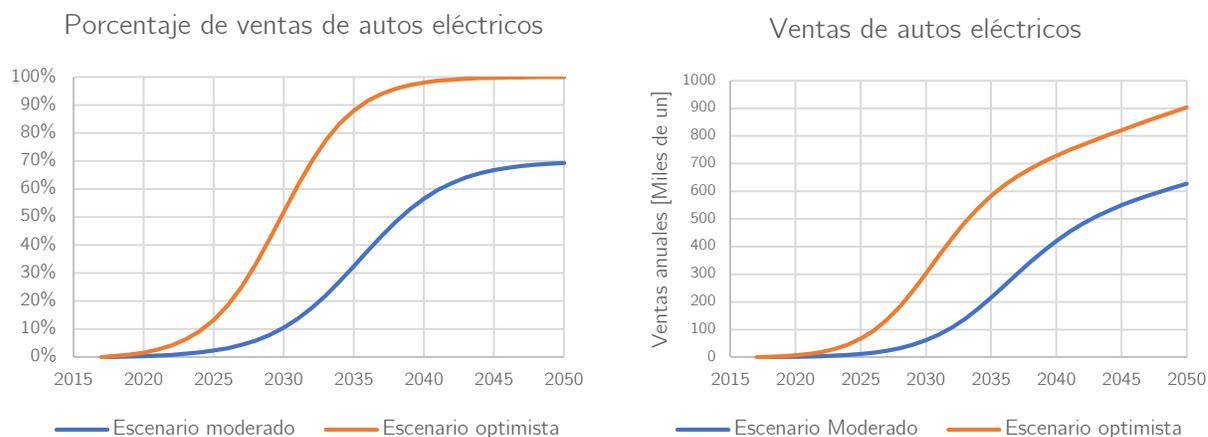


Figura 26: Ventas de vehículos eléctricos livianos según modelo de difusión de Brass. Fuente: Elaboración propia en base a E2BIZ Consultores (E2BIZ Consultores, 2017).

Para modelar la introducción de vehículos eléctricos se consideró una tasa de crecimiento constante del parque automotriz, según las proyecciones de la asociación de la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC) hasta el 2030 (ANAC, 2018) y la proyección lineal del período 2018-2030 hasta el año 2050. Este supuesto implica que al 2050 habrá 14,6 millones de automóviles en circulación, es decir, 3 veces el parque automotriz actual, lo que resulta coherente con la tasa de motorización de 650 vehículos particulares por cada 1000 habitantes al 2050, obtenida en la línea base de MAPS Chile (MAPS Chile, 2012). Esta cifra se considera acorde con la tasa de motorización de países de la OCDE.

Aunque se alcance la saturación antes de 2050, en términos de emisiones este escenario es equivalente a retirar vehículos a combustión de circulación mediante otros métodos que no sean su reemplazo por tecnología eléctrica, o una combinación de ambas, como se puede inferir de la Figura 27. Por ejemplo, un escenario que considere la saturación del parque en 7,5 millones de vehículos el 2030 y el reemplazo gradual de vehículos a combustión con tecnología eléctrica, hasta electrificar completamente el transporte particular de pasajeros el 2050, es equivalente al propuesto anteriormente en términos de emisiones. Aunque este nuevo escenario involucra solamente la introducción de la mitad de los vehículos eléctricos del escenario inicialmente planteado.

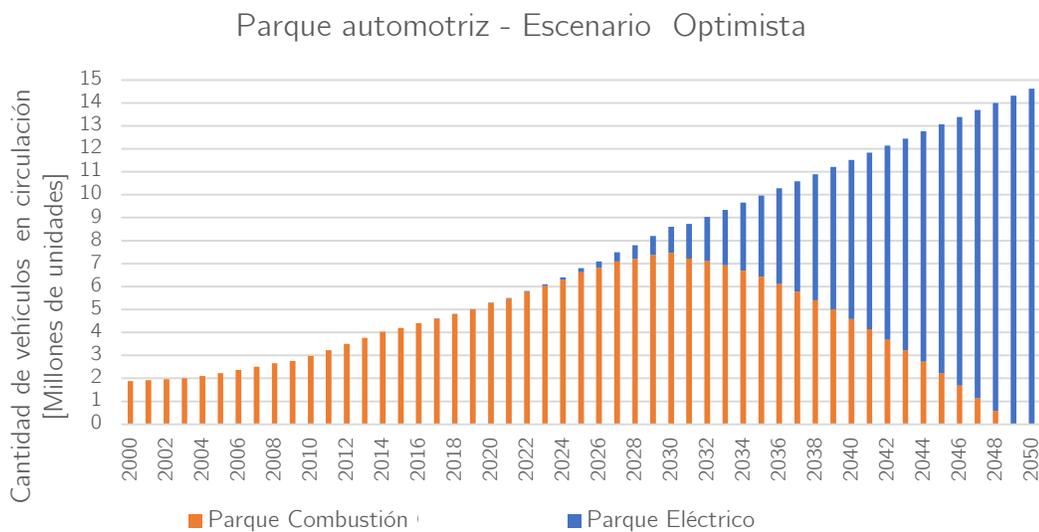


Figura 27: Parque automotriz de vehículos a combustión y eléctricos en el período 2000 -2050, escenario optimista. Fuente: Elaboración propia

### 5.3.5. Electrificación total del transporte urbano de pasajeros (escenario TPE + VE)

Este escenario considera el efecto combinado de incorporar tecnología eléctrica en el parque automotriz hasta un 100% el 2050 y electrificar el transporte público completamente al 2040.

### 5.3.6. Todas las medidas de mitigación del transporte urbano de pasajeros (escenario ambicioso)

Finalmente se estima el efecto combinado de todas las medidas descritas anteriormente para el transporte de pasajeros.

## 5.4. Emisiones de GEI bajo escenarios de mitigación

En la Figura 28 y en la Figura 29 se muestran los resultados obtenidos con el modelo MAPS Chile para las emisiones anuales de GEI del transporte terrestre, a la izquierda, y del subsector terrestre caminero a la derecha. En ellos se observa que solo los escenarios que consideran un recambio de automóviles por vehículos eléctricos permiten una estabilización en las emisiones del sector.

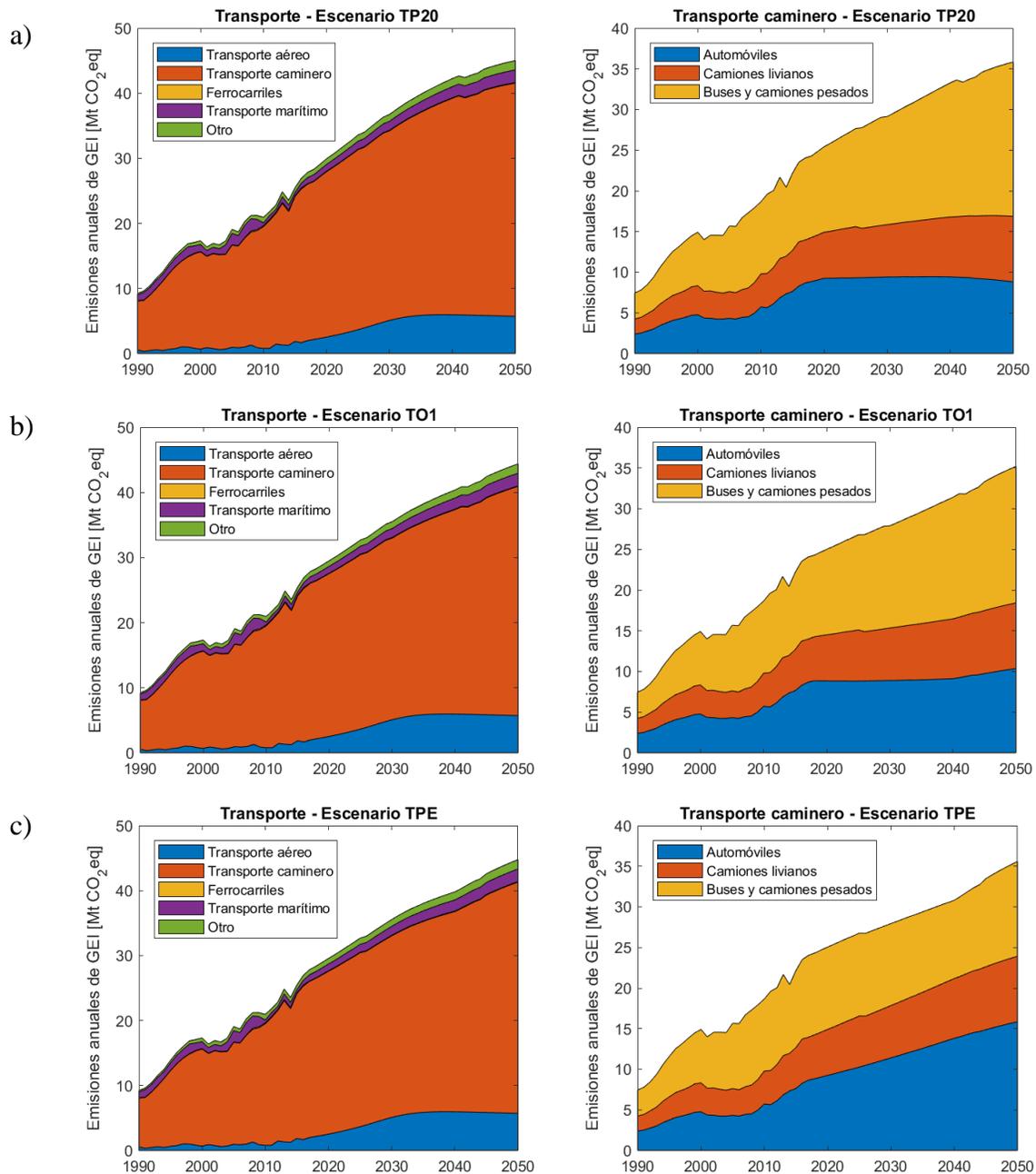


Figura 28: Emisiones anuales de GEI históricas (1990-2016) y proyectadas (2017-2050), escenarios TP20, TO1 y TPE. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 28 a) y b) se observa que tanto aumentar la tasa de ocupación (TO1) como aumentar la partición modal buses urbanos (TP20) permite limitar el crecimiento en las emisiones de GEI de

automóviles. Sin embargo, el aumento en la demanda de transporte público en base a diésel y de camiones, especialmente en el primer caso, tiene como consecuencia que continúe aumentando el nivel de emisiones en el transporte caminero. La Figura 28 c), por otra parte, muestra que a pesar de que a partir del 2020 se produce un estancamiento en el nivel de emisiones de los buses, el aumento sostenido en el uso de automóviles impide que se revierta la tendencia al alza en el sector.

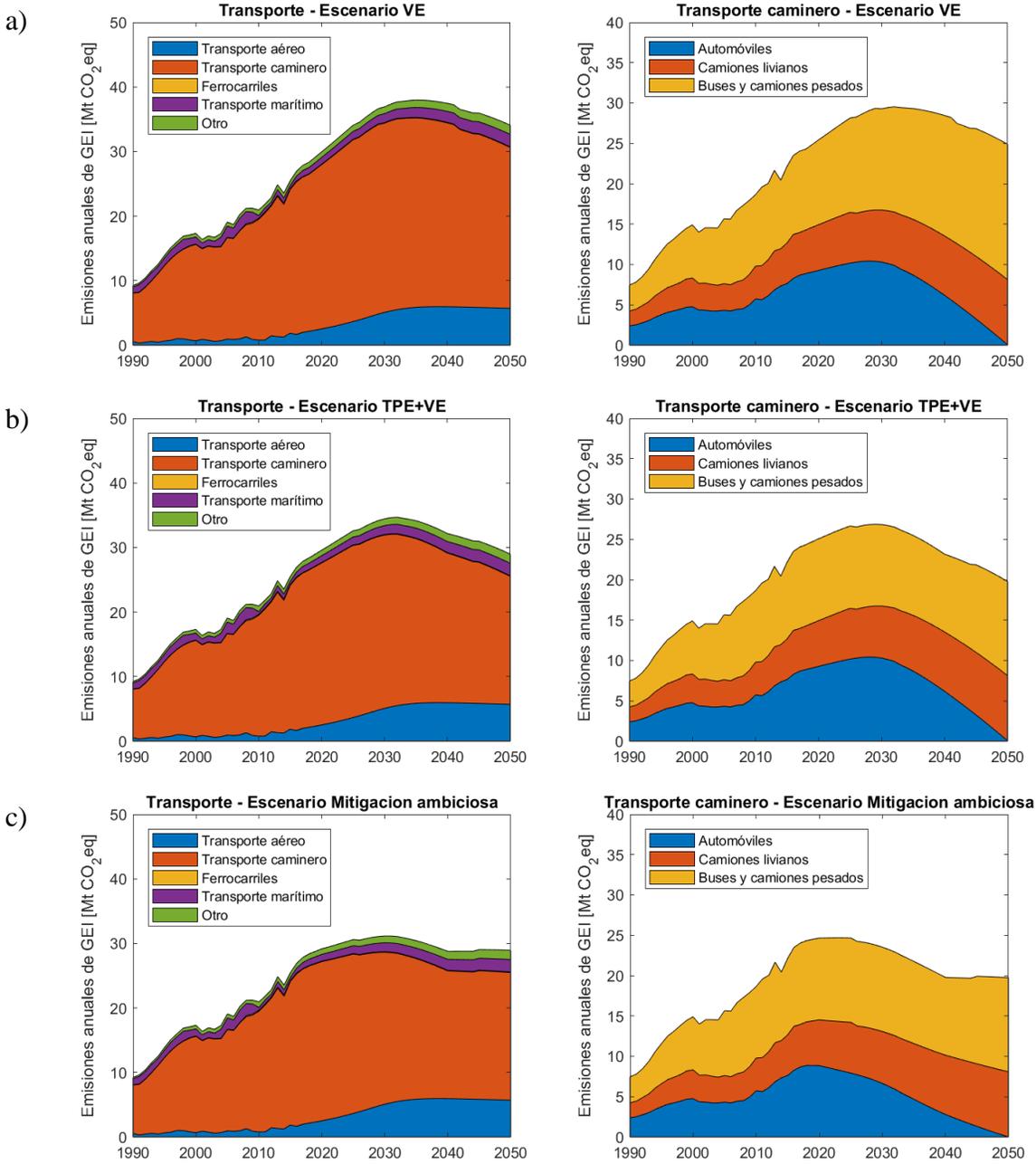


Figura 29: Emisiones anuales de GEI históricas (1990-2016) y proyectadas (2017-2050), escenarios VE, TPE+VE y Mitigación ambiciosa. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 29 a) se puede ver que un recambio de vehículos livianos por tecnología eléctrica (VE) puede invertir la tendencia en las emisiones de GEI del transporte sin otro tipo de medidas adicionales. Sin embargo, cabe mencionar que la introducción masiva de vehículos eléctricos, como se supone en este escenario, depende de que sus precios disminuyan hasta poder competir con vehículos de combustión, lo que a su vez depende fuertemente del precio de las baterías.

En la Figura 29 b) y c) se muestra el efecto combinado de escenarios anteriores, que tiene como resultado una disminución del máximo de emisiones alcanzado. Además, en el escenario ambicioso, que incluye las cinco medidas anteriores, el máximo se alcanza alrededor del 2020, adelantándose 10 años con respecto a los escenarios de electrificación.

En la Tabla 12 se puede ver que el efecto de aumentar la tasa de ocupación vehicular en un pasajero por vehículo (TO1) es equivalente a la electrificación total del transporte público (TPE), ahorrando aproximadamente un año de emisiones totales de GEI a los niveles actuales, aunque el primer escenario es mucho menos probable.

Dada la relevancia creciente de los automóviles dentro de las emisiones del sector transporte, la medida de mitigación más efectiva es la electrificación del parque de vehículos particulares, permitiendo la reducción de un 27% de las emisiones de GEI en relación a la línea base en el período 2020-2050.

El efecto combinado de todos los escenarios de mitigación evaluados alcanza una reducción del 34% en las emisiones de GEI acumuladas con respecto a la línea base. Para lograr una mayor disminución es imprescindible que se produzca la rápida introducción de vehículos eléctricos de carga y buses eléctricos interurbanos, que en el escenario más ambicioso llegan a representar el 68% del total de GEI del sector transporte el 2050 (Figura 29 c).

*Tabla 12: Emisiones de GEI acumuladas en el período 2020-2050 bajo distintos escenarios de mitigación*

Categoría	Emisiones acumuladas período 2020-2050 [Mt CO <sub>2</sub> eq]						
	LB	TP20	TO1	TPE	VE	TPE+ VE	Ambi cioso
Automóviles	390	288	285	390	223	223	144
Camiones para servicio ligero	214	214	214	214	214	214	214
Camiones para servicio pesado y buses	425	460	425	319	425	319	323
Total	1030	962	925	923	862	756	682
<b>Diferencia con la Línea base</b>	<b>0</b>	<b>-67</b>	<b>-105</b>	<b>-107</b>	<b>-167</b>	<b>-274</b>	<b>-348</b>

## **6. Evaluación de escenarios de mitigación**

En este capítulo se evalúan los distintos escenarios de mitigación del cambio climático presentados en los capítulos anteriores, en base a la comparación con escenarios compatibles con un calentamiento de 1,5°C y con los compromisos determinados a nivel nacional (NDC). Esto con el fin de valorar la pertinencia y el aporte de los cambios propuestos en relación a los objetivos acordados a nivel global.

Por otra parte, en este capítulo el escenario de mitigación en el transporte equivale al escenario ambicioso de mitigación en el sector, que incluye el conjunto del total de medidas analizadas en el capítulo 5. Del mismo modo, el escenario de mitigación en la generación eléctrica considera el escenario A6 de retiro de centrales termoeléctricas a carbón, que supone bajos costos de inversión en energías renovables no convencionales y, por lo tanto, presenta la mayor reducción en el nivel de emisiones de GEI.

### **6.1. Criterios de evaluación**

A continuación, se proponen tres criterios para evaluar los escenarios de mitigación. Dos de ellos se basan en las trayectorias de emisiones globales de GEI propuestas en el Informe Especial 1,5 °C (IPCC, 2018), compatibles con un calentamiento global de 1,5 °C: uno que solo considera las emisiones y otro que además incorpora las absorciones del sector UTCUTS. El último se basa en uno de los compromisos determinados a nivel nacional (NDC) que propone una reducción a la intensidad de emisiones en función del PIB nacional.

#### **6.1.1. Trayectorias de emisiones propuestas para Chile como contribución a la meta global de mitigación**

Las proyecciones globales de emisiones que limitan el calentamiento global a 1.5 °C por sobre los niveles pre industriales al final de este siglo, fueron generadas con distintos modelos y escenarios de desarrollo bajo en carbono. Estas emisiones anuales proyectadas por el IPCC se presentan a intervalos de 5 años en el período 2010-2100. Para definir la cuota de descarbonización que le corresponde a Chile se consideró la fracción de emisiones de GEI que contribuye el país al nivel global de emisiones simulado el año más reciente en común entre los modelos del SR1.5 y el inventario chileno de emisiones, que es el 2015. El resultado se promedió sobre todas las trayectorias, estimando que Chile generó aproximadamente el 0,27% de las emisiones globales de GEI simuladas en dicho año. De esta forma, se definió una serie de curvas 1,5 °C para Chile, ponderando las trayectorias globales por la fracción del aporte chileno estimado, las que se presentan en la Figura 30, junto con el promedio referencial de todas ellas.

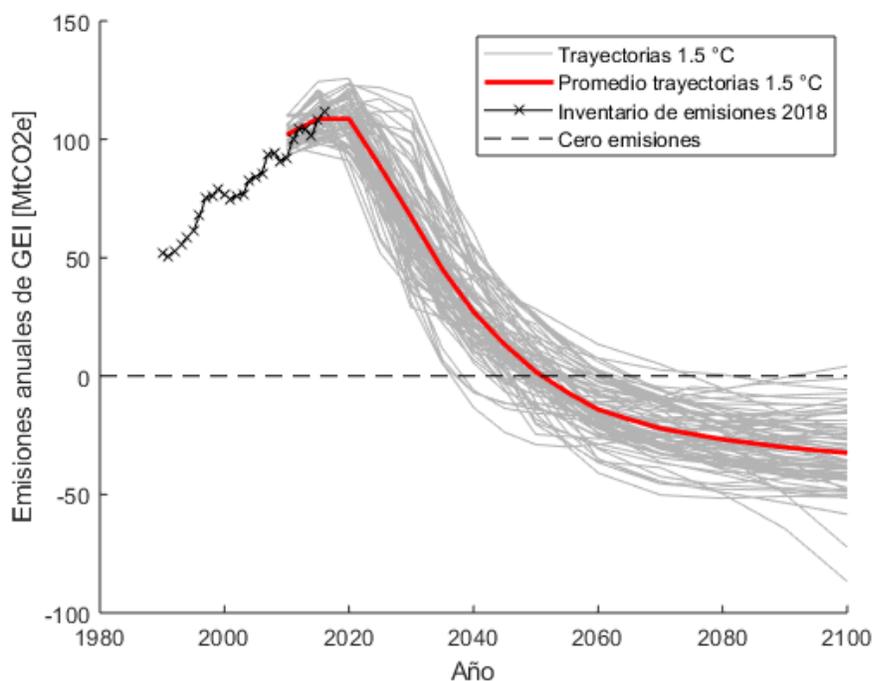


Figura 30: Trayectorias de emisiones anuales determinadas como aporte de Chile al objetivo de calentamiento de 1,5 °C.  
Fuente: Elaboración propia

### 6.1.1. Trayectorias de emisiones netas considerando el sector UTCUTS

La categoría Uso de la tierra, cambios en el uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS) registra un nivel de emisiones neto negativo en Chile. Sin embargo, esta captura de GEI presenta una alta variabilidad inter anual, la que se debe principalmente a los incendios periódicos que afectan tanto al bosque nativo como a plantaciones forestales.

Por otra parte, desde el Gobierno de Chile se ha planteado el objetivo de alcanzar la carbono neutralidad el año 2050, afirmación que considera el balance neto anual de todas las fuentes y sumideros de GEI. Por esta razón a continuación se incorpora un nuevo criterio de evaluación, basado en las trayectorias compatibles con el calentamiento de 1,5 °C definidas por el IPCC, incluyendo el sector UTCUTS.

Considerando la tendencia de los últimos 10 años del balance de emisiones del INGEI, la contribución de Chile al total de emisiones es de 0,16% el año 2015. Aplicando esta fracción se obtienen las curvas de emisiones netas compatibles con el calentamiento de 1,5 °C que se muestran en la Figura 31. En ella también se muestra la serie histórica del balance de GEI en Chile. Se observa que la trayectoria objetivo promedio (en color rojo) equivale aproximadamente a retroceder el camino recorrido entre 1990 y 2020 durante los próximos 30 años, volviendo alrededor del 2050 al nivel neto de emisiones de 1990, que no superaba las 2 [Mt CO<sub>2</sub>eq].

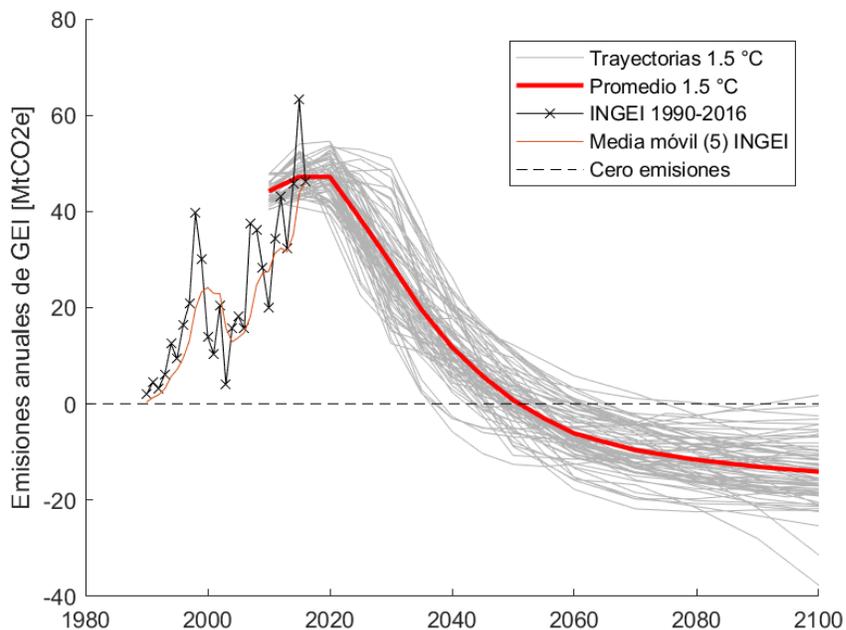


Figura 31: Trayectorias de emisiones netas compatibles con el objetivo de 1,5°C de calentamiento, considerando el sector UTCUTS. Fuente: Elaboración propia

Para incorporar la captura neta del sector UTCUTS a la proyección de emisiones totales en los distintos escenarios se consideró su promedio durante la última década del INGEI 1990-2016. En la Figura 32 se muestra el balance del sector, donde se observa un promedio de emisiones netas igual a -61 [Mt CO<sub>2</sub>eq] para el período 2007-2016. Este nivel de captura de GEI se consideró constante hasta el 2050 y se restó al resultado de los distintos escenarios de mitigación obtenidos anteriormente.

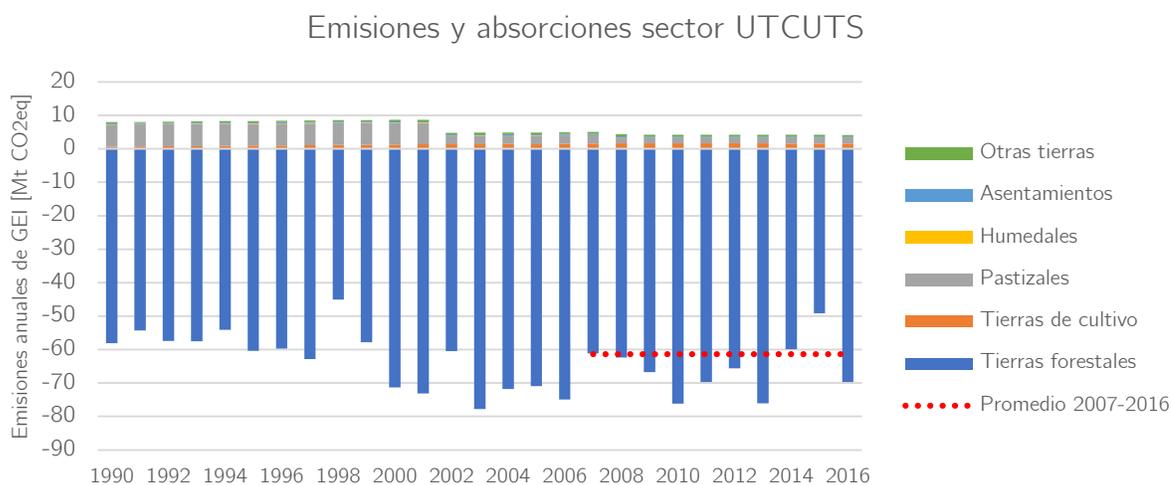


Figura 32: Emisiones y absorciones de GEI en el sector Uso de la tierra, cambios en el uso de la tierra y silvicultura. Fuente: elaboración propia en base a MMA (MMA, 2018)

### 6.1.2. Contribución determinada a nivel nacional (NDC)

Como se expuso en la sección 2.5.2 de este informe, el compromiso actual de Chile ante el CMNUCC es reducir la intensidad de sus emisiones de GEI, medida como emisiones de CO<sub>2</sub>eq por unidad de PIB en un 30% el 2030 con respecto al año 2007. Para evaluar los escenarios de mitigación definidos en el capítulo anterior con la meta de este compromiso, se calcula la intensidad de emisiones en base a los datos disponibles en el INGEI 1990-2016 y al crecimiento del PIB publicado por el Banco Central de Chile, obteniendo las series históricas que se muestran en la Figura 33. Ahí se observa que el 2014 Chile ya cumplía con la mitad del objetivo comprometido en el NDC (línea segmentada), alcanzando el 15% de disminución en la intensidad con respecto al 2007. Sin embargo, la dependencia de este indicador con el PIB nacional explica que en años de bajo crecimiento, como 2015 y 2016, se pueda retroceder significativamente, dado que el nivel de emisiones no varía en la misma proporción. Así, por ejemplo el 2016 se volvió a una intensidad mayor al del 2013, reduciendo su disminución a un 10% con respecto al año 2007.

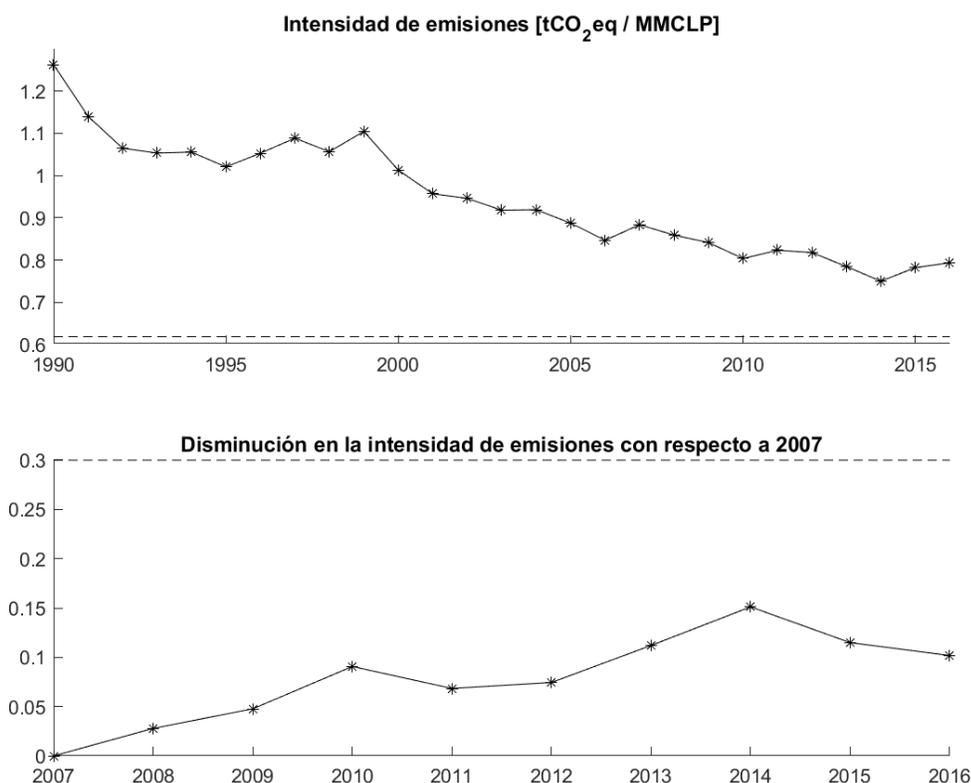


Figura 33: Intensidad de emisiones y variación con respecto al año 2007, en base a información histórica y en relación al NDC  
a). Fuente: Elaboración propia

## 6.2. Escenario Business As Usual

El escenario Business As Usual (BAU) se definió de manera simplificada, asumiendo que hasta el 2050 se mantiene la tendencia lineal de los últimos 10 años reportados en el INGEI 1990-2016 en cada subcategoría del inventario, excepto el transporte. En este último sector se consideró la línea base obtenida con el modelo MAPS Chile, ajustada a los datos reportados en el INGEI en el período posterior al proyecto, tal como se describió en el capítulo 5.

### 6.2.1. Emisiones compatibles con la meta de 1,5 °C de calentamiento

En la Figura 34 se muestra el resultado del escenario BAU en relación a las trayectorias 1,5 °C y a la tendencia 1990-2016. Se puede ver que el nivel de emisiones en el escenario BAU está por encima de la tendencia observada del período 1990-2016, debido a que la tasa media de aumento anual en las emisiones ha sido mayor en la última década en relación al período anterior.

Si siguiendo esta trayectoria, el 2030 nivel anual de emisiones habrá aumentado 31% con respecto al 2016, mientras que las trayectorias 1,5 °C muestran entre un descenso máximo de 71% y un aumento máximo de 5% en el mismo período, como se puede apreciar en la Figura 34. La trayectoria 1,5 °C promedio, a su vez, muestra un descenso de 38%, lo que implica una diferencia de 80 [Mt CO<sub>2</sub>eq] en el nivel anual con el escenario BAU.

El 2050 se acentúa la diferencia, ya que la trayectoria 1,5 °C que menos ha decrecido alcanza una disminución de 73% con respecto al 2016 y la trayectoria promedio alcanza menos de 2 [Mt CO<sub>2</sub>eq/año], mientras que el escenario BAU aumenta 78% en el mismo período, llegando a 200 [Mt CO<sub>2</sub>eq/año].

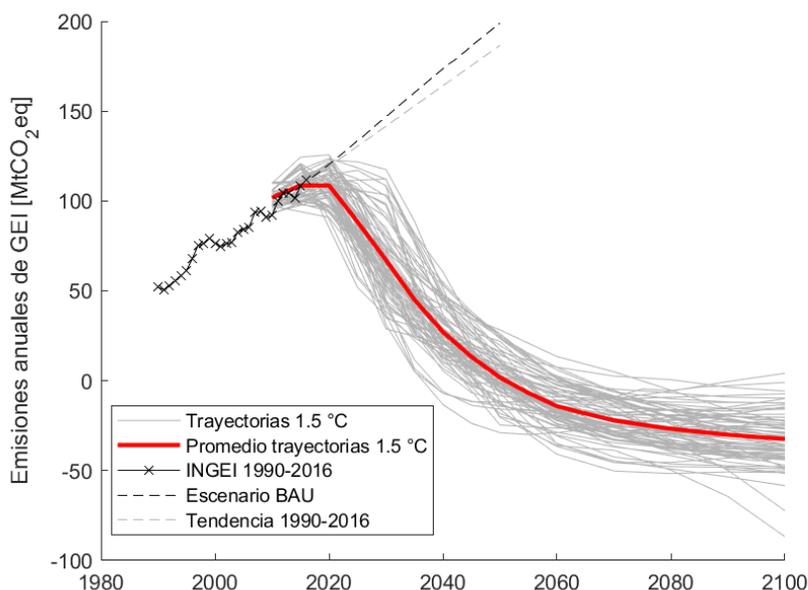


Figura 34: Escenario BAU y trayectorias compatibles con el calentamiento de 1,5 °C. Fuente: Elaboración propia.

Similar resultado se obtiene con las trayectorias de emisiones netas, que se muestran en la Figura 35. Ahí se observa una diferencia de 46 [MtCO<sub>2</sub>eq/año] entre el escenario BAU y el promedio 1,5 °C el 2030 y de 142 [MtCO<sub>2</sub>eq/año] el 2050.

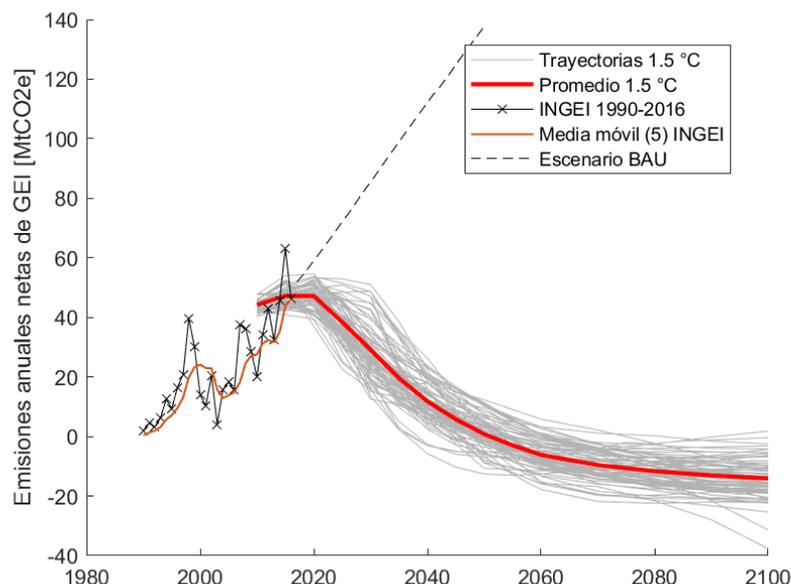


Figura 35: Balance de emisiones y absorciones histórico, escenario BAU y trayectoria de emisiones netas compatibles con la contribución al límite de calentamiento de 1,5 °C. Fuente: Elaboración propia.

### 6.2.2. NDC

Para evaluar escenarios de mitigación con respecto al NDC, en primer lugar se busca obtener una proyección del PIB nacional hasta el año 2030. Esta se basa en el modelo de proyección del crecimiento del PIB nacional utilizado en el proyecto MAPS Chile, el cual fue elaborado para el período 2013-2050, considerando tres escenarios de crecimiento: bajo, medio y alto. Según el crecimiento económico observado entre 2013 y 2018, la trayectoria seguida se ubica por debajo del escenario de bajo crecimiento, por lo tanto se asume esta última proyección a partir de 2018, corrigiendo la tasa de crecimiento de 2019 por el valor de variación del PIB de 3,5%, anunciado por el Ministerio de Hacienda para dicho año. Este escenario de bajo crecimiento se considera en este informe como el nuevo escenario medio y se definen dos nuevos escenarios bajo y alto sumando y restando 1 punto porcentual al escenario medio, según la metodología usada en MAPS Chile (MAPS Chile, 2014). En la Figura 36 se muestra la serie histórica y las proyecciones de la variación del PIB.

### Variación anual del PIB chileno

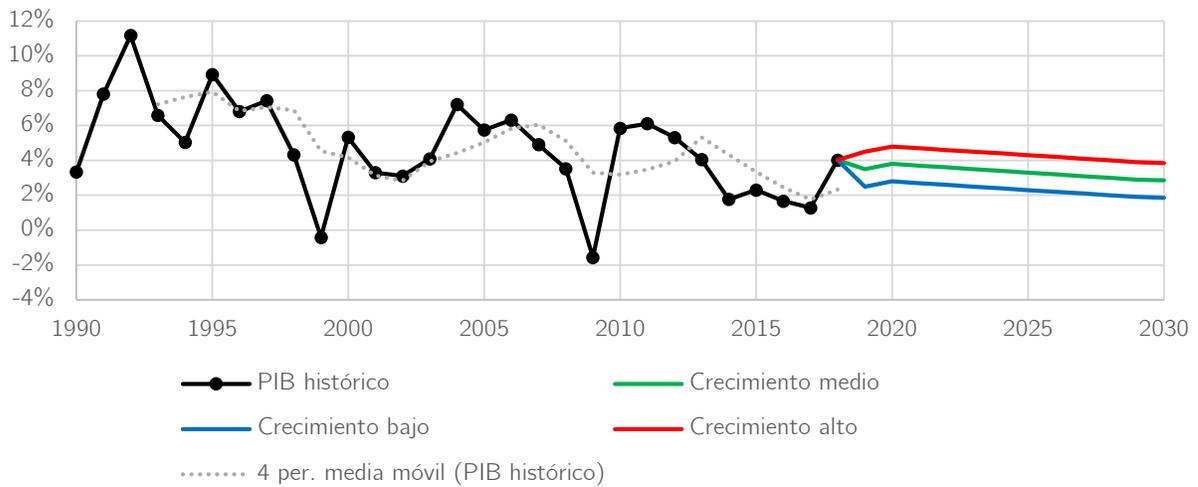


Figura 36: Variación del PIB nacional, serie histórica 1990--2018 y proyecciones hasta el 2030. Fuente: elaboración propia en base a datos del Banco Central

Con esta variable y en base al escenario BAU descrito anteriormente se obtiene la evolución en la intensidad de emisiones presentada en la Figura 37, cuya tendencia es marcadamente a la baja desde 1999. Junto con las proyecciones se muestra la intensidad buscada al 2030 según este compromiso, considerando que el año 2007 este indicador alcanzó el valor de 0,88 [tCO<sub>2</sub>eq/MMCLP].

### Intensidad de emisiones [tCO<sub>2</sub>eq / MMCLP] - Mitigación en Generación eléctrica y Transporte

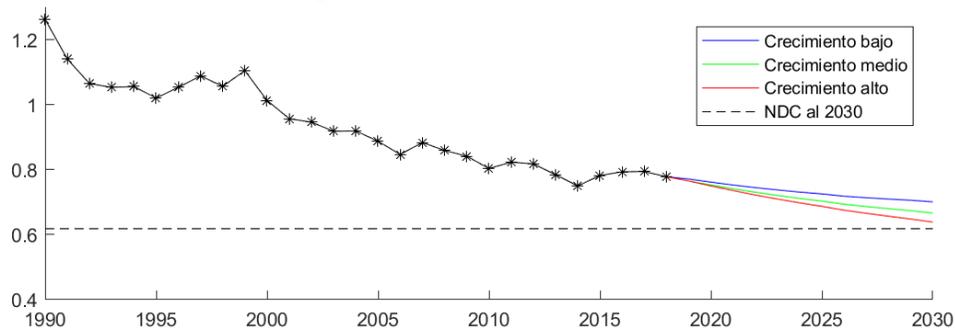


Figura 37: Intensidad de emisiones de GEI en el período 1990-2030 bajo tres escenarios de crecimiento económico y escenario BAU de emisiones. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 37 además se muestra la disminución en la intensidad de emisiones con respecto al 2007, que mostraba una tendencia que se dirigía rápidamente hacia el objetivo hasta alcanzar un máximo de disminución del 15,1% el 2014, es decir, en 7 años se había alcanzado la mitad del objetivo sin esfuerzos. Sin embargo, se estima que el 2018 esta disminución fue de un 10,2%, presentando un retroceso con respecto al NDC, debido principalmente al estancamiento en el crecimiento económico que entre 2014 y 2017 promedió solo un 1,8% expresado como variación del PIB.

### 6.3. Evaluación de escenarios con respecto a las trayectorias compatibles con la meta de 1,5 °C

En la Figura 38 se muestra el total de emisiones a nivel nacional para los distintos escenarios de mitigación y BAU. En ella se observa que hasta el 2030, tanto el escenario de retiro de centrales a carbón (puntos azules) como el escenario combinado (puntos verdes) se mantienen dentro de la serie de curvas compatibles con el calentamiento de 1,5 °C, dado que ambos logran estabilizar el nivel anual de emisiones de GEI. En efecto, como se observa en la Tabla 13, la tasa de variación anual de emisiones de GEI en la década 2020-2030 se reduce a 0,20 [Mt CO<sub>2</sub>eq / año] promedio en el escenario de mitigación en la generación eléctrica y a -0,42 [Mt CO<sub>2</sub>eq / año] si se incorpora la mitigación en el transporte. Durante la década siguiente, ambas curvas manifiestan un descenso medio de -0,47 [Mt CO<sub>2</sub>eq / año] y -1,42 [Mt CO<sub>2</sub>eq / año], respectivamente. Sin embargo, este descenso ocurre tardíamente en relación a las curvas compatibles con 1,5 °C y por debajo del promedio de estas, cuya variación anual alcanza -4,0 [Mt CO<sub>2</sub>eq / año].

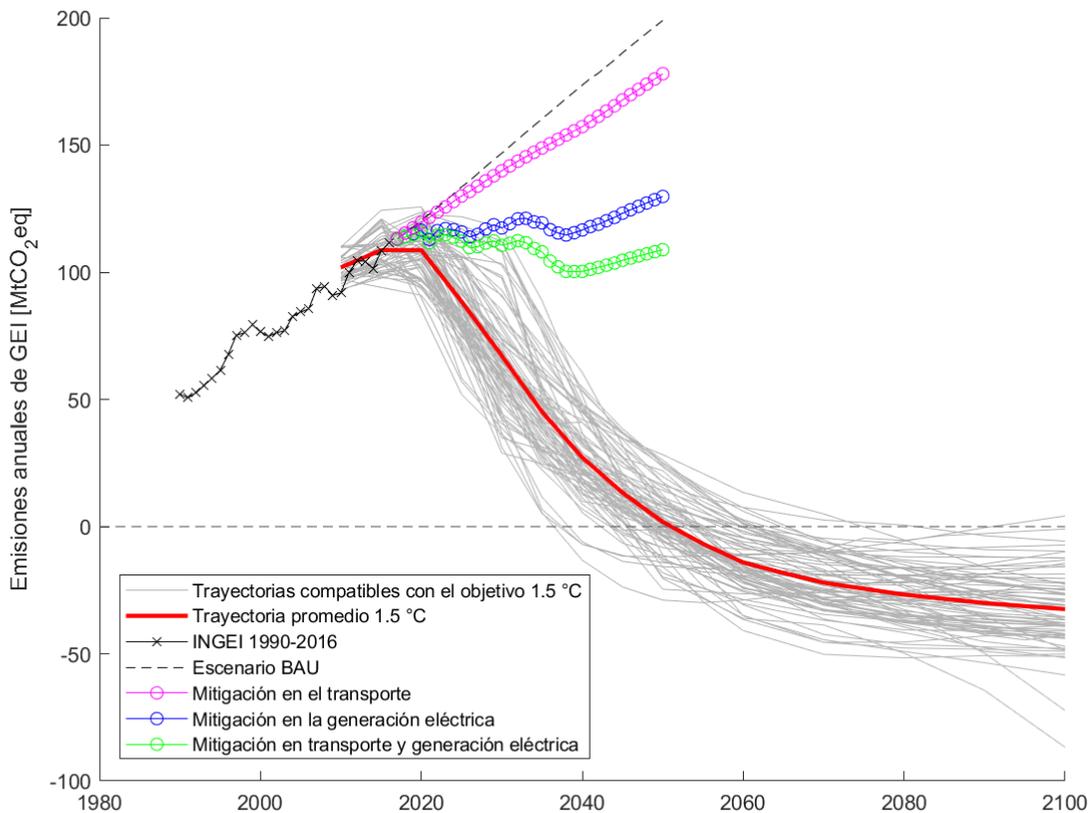


Figura 38: Trayectorias de emisiones de GEI bajo distintos escenarios de mitigación. Fuente: elaboración propia

Tabla 13: Tasas de variación media en el nivel anual de emisiones por década, escenarios de mitigación, escenario BAU y promedio de trayectorias 1,5 °C

Sector / curva	Escenario	Tasa de variación media anual [Mt CO <sub>2</sub> eq / año]			
		2020-2030	2030-2040	2040-2050	2020-2050
Trayectorias 1.5°C	Promedio	-4,2	-4,0	-2,5	-3,6
Business as usual	BAU	2,7	2,7	2,6	2,6
Transporte	Ambicioso	2,0	1,7	2,1	1,9
Generación eléctrica	A6	0,2	-0,5	1,3	0,4
Transporte + Energía	A6 + Amb.	-0,4	-1,4	0,9	-0,3

En la Tabla 14 se resume el nivel de emisiones de GEI acumuladas por década en los distintos escenarios. En todos ellos, la acumulación por década supera al promedio de trayectorias 1,5 °C. El escenario de mitigación más fuerte, que considera medidas en la generación eléctrica y en el transporte, permite una reducción total de 1.564 [Mt CO<sub>2</sub>eq] en el período 2020-2050, pero al mismo tiempo mantiene una brecha de 1.752 [Mt CO<sub>2</sub>eq] con respecto a la trayectoria promedio compatible con la meta global de calentamiento de 1,5 °C.

Tabla 14: Emisiones de GEI acumuladas por década en el período 2020-2050 por escenarios de mitigación, BAU y promedio de trayectorias 1,5 °C

Sector / curva	Escenario	Emisiones acumuladas [Mt CO <sub>2</sub> eq]			
		2020-2030	2030-2040	2040-2050	TOTAL
Trayectorias 1.5°C	Promedio	882	461	139	1483
Business as usual	BAU	1.335	1.603	1.862	4.799
Transporte	Ambicioso	1298	1.488	1.676	4.462
Generación eléctrica	A6	1.160	1.180	1.231	3.572
Transporte + Energía	A6 + Amb.	1.124	1.065	1.046	3.235

En la Figura 39 se muestra la brecha acumulada por década entre las emisiones estimadas para cada escenario y la trayectoria promedio compatible con el calentamiento de 1,5 °C. En ella se observa nuevamente que ninguno de los escenarios analizados permite alcanzar el objetivo compatible y que en cada década se multiplica la brecha del período 2020-2030 aproximadamente al doble y al triple.

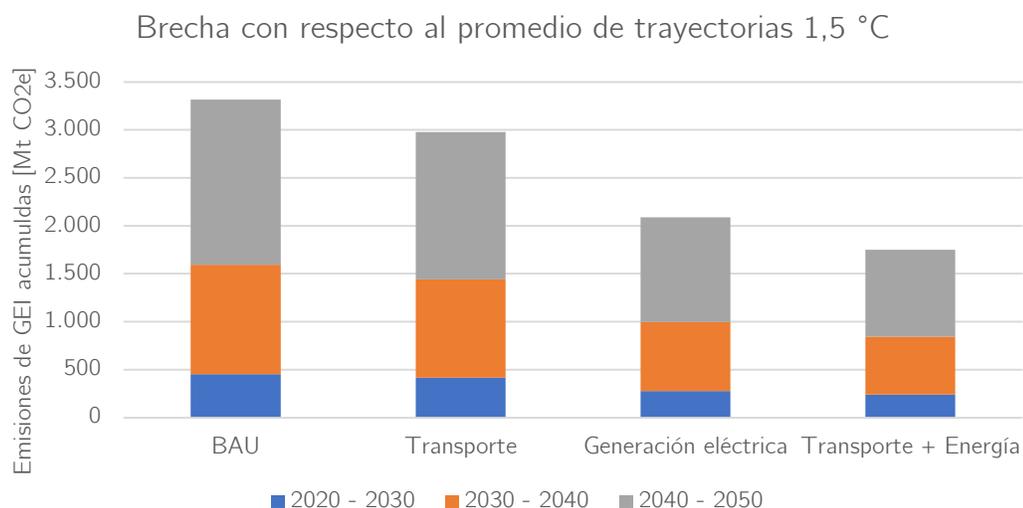


Figura 39: Brecha entre los escenarios de mitigación y el promedio de trayectorias 1.5 °C. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 15 se resume la evaluación de escenarios para el total de emisiones de GEI acumuladas en del período 2020 – 2050.

Tabla 15: Resumen de la evaluación de escenarios de mitigación en el período 2020-2050

Escenario (curva)	Acumulado 2020-2050 [Gt CO2eq]	Brecha c/r a la curva promedio 1.5°C [Gt CO2eq]	Reducción c/r al escenario BAU
Promedio 1.5°C	1,5	0,0	69%
BAU	4,8	3,3	0%
Transporte	4,5	3,0	7%
Generación eléctrica	3,6	2,1	26%
Transporte + Energía	3,2	1,8	33%

#### 6.4. Evaluación de escenarios con respecto a las emisiones netas compatibles con la meta de 1,5 °C

En la Figura 40 se grafican las trayectorias de emisiones para los distintos casos analizados. Ahí se observa que a partir del 2020 todos los escenarios de mitigación se encuentran por encima de las trayectorias compatibles con el calentamiento de 1,5 °C. Aunque, el escenario de mitigación conjunta en el transporte y la generación eléctrica logra estabilizar las emisiones en un nivel cercano a las 60 [Mt CO<sub>2</sub>eq] hasta el 2050.

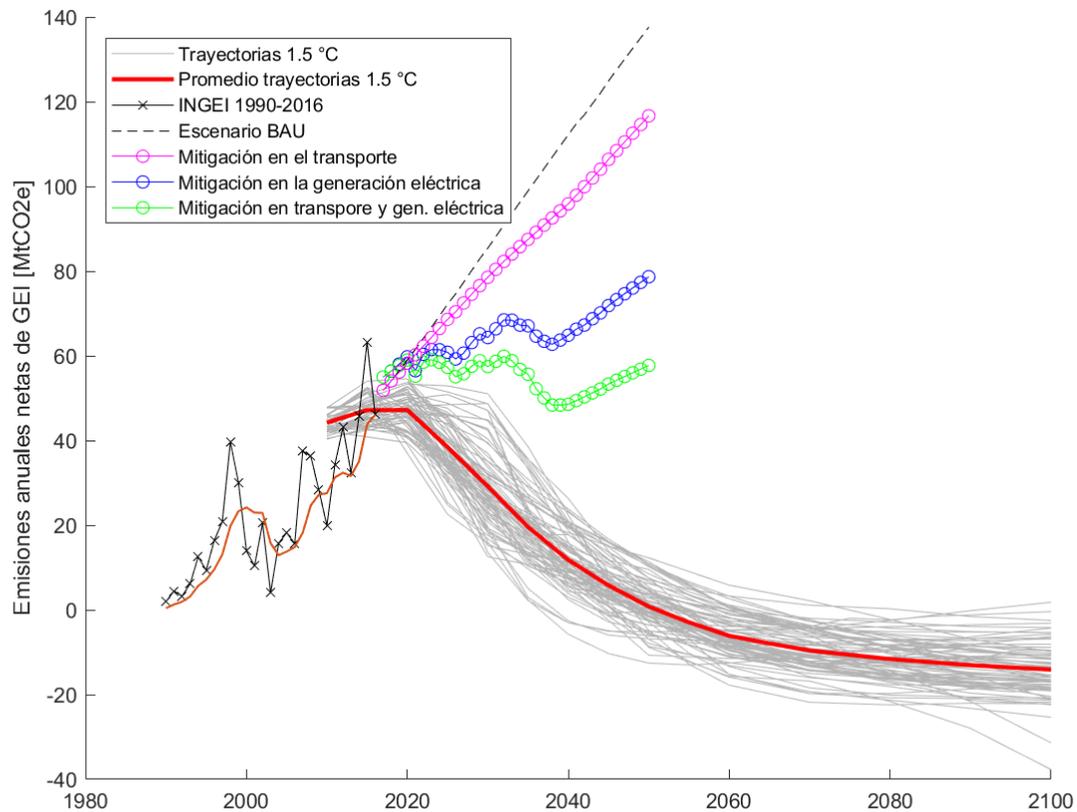


Figura 40: Trayectorias de emisiones netas de GEI bajo distintos escenarios de mitigación. Fuente: elaboración propia

En la

Tabla 16 Tabla 16 se muestran las tasas de variación anual media de las emisiones de GEI para los distintos escenarios de mitigación, en donde queda de manifiesto nuevamente la estabilización en el escenario de mitigación conjunta en la generación eléctrica y el transporte, con variaciones medias anuales negativas entre 2020 y 2040.

Tabla 16: Tasa de variación media en el nivel anual de emisiones por década, escenarios de mitigación, BAU y promedio de trayectorias 1,5 °C

Sector / Curva	Escenario	Tasa de variación media anual [Mt CO2eq / año]			
		2020-2030	2030-2040	2040-2050	2020-2050
Trayectorias 1.5°C	Promedio	-1,80	-1,74	-1,10	-1,55
Business as usual	BAU	2,65	2,68	2,56	2,63
Transporte	Ambicioso	2,03	1,72	2,09	1,95
Generación eléctrica	A6	0,56	-0,34	1,40	0,54
Transporte + Energía	A6 + Ambicioso	-0,06	-1,29	0,93	-0,14

En la Tabla 17 se resume el nivel de emisiones de GEI acumuladas por década para los distintos escenarios de mitigación. En este caso, el escenario más exigente permite una reducción total de emisiones netas de 1.310 [Mt CO2eq] en el período 2020-2050, manteniendo una brecha de 460 [Mt CO2eq] con la trayectoria promedio compatible con un calentamiento de 1,5 °C.

Tabla 17: Emisiones netas de GEI acumuladas por década en el período 2020-2050 por escenarios de mitigación, BAU y promedio de trayectorias 1,5 °C

Sector / Curva	Escenario	Emisiones netas acumuladas [Mt CO2eq]			
		2020-2030	2030-2040	2040-2050	TOTAL
Trayectorias 1.5°C	Promedio	383	200	60	1.188
Business as usual	BAU	721	989	1.248	2.958
Transporte	Ambicioso	684	874	1.063	2.621
Generación eléctrica	A6	611	657	717	1.985
Transporte + Energía	A6 + Ambicioso	574	542	532	1.648

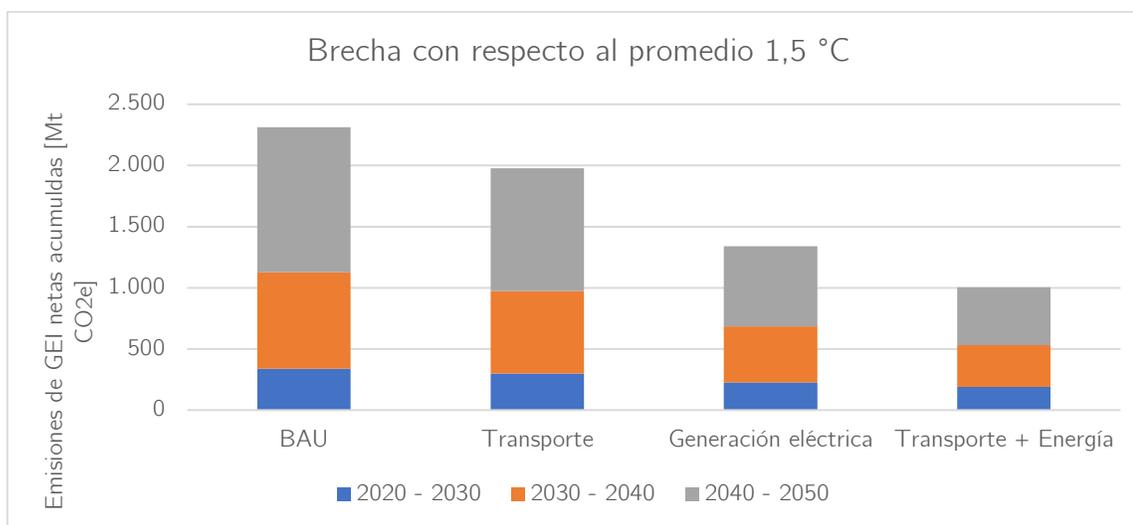


Figura 41: Brecha de emisiones netas de GEI con respecto al objetivo 1,5 °C. Fuente: Elaboración propia

## 6.5. Evaluación de escenarios con respecto al Compromiso Determinado a nivel Nacional (NDC)

En la Tabla 18 se muestra el resultado de intensidad de emisiones de GEI por unidad del PIB nacional en los años 2020 y 2030 para los tres escenarios de crecimiento económico definidos. Se observa que el 2020 solo las transformaciones en la matriz de generación eléctrica provocan algún efecto en este indicador. El 2030 se ve un mayor impacto en el escenario de mitigación del transporte, aunque sigue siendo la mitigación en generación eléctrica el principal agente de reducción en la intensidad de emisiones.

Tabla 18: Intensidad de emisiones de GEI por unidad del PIB

Sector / Escenario	2020 [tCO <sub>2</sub> eq / MMCLP]			2030 [tCO <sub>2</sub> eq / MMCLP]		
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
BAU	0,76	0,75	0,75	0,70	0,67	0,64
Transporte	0,76	0,75	0,75	0,67	0,64	0,61
Generación eléctrica	0,71	0,71	0,70	0,57	0,54	0,52
Transporte + Gen. Eléctrica	0,71	0,70	0,70	0,53	0,51	0,48

En la Tabla 19, por otra parte, muestra las variaciones en la intensidad de emisiones con respecto al año 2007, en concordancia con el objetivo declarado en el NDC chileno. Ahí se observa que al año 2030 el escenario de mitigación en el transporte solo permite alcanzar dicha meta en un contexto de alto crecimiento económico, como se puede ver con claridad en la Figura 42. Mientras que el escenario de descarbonización de la matriz eléctrica permite superar este objetivo bajo cualquier contexto, como se puede apreciar en la Figura 43.

Tabla 19: Disminución en la intensidad de emisiones con respecto al año 2007

Sector / escenario	2020			2030		
	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto
BAU	14%	15%	15%	21%	25%	28%
Transporte	14%	15%	16%	24%	28%	31%
Generación eléctrica	19%	20%	20%	36%	39%	41%
Transporte + Gen. Eléctrica	20%	21%	21%	40%	43%	45%

En la Figura 44 se muestra la evolución del indicador intensidad de emisiones de GEI para el escenario de mitigación conjunta entre el transporte y la generación eléctrica, donde se observa que en los tres escenarios de crecimiento se alcanza una disminución del 40% con respecto al año 2007.

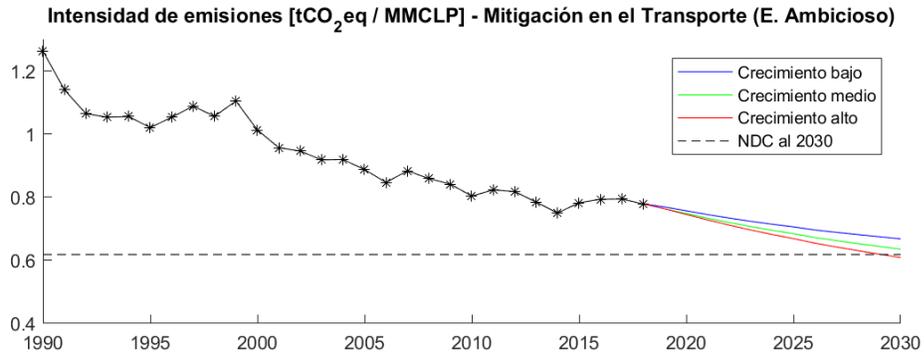


Figura 42: Evaluación del escenario ambicioso de mitigación en el transporte en relación al NDC. Fuente: Elaboración propia

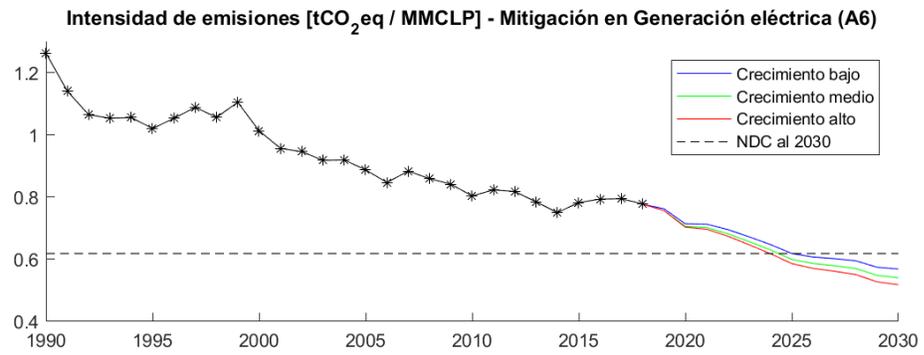


Figura 43: Evaluación del escenario A6 de mitigación en la generación eléctrica en relación al NDC. Fuente: elaboración propia

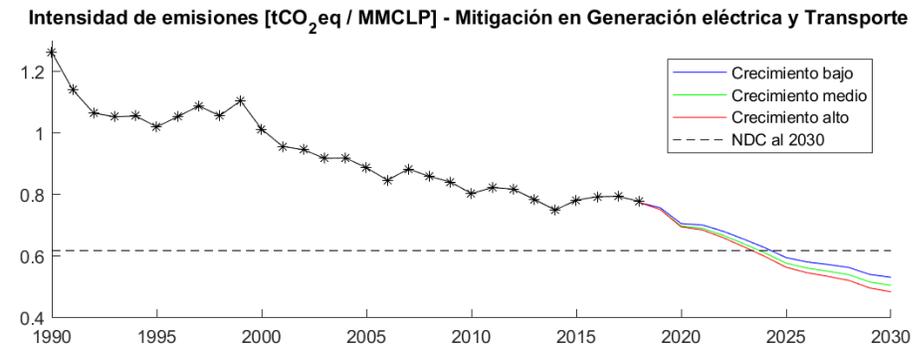


Figura 44: Evaluación del escenario de mitigación conjunta en el transporte y en la generación eléctrica en relación al NDC. Fuente: elaboración propia

## **7. Discusión**

### **7.1. Inventario nacional de emisiones 1990-2016**

A nivel global el sector UTCUTS presenta emisiones de GEI positivas debido a la creciente deforestación y pérdida de masa vegetal en general. En Chile sucede lo contrario, ya que este sector representa un sumidero que ofrece un colchón de absorción de la mitad de las emisiones totales. Sin embargo este sector presenta una alta variabilidad interanual, por lo cual es recomendable tomar precauciones al incluirlo en el análisis de medidas de mitigación.

La clasificación definida por el IPCC para informar los inventarios nacionales de emisiones de GEI busca estandarizar el reporte elaborado por los países miembros del CMNUCC, sin embargo, resulta poco funcional para evaluar medidas sub sectoriales de mitigación. Por ejemplo, el INGEI de Chile permite identificar que el sector “1.A.1.a.i. Generación de electricidad” representa el 31% de las emisiones totales de GEI en Chile, sin embargo, el inventario no desagrega esta sub categoría en los distintos combustibles utilizados en la producción de electricidad. Esta información resultaría útil para visualizar las emisiones de GEI asociadas a cada combustible y ayudaría a focalizar esfuerzos de mitigación en aquellas fuentes que más emisiones originan.

Otro caso notable se constata dentro del sector transporte, donde aparece en el último nivel de desagregación la sub categoría “1.A.3.b.iii. Camiones para servicio pesado y autobuses”, que comprende el 9% de las emisiones totales de GEI en Chile. En este caso se mezcla en una misma categoría un modo de transporte de pasajeros con un tipo de transporte de carga, que tienen un tratamiento muy diferente al enfrentar posibles medidas de mitigación.

En cuanto a las tendencias observadas en el transporte, destaca la alta tasa de incremento en las emisiones de GEI de automóviles en los últimos años. Esta es la más alta del sector transporte y, de mantenerse la tendencia, pondría a los vehículos livianos como la mayor fuente de emisiones del sector el 2020.

### **7.2. Mitigación en la generación eléctrica**

El programa de retiro de centrales termoeléctricas a carbón presentado en la Tabla 20, fue ligeramente modificado para su ejecución, durante el desarrollo de esta memoria. Según el nuevo cronograma adoptado, las 8 primeras centrales a carbón cerrarán en el período 2019-2024, robusteciendo la primera etapa del programa estudiado, por cuanto el retiro se inicia 2 años antes de lo presupuestado por el CEN y se traslada una central de la segunda etapa a la primera (Tarapacá). De ejecutarse este nuevo programa, el nivel de emisiones anuales de GEI en los escenarios de mitigación estudiados podría disminuir en el período que abarca esta primera etapa.

Existe una diferencia cercana a 100 [Mt CO<sub>2</sub>eq] entre los escenarios extremos de descarbonización en las emisiones de GEI acumuladas en el período 2020-2040. Esta se explica por las diferencias en las fuentes con que se reemplaza el carbón retirado del sistema, las cuales dependen de variables del mercado y variables sociales. De esta forma, el impacto final de retirar las centrales a carbón de la generación eléctrica, puede variar hasta en un 20% el nivel de emisiones acumulado en este período dependiendo de las tecnologías sustitutas adoptadas para satisfacer la demanda futura. En cualquier caso, la reducción del total de emisiones de GEI en el período 2020-2050 a causa de la

descarbonización de la matriz eléctrica es de entre un 24% y un 26% con respecto al escenario Business As Usual.

### **7.3. Mitigación en el transporte terrestre**

Las variables del modelo MAPS Chile para el sector transporte, en particular las variables PKM y TKM, dependen fuertemente del PIB nacional o per cápita, por lo tanto los resultados presentan incertidumbre asociada al error en las estimaciones de crecimiento futuro de la economía. Este análisis de incertidumbre está fuera de los alcances de esta memoria, sin embargo, cabe mencionar que en el período comprendido entre la elaboración del informe sectorial del transporte (MAPS Chile, 2012) y la actualidad, el crecimiento del PIB se ha mantenido por debajo de las proyecciones moderadas elaboradas hasta antes del 2013. Por ende, para una estimación más exacta es recomendable incorporar nueva información histórica para actualizar los parámetros de los modelos econométricos que proyectan la demanda de transporte, tanto de carga como de pasajeros.

El compromiso de reemplazar la flota de buses del transporte público urbano hasta llegar al 100% de tecnología eléctrica el 2040 implica una reducción del 10% de las emisiones acumuladas en el período 2020-2050 por el total del transporte, en relación al escenario BAU. El impacto de este cambio tecnológico es equivalente a aumentar la tasa de ocupación progresivamente hasta un incremento de un pasajero más por vehículo, aunque el primero ya está en curso y tiene una probabilidad mucho mayor de concretarse.

## 8. Conclusiones

En esta memoria se demuestra que el conjunto de medidas propuestas en los sectores de la generación eléctrica y del transporte de pasajeros para reducir las emisiones de GEI no son suficientes para alcanzar la compatibilidad con las trayectorias que limitarían el calentamiento global en 1,5 °C al final de siglo. No obstante, permiten mantener el nivel de emisiones dentro de los escenarios compatibles de respuesta más tardía hasta el 2030, es decir, implican mantener un nivel aproximadamente constante durante la década del 2020.

El cierre de centrales termoeléctricas a carbón entrega una base importante para la estabilización del nivel anual de emisiones de GEI, reduciendo un 25% las emisiones acumuladas en el período 2020-2050. Sin embargo, son imprescindibles los esfuerzos de mitigación en otros sectores para impulsar un descenso que acerque los niveles de emisiones a la carbono neutralidad buscada al 2050. Este descenso debe iniciarse a más tardar el 2030 para mantener el aporte de Chile a la mitigación dentro del rango de compatibilidad con la meta global de 1,5 °C de calentamiento.

A partir de la evaluación de escenarios de mitigación en el transporte se puede concluir que, de los escenarios estudiados, solo aquellos que involucran transformaciones en el mercado de vehículos livianos permiten la estabilización del nivel anual de emisiones de GEI. En efecto, aunque se cambie completamente la flota de buses del transporte público por tecnología eléctrica en el mediano plazo, el crecimiento proyectado de la demanda por vehículos particulares, por transporte de carga y por viajes aéreos causa un aumento continuo en el nivel anual de emisiones de GEI del sector transporte. En ese sentido, reducir la demanda de transporte aéreo e introducir tecnología eléctrica en el transporte particular y de carga son medidas necesarias para llevar al sector a un mínimo de emisiones.

El sector UTCUTS presenta una variabilidad tal que su incorporación a un compromiso de carbono neutralidad genera una alta incertidumbre en el nivel anual de emisiones esperado. En ese sentido, si se opta por alcanzar la carbono neutralidad el 2050 considerando la absorción de GEI del sector forestal, es recomendable buscar soluciones que reduzcan dicha variabilidad.

De concretarse el cierre de centrales termoeléctricas a carbón en su totalidad el 2040, sustituyéndolas por fuentes renovables, el 2030 se superará con holgura el actual compromiso determinado a nivel nacional (NDC) de reducir la intensidad de emisiones de GEI en un 30% con respecto al año 2007. Esto permite robustecer este compromiso al menos hasta llegar a un 36% de disminución con respecto al año 2007. Si además se comprometen incentivos a la electrificación del parque vehicular, este NDC puede llegar a un 40% de disminución en un escenario de alto, medio o bajo crecimiento económico.

## 9. Bibliografía

- Fridahl, M., & Lehtveer, M. (2018). Bioenergy with carbon capture and storage (BECCS): Global potential, investment preferences, and deployment barriers. *Energy Research & Social Science*, 155-165.
- ANAC. (2018). *Anuario automotriz 2016-2017*. Asociación Nacional Automotriz de Chile.
- Breyer, C., Fasihi, M., & Aghahosseini, A. (2019). Carbon dioxide direct air capture for effective climate change mitigation based on renewable electricity: a new type of energy system sector coupling. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 1-23.
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (2015). *La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro. Informe a la nación*. Santiago: (CR)2.
- CMNUCC. (2015). Acuerdo de París. París: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- CMNUCC. (2015). *Synthesis report on the aggregate effect of the intended nationally determined contributions*. Bonn: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.
- Coordinador Eléctrico Nacional. (2018). *Estudio de operación y desarrollo del SEN sin centrales a carbón*.
- Dlugokencky, E., & Tans, P. (18 de agosto de 2018). *Trends in atmospheric carbon dioxide*. Obtenido de <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends>
- E2BIZ Consultores. (2017). *Estudio escenario de usos futuros de la electricidad. Capítulo Transporte y residencial*. Asociación de Generadoras de Chile.
- Fasihi, M., Efimova, O., & Breyer, C. (2019). Techno-economic assessment of CO<sub>2</sub> direct air capture plants. *Journal of Cleaner Production*, 957-980.
- Gaffney, O., & Steffen, W. (2017). The Anthropocene equation. *The Anthropocene Review*, 1-9.
- Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2019). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*.
- IPCC. (2006). *Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero*. Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Intergovernmental Panel on Climate Change.

- IPCC. (2018). *Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change*,. Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático.
- MAPS Chile. (2012). *Escenario línea base de emisiones GEI del sector transporte y urbanismo. Informe final*. Sistemas sustentables.
- MAPS Chile. (2014). *Opciones de mitigación para enfrentar el cambio climático: resultados de Fase 2*. Santiago: Ministerio del Medio Ambiente.
- Millar, R., Fuglestedt, J. S., Friedlingstein, P., Rogelj, J., Grubb, M. J., Matthews, H. D., . . . Allen, M. R. (2017). Emission budgets and pathways consistent with limiting warming to 1.5 °C.
- MINENERGIA. (2016). *Energía 2050: Política energética de Chile*. Santiago: Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.
- MMA. (2016). *Plan de acción nacional de cambio climático 2017 - 2022*. Santiago: Ministerio del Medio Ambiente.
- MMA. (2018). *Tercer informe bienal de actualización de Chile sobre el Cambio Climático*. Santiago: Ministerio del Medio Ambiente, Gobierno de Chile.
- Sammer, G., Meschick, M., & Roider, O. (1999). *ICARO - Final Report: Increase of car occupancy through innovative measures and technical instruments*. Vienna: European Commission.
- Schleussner, C. F. (2016). Science and policy characteristics of the Paris Agreement temperature goal. *Nature Climate Change*, 827.
- UNEP. (2017). *The emissions gap report 2017*. Nairobi: United Nations Environment Programme.
- Vergara, W. F. (2016). *Carbono Cero América Latina - Una vía para la descarbonización neta de la economía regional para mediados de este siglo: Documento de visión*. UNEP DTU Partnership.

## Anexos

### Anexo A: Cronograma de retiro de centrales a carbón

Tabla 20: Cronograma de desconexión de centrales térmicas a carbón Escenario A. Fuente: CEN, 2018

Unidad Generadora	Zona	Capacidad Instalada [MW]	Combustible	Región	Año Puesta en Servicio	Años de Servicio	Año Desconexión Esc. A	Años Servicio al Desconectar Esc. A
Ventanas 1	Centro	120	Carbón	Valparaíso	1964	54	2021	57
Bocamina	Sur	130	Carbón	Biobío	1970	48	2022	52
Ventanas 2	Centro	220	Carbón	Valparaíso	1977	41	2023	46
Termoeléctrica Tocopilla - U12	Norte	87	Carbón	Antofagasta	1983	35	2024	41
Termoeléctrica Tocopilla - U13	Norte	86	Carbón	Antofagasta	1985	33	2025	40
Termoeléctrica Tocopilla - U14	Norte	136	Carbón	Antofagasta	1987	31	2026	39
Termoeléctrica Tocopilla - U15	Norte	132	Carbón	Antofagasta	1987	31	2026	39
Termoeléctrica Norgener - NTO1	Norte	140	Carbón	Antofagasta	1995	23	2027	32
Guacolda - U1	Norte	152	Carbón - Petcoke	Atacama	1995	23	2027	32
Termoeléctrica Mejillones - CTM1	Norte	160	Carbón	Antofagasta	1995	23	2028	33
Guacolda - U2	Norte	152	Carbón - Petcoke	Atacama	1996	22	2028	32
Termoeléctrica Norgener - NTO2	Norte	136	Carbón	Antofagasta	1997	21	2029	32
Termoeléctrica Mejillones - CTM2	Norte	174	Carbón	Antofagasta	1998	20	2030	32
Termoeléctrica Tarapacá	Norte	158	Carbón	Tarapacá	1999	19	2031	32
Guacolda - U3	Norte	152	Carbón - Petcoke	Atacama	2009	9	2033	24
Nueva Ventanas	Centro	272	Carbón	Valparaíso	2010	8	2034	24
Guacolda - U4	Norte	152	Carbón - Petcoke	Atacama	2010	8	2034	24
Termoeléctrica Andina	Norte	177	Carbón	Antofagasta	2011	7	2035	24
Termoeléctrica Angamos - ANG1	Norte	277	Carbón	Antofagasta	2011	7	2035	24
Termoeléctrica Angamos - ANG2	Norte	281	Carbón	Antofagasta	2011	7	2036	25
Termoeléctrica Hornitos	Norte	178	Carbón	Antofagasta	2011	7	2036	25
Santa María	Sur	370	Carbón	Biobío	2012	6	2037	25
Bocamina II	Sur	350	Carbón	Biobío	2012	6	2037	25
Campiche	Centro	272	Carbón	Valparaíso	2013	5	2038	25
Guacolda - U5	Norte	152	Carbón - Petcoke	Atacama	2015	3	2038	23
Cochrane - CCH1	Norte	275	Carbón	Antofagasta	2016	2	2038	22
Cochrane - CCH2	Norte	275	Carbón	Antofagasta	2016	2	2038	22
Infraestructura Energética Mejillones	Norte	375	Carbón	Antofagasta	2018	0	2039	21

## Anexo B: Proyecciones de la demanda de transporte

### B.1. PKM urbano caminero

En la Figura 45, se muestra la proyección de la variable PKM urbano per cápita desagregada por región, según la división administrativa de 12 regiones que rigió hasta el 2007. Se observa que en las últimas dos décadas la mayor demanda por transporte se registra en la II Región, principalmente debido a la alta actividad minera. Sin embargo, las VI, VII y X regiones presentan el mayor crecimiento anual de su demanda per cápita, lo que tiene como consecuencia que durante la década del 2030 estas regiones se posicionen como las que presentan un consumo más intensivo de transporte urbano, como se puede ver claramente en la Tabla 21. Cabe mencionar, que la región Metropolitana presenta una demanda per cápita cercana al promedio nacional, aunque actualmente concentra el 38% de la demanda nacional debido a que su población comprende el 40% del total nacional.

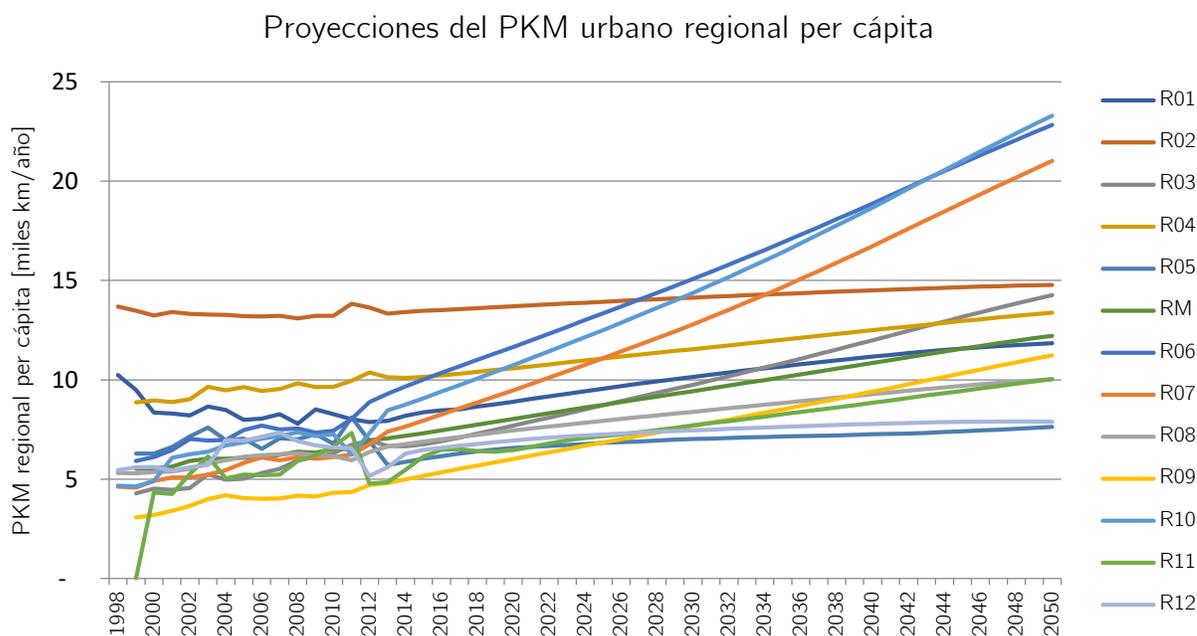


Figura 45: PKM urbano per cápita por región proyectado en el período 1998-2050. Fuente: MAPS CHILE, 2012

Tabla 21: PKM urbano per cápita por región en el período 2012-2050 [km/año]. Fuente: MAPS CHILE, 2012

Región	PKM urbano [km/año]			
	2012	2020	2030	2050
R1	7.879	8.899	10.144	11.836
R2	13.638	13.693	14.136	14.779
R3	6.950	7.694	9.753	14.261
R4	10.375	10.580	11.544	13.380
R5	6.927	6.578	7.028	7.639
RM	6.954	8.033	9.432	12.215
R6	8.885	11.658	15.073	22.825
R7	6.744	9.480	12.786	21.016
R8	6.363	7.449	8.385	10.034
R9	4.694	6.018	7.671	11.233
R10	7.303	10.734	14.372	23.286
R11	4.787	6.466	7.710	10.030
R12	5.171	6.945	7.455	7.890

## B.2. TKM caminero

Las proyecciones regionales se muestran en la Figura 46, en la cual se observa que la demanda por transporte de carga en modos camineros siempre se concentra mayormente en la región Metropolitana con un 25% de la demanda nacional en la actualidad. Además, destaca el crecimiento acelerado en la III Región, que se ubica como la segunda región más importante el 2040 con un 11%, y la VIII Región que oscila entre un 10% y un 15% debido principalmente a la industria maderera que prevalece en la región. Los valores de demanda TKM quedan resumidos en la Tabla 22.

### Proyecciones TKM caminero regional - Escenario medio

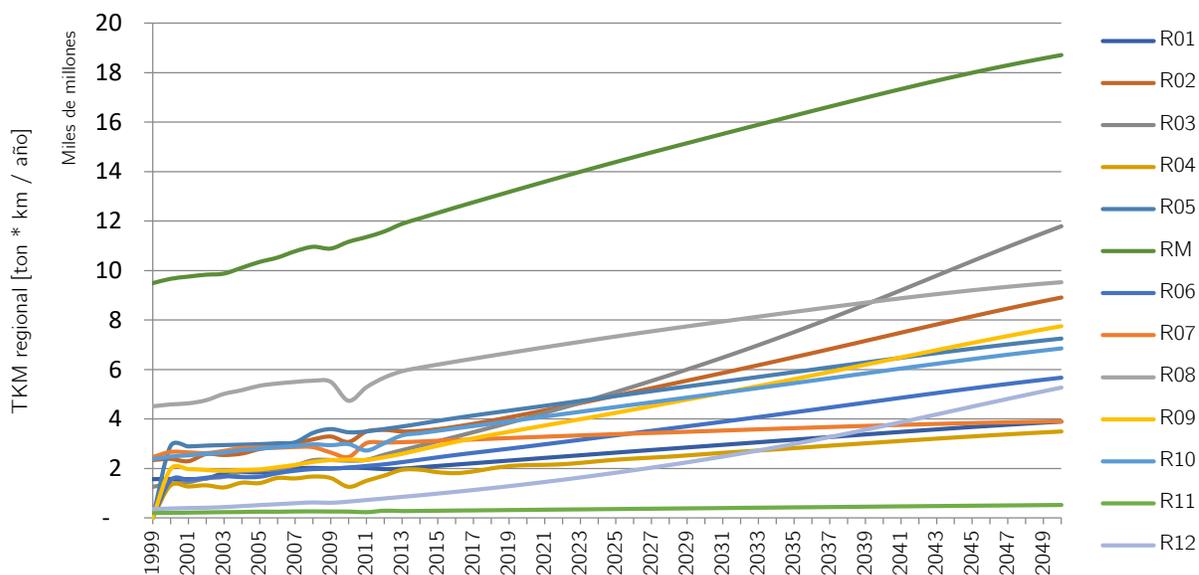


Figura 46: Proyecciones del TKM caminero por región. Fuente: MAPS CHILE, 2012

Tabla 22: Resumen TKM regional proyectado. Fuente: MAPS CHILE, 2012

Región	TKM Caminero [Mt*km]			
	2012	2020	2030	2050
R1	1.973	2.373	2.903	3.898
R2	3.555	4.204	5.704	8.909
R3	2.554	4.040	6.239	11.788
R4	1.716	2.139	2.584	3.501
R5	3.595	4.433	5.409	7.247
RM	11.581	13.385	15.337	18.707
R6	2.170	2.887	3.796	5.667
R7	3.047	3.259	3.511	3.911
R8	5.672	6.783	7.840	9.524
R9	2.456	3.611	4.920	7.754
R10	3.032	4.010	4.970	6.860
R11	294	328	394	521
R12	783	1.363	2.360	5.272

### B.3. PKM aéreo

Para obtener la variable PKM aéreo, se corrigió el resultado de MAPS para esta variable (MAPS Chile, 2012), ajustándolo a los datos de emisiones presentados en el INGEI. De esta forma se obtiene la proyección que se observa en la Figura 47.

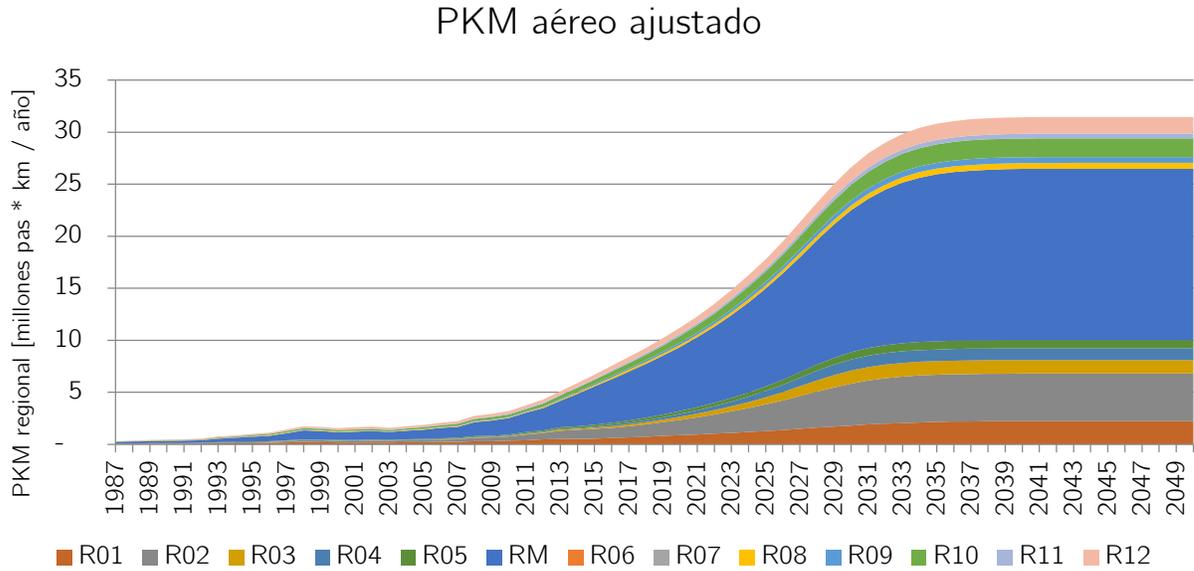


Figura 47: PKM aéreo ajustado a partir del input del modelo MAPS Chile. Fuente: Elaboración propia