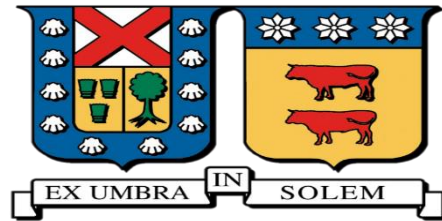


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
SANTIAGO - CHILE



“MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE
EMISIONES DE TRANSPORTE PARA LA
CARBONO NEUTRALIDAD”

TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERÍA
CIVIL MECÁNICA

BENJAMÍN IGNACIO JIMÉNEZ DÍAZ

PROFESOR GUÍA DR. MAURICIO OSSES ALVARADO
PROFESOR CO-GUÍA DR. RAÚL O’RYAN

SANTIAGO, DICIEMBRE, 2024

Agradecimientos

El principal agradecimiento de poder permitirme llevar a cabo y completar esta gran e importante etapa en mi vida profesional, se la debo a mi madre y mi padre, que sin su apoyo tanto emocional como económico, nada se hubiera dado como se dió.

Agradezco también a cada uno de los profesores que me formaron como el profesional al que aspiro ser, principalmente a mi profesor guía Mauricio Osses, que durante el período de realización de los ramos, generó una gran inspiración al escucharlo hablar sobre los temas de la carrera con tal pasión vocacional, y también por su apoyo y comprensión durante el período del trabajo de título.

Se agradece el apoyo recibido por el Proyecto FONDECYT REGULAR 1241477, etapa 2024.

Como dejar fuera a mis compañeros, los cuales me apoyaron y complementaron con el fin de completar cada uno de los ramos de la carrera y ante distintas adversidades que se presentan en este trayecto universitario. Con algunos de los cuales se formó una buena amistad, y si así lo depara la vida, colegas en un futuro.

Resumen

El cambio climático es uno de los desafíos más críticos que enfrenta la humanidad en el siglo XXI. La constante emisión de gases de efecto invernadero (GEI) está llevando al planeta hacia un aumento sostenido de la temperatura global, provocando alteraciones climáticas severas, pérdida de biodiversidad, eventos extremos y afectaciones sociales y económicas severas. El sector transporte desempeña un papel crucial al ser uno de los mayores contribuyentes de estas emisiones.

Consciente de esta problemática, Chile se ha comprometido a abordar el impacto del transporte mediante políticas públicas e iniciativas internacionales. Ha firmado acuerdos como el Acuerdo de París, que exige reducir emisiones GEI para limitar el calentamiento global por debajo de los 2°C. A nivel local se han implementado medidas contempladas en la Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC), cuyo objetivo incluye una mayor penetración de tecnologías limpias, como la electromovilidad y la promoción de un transporte más sostenible.

Diversos organismos chilenos lideran los esfuerzos para mitigar el impacto ambiental del transporte. El Ministerio del Medio Ambiente, que regula las metas de reducción de emisiones, el Ministerio de Energía que fomenta el uso de vehículos con tecnología limpia y sostenible, el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones que impulsa políticas de cambio modal hacia un transporte público más eficiente, entre otros.

Se realiza una exhaustiva revisión de las distintas estrategias y planes impulsados por los organismos mencionados en los cuales se encuentran el PPDA, ECLP, Estrategia Nacional de Electromovilidad, Estrategia de Instrumentos Económicos, Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026, Agenda de Energía 2022-2026, Plan de Mitigación GEI Sector Energía y Plan de Adaptación al Cambio Climático para ciudades 2018-2022. Cada uno con un enfoque especializado y caracterizando las medidas tanto de carácter regulatorio, cultural, tecnológico y de energía.

Dentro de la metodología de la investigación, se utilizó un programa bajo la autoría de Mauricio Jiménez (Ingeniero UTFSM) en su trabajo de título, el cual permitía obtener la data histórica y proyectada de los Factores de emisión, VKT y emisiones totales al año 2050, estableciendo un escenario de referencia para esta investigación. Con la categorización de distintos tipos de vehículos terrestres, se simuló la penetración que debería tener la electromovilidad para cada uno de estos grupos, con el objetivo de alcanzar las metas propuestas por la NDC respecto a la flota de vehículos de tecnología limpia. Para el período pre 2035/2045, vehículos livianos particulares tienen una penetración del 3% anual, buses y taxis de 20% y vehículos de carga 5%. Para el período post 2035/2045 respectivamente serían de 10%, 45% y 37%. Con esto se fija una meta de emisiones de CO₂ basada en lo propuesto por la NDC de 15.191.926 toneladas de CO₂.

Se busca simular el impacto que deberían tener ciertas medidas no tecnológicas para alcanzar esta meta en caso de que la electromovilidad no se viera acelerada como se mencionó. Para esto se buscan índices de inserción para las medidas de Teletrabajo, Cambio Modal y Vehículo Compartido, los cuales tienen un carácter acumulativo por año. Para cada medida actuando por separado los índices resultaron en 3,2% el decrecimiento anual de VKT para el teletrabajo, cambio modal actuando en conjunto con teletrabajo resulta en 2,69% y 1,6% respectivamente, y vehículo compartido por separado un 3,79% para VLP y 3,69% para VLC. Ahora bien, como se sabe, las medidas no se proyectan a actuar por separado en la realidad, por ende la suma de los efectos de las medidas reposiciona estos índices quedando en 1,6% para teletrabajo, 2,57% para cambio modal, y 3% para VLP y 2,8% para VLC respecto a vehículo compartido.

Este último resultado condiciona un poco la expectativa que se tenía con respecto al aporte de la medida vehículo compartido, sugiriendo otro enfoque para esta.

Abstract

Climate change is one of the most critical challenges facing humanity in the 21st century. The constant emission of greenhouse gases (GHG) is driving the planet towards a sustained increase in global temperature, causing severe climatic alterations, loss of biodiversity, extreme events and severe social and economic impacts. The transportation sector plays a crucial role as one of the major contributors to these emissions.

Aware of this problem, Chile is committed to addressing the impact of transportation through public policies and international initiatives. It has signed agreements such as the Paris Agreement, which requires reducing GHG emissions in order to limit global warming to below 2°C. At the local level, measures have been implemented under the Nationally Determined Contribution (NDC), whose objective includes a greater penetration of clean technologies, such as electromobility and the promotion of more sustainable transportation.

Several Chilean agencies are leading efforts to mitigate the environmental impact of transportation. The Ministry of the Environment, which regulates emission reduction goals, the Ministry of Energy, which promotes the use of vehicles with clean and sustainable technology, and the Ministry of Transportation and Telecommunications, which promotes modal shift policies towards more efficient public transportation, among others.

An exhaustive review of the different strategies and plans promoted by the aforementioned organizations, including the PPDA, ECLP, National Electromobility Strategy, Economic Instruments Strategy, National Energy Efficiency Plan 2022-2026, Energy Agenda 2022-2026, GHG Mitigation Plan for the Energy Sector and Climate Change Adaptation Plan for cities 2018-2022, is carried out. Each one with a specialized approach and characterizing the regulatory, cultural, technological and energy measures.

Within the research methodology, a program was used under the authorship of Mauricio Jiménez (UTFSM Engineer) in his degree work, which allowed obtaining historical and projected data of the Emission Factors, VKT and total emissions to the year 2050, establishing a reference scenario for this research. With the categorization of different types of land vehicles, the penetration that electromobility should have for each of these groups was simulated, with the objective of reaching the goals proposed by the NDC regarding the fleet of clean technology vehicles. For the pre-2035/2045 period, private light-duty vehicles have a penetration of 3% per year, buses and cabs 20%, and freight vehicles 5%. For the post 2035/2045 period they would be 10%, 45% and 37% respectively. This sets a CO₂ emissions target based on the NDC proposal of 15,191,926 tons of CO₂.

The aim is to simulate the impact that certain non-technological measures would have to have in order to reach this goal if electromobility were not accelerated as mentioned above. For this purpose, insertion indexes are sought for the Telework, Modal Shift and Vehicle Sharing measures, which have a cumulative character per year. For each measure acting separately the indexes resulted in 3.2% annual decrease of VKT for telework, modal shift acting together with telework results in 2.69% and 1.6% respectively, and shared vehicle separately 3.79% for VLP and 3.69% for VLC. However, as it is known, the measures are not projected to act separately in reality, therefore the sum of the effects of the measures repositions these rates to 1.6% for telework, 2.57% for modal shift, and 3% for VLP and 2.8% for VLC with respect to carpooling.

This last result somewhat conditions the expectations regarding the contribution of the carpooling measure, suggesting another approach for it.

Glosario

- **CO₂**: Dióxido de Carbono.
- **H₂O**: Agua.
- **N₂O**: Óxido Nitroso.
- **CH₄**: Metano.
- **O₃**: Ozono.
- **MP**: Material Particulado.
- **NO_x**: Óxidos de Nitrógeno.
- **SO₂**: Dióxido de Azufre.
- **GEI**: Gases de Efecto Invernadero.
- **CO₂eq**: Dióxido de Carbono Equivalente.
- **SNI Chile**: Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero de Chile.
- **PPDA**: Planes de Prevención y/o descontaminación atmosférica.
- **GEC**: Gestión de Episodios Críticos.
- **PKM**: Pasajeros por Kilómetro.
- **TKM**: Toneladas por Kilómetro.
- **INE**: Instituto Nacional de Estadísticas.
- **INGEI**: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero.
- **NDC**: Contribución Determinada a Nivel Nacional.
- **CMNUCC**: Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre el Cambio Climático.
- **PIB**: Producto Interno Bruto.
- **Offsets**: Sistemas de Compensación de Emisiones.
- **ETS**: Sistemas de Transacción de emisiones.
- **NAMAS**: Acciones Nacionales de Mitigación Apropriadas.
- **ECLP**: Estrategia Climática de Largo Plazo.
- **MTT**: Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones.
- **MINVU**: Ministerio de Vivienda y Urbanismo.
- **MOP**: Ministerio de Obras Públicas.
- **CNE**: Comisión Nacional de Energía.

- **SEC:** Superintendencia de Electricidad y Combustibles.
- **MMA:** Ministerio del Medio Ambiente.
- **Agencia SE:** Agencia de Sostenibilidad Energética.
- **SECTRA:** Programa de Vialidad y Transporte Urbano.
- **DIPRES:** Dirección de Presupuestos.
- **SEA:** Servicio de Evaluación Ambiental.
- **CORFO:** Corporación de Fomento de la Producción.
- **JAC:** Junta de Aeronáutica Civil.
- **FE:** Factor de Emisión.
- **VKT:** Vehículo por Kilómetro Recorrido.
- **COPERT:** Computer programme to calculate Emission from Road Transport.
- **EURO:** Regulaciones Establecidas por la Unión Europea para Limitar las Emisiones Contaminantes de los Vehículos.
- **VLP:** Vehículo Liviano de Pasajeros.
- **VLC:** Vehículo Liviano Comercial.
- **MOT:** Motocicleta.
- **TAX:** Taxi.
- **BUS ART:** Bus Articulado.
- **BUS INT PROV:** Bus Interprovincial.
- **BUS RIG:** Bus Rígido.
- **CAM LIV:** Camión Liviano.
- **CAM MED:** Camión Mediano.
- **CAM PES:** Camión Pesado.
- **SCR:** Reducción Catalítica Selectiva.

Índice

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	III
ABSTRACT	IV
GLOSARIO	V
INTRODUCCIÓN	XII
EL PROBLEMA	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
Justificación	3
Limitaciones y Alcances de la Investigación	5
Limitaciones	5
Alcances	6
1. MARCO TEÓRICO	7
1.1. EMISIONES Y ABSORCIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO	7
1.2. EMISIÓN DE GEI A NIVEL MUNDIAL	8
1.3. LA REALIDAD EN CHILE	10

1.4.	PRINCIPALES GASES DE EFECTO INVERNADERO	11
1.5.	CARBONO NEUTRALIDAD	12
1.5.1.	BENEFICIOS DE ALCANZAR LA CARBONO NEUTRALIDAD	13
1.5.2.	DESAFÍOS PARA ALCANZAR LA CARBONO NEUTRALIDAD	14
1.5.3.	ACCIONES CLAVE PARA ALCANZAR LA CARBONO NEUTRALIDAD	15
1.6.	MEDIDAS DE MITIGACIÓN SECTOR TRANSPORTE.	17
1.6.1.	MEDIDAS DE MITIGACIÓN DE EMISIONES EN CHILE.	17
1.6.2.	MEDIDAS DE MITIGACIÓN A NIVEL INTERNACIONAL	45
1.7.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	46
2.	METODOLOGÍA.	47
2.1.	FACTOR DE EMISIÓN (FE)	47
2.2.	ACTIVIDAD VEHICULAR (VKT)	49
2.3.	APLICACIÓN DE MEDIDAS DE MITIGACIÓN.	51
2.3.1.	ELECTROMOVILIDAD.	52
2.3.2.	TELETRABAJO Y CAMBIO MODAL.	53
2.3.3.	VEHÍCULO COMPARTIDO.	55

2.4.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	57
3.	RESULTADOS APLICACIÓN DE MEDIDAS	57
3.1.	ELECTROMOVILIDAD	57
3.2.	TELETRABAJO Y CAMBIO MODAL	62
3.3.	VEHÍCULO COMPARTIDO	65
3.4.	RESULTADOS APLICACIÓN DE TODAS LAS MEDIDAS NO TECNOLÓGICAS	68
3.5.	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO	70
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	71
4.1.	CONCLUSIONES GENERALES	71
4.2.	CONCLUSIONES ESPECÍFICAS	72
4.3.	RECOMENDACIONES	74
	REFERENCIAS	75

Índice de Figuras

Figura 1 Emisiones de gases de efecto invernadero por sector, 1990-2018. Fuente: Ministerio del Medio Ambiente (2018).....	XII
--	-----

Figura 2 Transporte: emisiones de GEI (kt CO2 eq) por componente, serie 1990-2020. Fuente: Equipo Técnico de Energía del MINENERGIA.	XIII
Figura 1 1 Emisiones de CO2 por combustibles fósiles desde la época preindustrial. Fuente: Global Carbon Project.	9
Figura 1 2 Evolución de las emisiones de CO2 en el mundo. Fuente: Global Carbon Project.	9
Figura 1 3 Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector. Fuente: OurWorldinData.	10
Figura 1 4 Emisiones de GEI en Chile para 2020. Fuente: Ministerio del Medio Ambiente.	11
Figura 1 5 La carbono neutralidad.....	13
Figura 1 6 Resumen Medidas de Gestión de Episodios Críticos. Fuente: SEREMI Región Metropolitana.	18
Figura 1 7 Trayectoria de emisiones del escenario de Carbono Neutralidad hacia el 2050: mitigación y captura. Fuente Ministerio de Energía.....	22
Figura 1 8 Reducción de emisiones acumuladas por ámbito y medida, período 2020-2050. Fuente: Ministerio de Energía.	23
Figura 1 9 Cronograma de la primera fase de retiro de centrales a carbón. Fuente: Ministerio de Energía.	24
Figura 1 10 Evolución del parque generador con retiro de centrales a carbón. Fuente: Ministerio de Energía.	24
Figura 1 11 Niveles de penetración de medidas de electromovilidad en escenario de referencia y carbono neutralidad. Fuente: Ministerio de Energía.	25
Figura 1 12 Niveles de penetración de medidas de hidrógeno en escenario referencial y carbono neutral. Fuente: Ministerio de Energía.	26

Figura 3 1 Flota vehicular eléctrica 1990-2050 para los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 3 2 Flota vehicular en el tiempo para las distintas tecnologías, escenario de referencia. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 3 3 Flota vehicular en el tiempo para las distintas tecnologías, escenario NDC. Fuente: Elaboración propia.....	59
Figura 3 4 Flota vehicular en el tiempo para las distintas tecnologías, escenario pesimista. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 3 5 Emisiones totales de CO2 1990-2050, para los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	60
Figura 3 6 Emisiones totales de NOx 1990-2050, para los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 3 7 Emisiones totales de PM 2.5 1990-2050, para los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.....	61
Figura 3 8 VKT tras aplicar la medida Teletrabajo. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 3 9 CO2 tras aplicar la medida Teletrabajo. Fuente: Elaboración propia.	63
Figura 3 10 VKT tras aplicar Teletrabajo y Cambio Modal. Fuente: Elaboración propia. ..	64
Figura 3 11 Emisiones de CO2 tras aplicar Teletrabajo y Cambio Modal. Fuente: Elaboración propia.....	65
Figura 3 12 Flota vehicular tras aplicar Vehículo Compartido. Fuente: Elaboración propia.	67
Figura 3 13 VKT para VLP y VLC tras aplicar Vehículo Compartido. Fuente: Elaboración propia.....	67

Figura 3 14 Emisiones de CO2 tras aplicar Vehículo Compartido. Fuente: Elaboración propia.
..... 68

Figura 4 1 Efecto que tendría la aplicación de las medidas de mitigación no tecnológicas en el VKT de referencia. Fuente: Elaboración Propia..... 70

Figura 4 2 Efecto que tendría la aplicación de las medidas de mitigación no tecnológicas en las emisiones de CO2 de referencia. Fuente: Elaboración propia. 70

Índice de Tablas

Tabla 1 1 Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector transporte. Fuente: Banco Interamericano de Desarrollo.	20
Tabla 1 2 Fuentes de incertidumbre asociadas a medidas de reducción de emisiones en transporte. Fuente: Banco Interamericano de Desarrollo.	20
Tabla 1 3 Reducción de emisiones por ámbito de acción. Fuente Ministerio de Energía. ...	22
Tabla 2 1 Equivalente entre categorías INE y COPERT. Fuente: M. Osses et al.: High-resolution spatial-distribution maps.	48
Tabla 2 2 Segmentos vehiculares y su equivalente en COPERT. Fuente: Memoria Mauricio Jiménez.	48
Tabla 2 3 Nivel de actividad anual por región y tipo de vehículo. Fuente: M. Osses et al.: High-resolution spatial-distribution maps.	50
Tabla 2 4 Introducción de tecnologías de emisión para las distintas categorías de vehículos y regiones. Basados en los decretos supremos del MTT y MMA. Fuente M. Osses et al.: High-resolution spatial-distribution maps.	51
Tabla 3 1 Nivel de actividad [km/año] para VLP reajustado. Fuente: Elaboración propia. .	66
Tabla 3 2 Nivel de actividad [km/año] para VLC reajustado. Fuente: Elaboración propia..	66

Introducción

La urgencia mundial de abordar la significativa crisis ambiental que enfrenta el planeta es innegable, derivada del crecimiento industrial exponencial y la consiguiente explotación de recursos para su desarrollo. Este fenómeno ha resultado en emisiones y otros factores contaminantes que han perturbado los procesos naturales y el equilibrio que mantenía el funcionamiento adecuado del entorno. El cambio climático, consecuencia directa de actividades humanas, se atribuye al efecto invernadero, donde la atmósfera retiene el calor irradiado desde la Tierra hacia el espacio.

La emisión descontrolada de gases como el dióxido de carbono (CO₂), el vapor de agua (H₂O), el óxido nitroso (N₂O), el metano (CH₄) y el ozono (O₃) contribuye al atrapamiento de calor en la atmósfera. En este contexto, surge el concepto de carbono neutralidad, que busca equilibrar estas emisiones a un nivel cercano a cero. Con el objetivo de lograr esta neutralidad para el año 2050, es imperativo desarrollar planes de acción a nivel global para reducir, compensar y/o eliminar estas emisiones.

En el contexto chileno, la principal fuente de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) se atribuye a la quema de combustibles fósiles destinados a la generación de energía. Este sector específico constituye el principal contribuyente a nivel nacional de GEI, representando un 77,4% del total de emisiones en el año 2018, según se presenta en la Figura 1. De este porcentaje, un 25% corresponde al sector del transporte y su consiguiente demanda energética [1].

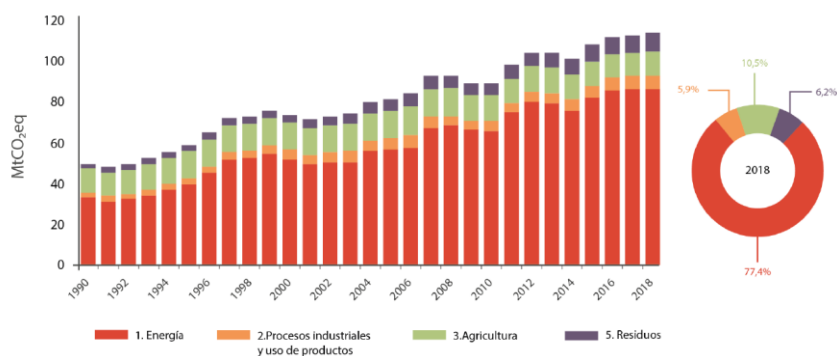


Figura 1 Emisiones de gases de efecto invernadero por sector, 1990-2018. Fuente: Ministerio del Medio Ambiente (2018).

Según un reporte emitido por El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático hay estimaciones que advierten sobre la posibilidad de superar el umbral de calentamiento global de 1,5 [°C] en las próximas décadas, a menos que se implementen medidas inmediatas y a gran escala para mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero. Lograr limitar el calentamiento a 1,5 [°C] se presenta como un objetivo difícilmente alcanzable [2].

Este estudio se centra principalmente en la contribución del sector de transporte en términos de emisión de contaminantes atmosféricos. Con base en los datos proporcionados por el Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero (SNI Chile) [3], se puede evaluar la magnitud de la contribución del sector del transporte y su utilización de combustibles fósiles para el funcionamiento, abarcando actividades de transporte aéreo, terrestre, ferroviario, marítimo excluyendo el transporte militar y el transporte internacional (marítimo y aéreo), que se informan por separado como Partidas Informativas. En el año 2020, se registraron 26.114 [kt] de CO₂ equivalente, reflejando un aumento del 182% desde 1990 y una disminución del 9% desde 2018 (Figura 2). Cabe destacar que se observa una reducción para el año 2020, atribuible a las restricciones de movilidad impuestas a nivel nacional debido a la pandemia de COVID-19.

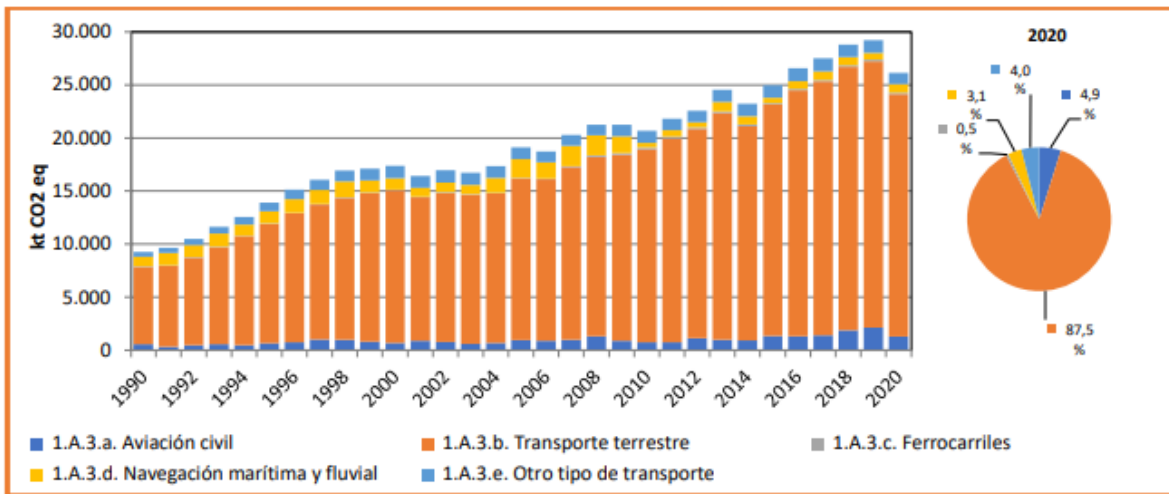


Figura 2 Transporte: emisiones de GEI (kt CO₂ eq) por componente, serie 1990-2020. Fuente: Equipo Técnico de Energía del MINENERGIA.

Con el propósito de contrarrestar los niveles de contaminación atmosférica resultantes de las emisiones del sector del transporte y promover el avance hacia la meta de carbono neutralidad, se vuelve esencial la aplicación de estrategias de mitigación ajustadas a las características estructurales, culturales y sociales particulares de cada país. En este contexto, la investigación actual desempeña un papel fundamental, adoptando un enfoque tanto investigativo como académico.

En consecuencia, este estudio se erige como una herramienta clave para identificar y comprender las complejidades inherentes a la descarbonización de Chile. A través de un análisis exhaustivo, se proponen medidas diseñadas para abordar los desafíos únicos que presenta el país en su camino hacia la neutralidad de carbono. Estas medidas no solo se centran en la reducción directa de emisiones, sino que también consideran aspectos como la infraestructura existente, las prácticas culturales relacionadas con la movilidad y las dinámicas sociales que pueden influir en la implementación efectiva de estrategias de descarbonización.

En ese orden de ideas, este enfoque integral busca no solo cumplir con los objetivos medioambientales, sino también armonizar estas metas con la realidad y diversidad de la sociedad chilena.

El Problema

Planteamiento del problema

El cambio climático, un fenómeno de alcance global que ha ganado prominencia en las últimas décadas, plantea uno de los desafíos más apremiantes para la humanidad. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) provenientes de diversas fuentes antropogénicas contribuyen significativamente a este problema, destacándose el sector del transporte como un actor clave responsable de una parte sustancial de las emisiones globales. El presente planteamiento del problema se enfoca en la necesidad urgente de abordar las emisiones de transporte, considerando la magnitud del impacto ambiental, social y económico que generan.

En la actualidad, el transporte, principalmente impulsado por combustibles fósiles, representa una proporción sustancial de las emisiones de GEI. La continua expansión de la movilidad urbana y el aumento en la demanda de transporte de carga agravan aún más este problema. A pesar de los esfuerzos realizados en algunos sectores para reducir las emisiones, los avances han sido insuficientes para contrarrestar el crecimiento global del parque automotor y la expansión de la infraestructura de transporte.

En este contexto, es imperativo comprender a fondo las dinámicas subyacentes a las emisiones de transporte, analizando los sistemas de mitigación actuales implementados a nivel nacional e internacional. La efectividad de estas medidas y su capacidad para abordar las particularidades del contexto local son aspectos cruciales que merecen una evaluación minuciosa. La insuficiencia de las estrategias existentes para frenar las emisiones de transporte y la falta de coordinación entre los diferentes actores involucrados subrayan la necesidad de una revisión integral.

La importancia de abordar las emisiones de transporte no solo reside en la urgencia climática, sino también en los impactos directos sobre la calidad del aire, la salud pública y la sostenibilidad ambiental. Las concentraciones de contaminantes atmosféricos provenientes del transporte no solo afectan la salud respiratoria de la población, sino que también contribuyen a la formación de lluvia ácida y la degradación de la calidad de los ecosistemas.

Además, el compromiso con la carbono neutralidad a nivel nacional es esencial para cumplir con los compromisos internacionales en materia de reducción de emisiones. La alineación con los objetivos

establecidos en acuerdos como el Acuerdo de París se vuelve imperativa para contribuir de manera efectiva a la mitigación del cambio climático y sus impactos catastróficos.

El análisis de la situación actual revela una realidad preocupante. A pesar de los avances tecnológicos y las iniciativas gubernamentales para promover vehículos más eficientes y energías limpias, las emisiones de transporte continúan en ascenso, además este sector es el responsable del 36.6% del consumo energético del país [4]. La dependencia persistente de los combustibles fósiles, combinada con la falta de incentivos significativos para la transición hacia alternativas más sostenibles, ha contribuido a este estancamiento.

Las limitaciones de las medidas actuales son evidentes. La falta de una estrategia integral que aborde no solo los vehículos individuales sino también la infraestructura y los patrones de movilidad, así como la ineficacia de algunos sistemas de mitigación existentes, plantean desafíos significativos. La desconexión entre las políticas energéticas y de transporte agrava aún más la situación, haciendo hincapié en la necesidad de un enfoque más integrado y coordinado.

La contribución potencial de esta investigación para superar estas limitaciones está en proponer medidas específicas que conduzcan a la carbono neutralidad en el sector del transporte a nivel nacional. La urgencia de esta investigación se refleja en la necesidad de desarrollar estrategias efectivas y contextualmente relevantes que no sólo reduzcan las emisiones, sino que también impulsen la transición hacia un modelo de transporte más sostenible y resiliente.

En ese orden de ideas y para orientar esta investigación, se plantean las siguientes preguntas:

1. ¿Cuáles son los sistemas de mitigación de emisiones de transporte implementados en la actualidad y cuál es su impacto?
2. ¿Qué medidas de mitigación de emisiones de transporte han sido exitosas a nivel internacional y pueden ser adaptadas a la realidad nacional?
3. ¿Cómo se pueden proponer medidas de mitigación específicas, considerando los escenarios e impacto del sector energía-transporte en el país?

En este contexto, estas preguntas proporcionarán la dirección necesaria para llevar a cabo un análisis exhaustivo y formular propuestas concretas destinadas a abordar el problema de las emisiones de transporte a nivel nacional.

Objetivo general

Evaluar medidas de mitigación de emisiones de transporte específicamente diseñadas para alcanzar en la proporción que le corresponde al sector para el logro de la carbono neutralidad a nivel nacional.

Objetivos específicos

1. Investigar sobre sistemas de mitigación de emisiones de transporte implementadas en la actualidad y su potencial impacto.
2. Evaluar medidas de mitigación de emisiones de transporte implementadas mediante simulación.
3. Verificar si las medidas propuestas cumplen con los objetivos sectoriales fijados para la carbono neutralidad en Chile.

Justificación

La imperativa necesidad de abordar las emisiones de gases de efecto invernadero originadas en el sector del transporte se basa en la creciente conciencia de la crisis climática global. El cambio climático, atribuido en gran medida a la actividad humana, amenaza con consecuencias devastadoras para los ecosistemas, la biodiversidad y la calidad de vida de las generaciones presentes y futuras. En este contexto, esta investigación se posiciona como un esfuerzo vital para contribuir a la mitigación de este fenómeno global, centrando su atención en la formulación de medidas de mitigación de emisiones de transporte con miras a alcanzar la neutralidad a nivel nacional.

La relevancia se intensifica considerando el papel preponderante que desempeña el sector del transporte en la generación de emisiones de gases de efecto invernadero. Históricamente impulsado por combustibles fósiles, este sector ha contribuido significativamente a la acumulación de dióxido de carbono (CO₂) y otros contaminantes atmosféricos. La necesidad de una transición hacia prácticas más sostenibles y eficientes en el transporte se convierte, por lo tanto, en un imperativo ineludible.

La justificación de la investigación se estructura en torno a varios pilares fundamentales. En primer lugar, busca llenar el vacío existente en la comprensión de la efectividad de las medidas de mitigación

de emisiones de transporte implementadas tanto a nivel nacional como internacional. Examinar críticamente la eficacia de los sistemas actuales permitirá identificar las fortalezas y debilidades de estas estrategias, proporcionando así una base sólida para la formulación de propuestas más efectivas y adaptadas al contexto específico del país.

En segundo lugar, responde a la necesidad de evaluar las experiencias internacionales en la mitigación de emisiones de transporte. Las soluciones exitosas implementadas en otros países ofrecen lecciones valiosas que pueden informar el desarrollo de estrategias en el ámbito nacional. Al analizar estas experiencias, se pretende identificar las mejores prácticas y determinar su aplicabilidad y viabilidad en el contexto particular del país.

En tercer lugar, se busca proponer medidas de mitigación de emisiones basadas en un estudio exhaustivo de los escenarios e impacto del sector energía-transporte a nivel nacional. La interconexión entre el sector energético y el transporte es crucial para comprender las dinámicas subyacentes y desarrollar intervenciones efectivas. Esta aproximación integral permitirá no solo reducir las emisiones, sino también optimizar la eficiencia del sistema de transporte.

Adicionalmente, al considerar el marco internacional de compromisos ambientales, la adopción de medidas específicas para alcanzar la neutralidad no solo responde a la urgencia climática global, sino que también posiciona al país como un actor comprometido en la mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial. La alineación con acuerdos internacionales, como el Acuerdo de París, es esencial para construir una respuesta colectiva a la crisis climática.

Por otra parte, la investigación contribuirá al desarrollo de políticas públicas informadas y basadas en evidencia. Proporcionará a los tomadores de decisiones información crucial para diseñar intervenciones efectivas y estrategias de implementación que aborden las complejidades del sector del transporte. Este enfoque orientado a la acción fortalecerá la capacidad del país para cumplir con sus compromisos de reducción de emisiones y avanzar hacia un futuro más sostenible.

En última instancia, esta investigación se enraíza en la imperativa necesidad de abordar las emisiones de transporte como un componente crucial de la lucha contra el cambio climático. Al centrarse en la disminución de emisiones a nivel nacional, la investigación aspira a ser un catalizador para la transformación del sector del transporte, contribuyendo de manera significativa a la construcción de un futuro más sostenible y resiliente para las generaciones venideras.

Limitaciones y Alcances de la Investigación

Esta investigación, destinada a abordar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en el sector del transporte para alcanzar la carbono neutralidad a nivel nacional, reconoce la presencia de limitaciones inherentes y define sus alcances para proporcionar una visión clara del marco en el cual se desarrollará.

Limitaciones

1. **Complejidad del Sistema:** La interconexión de variables dentro del sistema energía-transporte presenta una complejidad significativa. La comprensión exhaustiva de todas las variables y sus interacciones puede verse limitada por la disponibilidad de datos detallados y la complejidad intrínseca del sistema.
2. **Datos Históricos:** La disponibilidad de datos históricos precisos sobre emisiones de transporte puede ser limitada. Las lagunas en la información pueden afectar la capacidad de realizar análisis comparativos a lo largo del tiempo y dificultar la evaluación del impacto de medidas previas.
3. **Cambios Políticos y Tecnológicos:** La investigación se lleva a cabo en un contexto dinámico en el cual cambios políticos y tecnológicos pueden ocurrir. Estos cambios pueden afectar la implementación de medidas propuestas y generar incertidumbre en los resultados esperados.
4. **Limitación Geográfica:** Aunque se busca una aplicación a nivel nacional, ciertas especificidades geográficas o políticas de regiones particulares pueden no ser completamente abarcadas. La variabilidad regional puede requerir enfoques específicos que no sean totalmente generalizables.
5. **Recursos Disponibles:** La investigación está sujeta a limitaciones de recursos, tanto financieros como de tiempo. Estas restricciones pueden influir en la extensión de la investigación y en la profundidad de los análisis realizados.

Alcances

1. **Propuestas de Mitigación Específicas:** La investigación se centra en la formulación de propuestas de mitigación específicas para el sector del transporte. Se pretende desarrollar estrategias aplicables y contextualmente relevantes que contribuyan a la carbono neutralidad.
2. **Análisis Comparativo Internacional:** Se llevará a cabo un análisis comparativo internacional para identificar prácticas exitosas en la mitigación de emisiones de transporte. La investigación buscará adaptar estas experiencias al contexto nacional.
3. **Enfoque Interdisciplinario:** La investigación adoptará un enfoque interdisciplinario que integre aspectos del sector energético y de transporte. Se pretende ofrecer una visión holística que permita abordar las complejidades del sistema.
4. **Orientación Hacia la Acción:** La investigación aspira a proporcionar recomendaciones prácticas y orientadas a la acción. Se buscará colaborar estrechamente con actores relevantes, como responsables de políticas y expertos del sector, para facilitar la implementación efectiva de las propuestas.
5. **Contribución a la Literatura Académica:** La investigación aspira a contribuir al cuerpo de conocimientos académicos sobre mitigación de emisiones de transporte. Se buscará publicar los hallazgos en revistas académicas para compartir los resultados con la comunidad científica.
6. **Aplicación Nacional:** Aunque se reconocen las variaciones regionales, se espera que las propuestas de mitigación desarrolladas sean aplicables a nivel nacional. El enfoque será en identificar soluciones que puedan ser adaptadas a diferentes contextos dentro del país.

1. Marco Teórico

1.1. Emisiones y Absorciones de Gases de Efecto Invernadero

La comprensión de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero (GEI) es fundamental para abordar el desafío del cambio climático y sus consecuencias. Los GEI, presentes de forma natural en la atmósfera, desempeñan un papel crucial en la regulación del clima al capturar energía y calentar la superficie del planeta. Sin embargo, las actividades humanas han alterado este equilibrio natural al liberar grandes cantidades de estos gases, generando un fenómeno conocido como emisiones de GEI [9].

Las emisiones de GEI se refieren a la liberación de gases que capturan radiación infrarroja y contribuyen al efecto invernadero, provocando el calentamiento global. Diversas acciones humanas, como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la industrialización, liberan grandes cantidades de CO₂, metano (CH₄), óxidos nitrosos (N₂O) y otros gases, intensificando el efecto invernadero. Este aumento en la concentración de GEI en la atmósfera es el principal impulsor del cambio climático, con consecuencias significativas en términos de temperaturas extremas, eventos climáticos intensos y elevación del nivel del mar.

La comprensión de la magnitud de las emisiones se vuelve esencial para implementar estrategias efectivas de mitigación y adaptación al cambio climático. En este sentido, es crucial considerar la equivalencia de emisiones, como el indicador utilizado en Chile, donde 1 kg de CO₂ se asocia con el consumo de energía de una ampolla de 15W encendida por 6 días completos o el uso de una TV LCD de 20" durante 2 días continuos [9].

Aunque las actividades humanas contribuyen a las emisiones, la naturaleza también proporciona mecanismos para contrarrestar este impacto. Las absorciones o capturas de GEI se refieren al proceso natural mediante el cual los ecosistemas, como bosques, océanos y humedales, retiran gases de la atmósfera. Este proceso actúa como un mecanismo de compensación, ayudando a equilibrar las emisiones y a mantener un ciclo sostenible del carbono.

Los bosques, por ejemplo, desempeñan un papel vital al absorber grandes cantidades de CO₂ durante la fotosíntesis. Sin embargo, la deforestación y la degradación forestal reducen esta capacidad de absorción, exacerbando el desequilibrio entre emisiones y absorciones.

La comprensión de las absorciones es crucial para desarrollar estrategias de conservación y restauración de ecosistemas que maximicen su capacidad para capturar y almacenar GEI [9].

1.2. Emisión de GEI a nivel mundial

Las emisiones globales de CO₂ han experimentado un aumento exponencial desde la época preindustrial, principalmente debido a la quema de combustibles fósiles (Figura 1-1) . Según el Global Carbon Project [10], en 2022, las emisiones globales de CO₂ alcanzaron un máximo histórico, llegando a 40.600 millones de toneladas (Figura 1-2). El carbón ha sido la principal fuente de estas emisiones en años recientes, y países como China, India y Estados Unidos lideran en términos de cifras. Adicionalmente, se destaca que las principales empresas petroleras, dedicadas a sectores relacionados con el petróleo, contribuyen con aproximadamente el 31% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero a nivel mundial.

Es importante tener en cuenta que estas emisiones no solo impactan significativamente en el cambio climático, sino también en la salud humana. Por ende, resulta fundamental la implementación de medidas concretas destinadas a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y fomentar prácticas sostenibles en todos los sectores. Es imperativo abordar estos desafíos de manera global y colaborativa para mitigar los efectos negativos en el medio ambiente y salvaguardar la salud y el bienestar de las generaciones actuales y futuras.

En cuanto a las emisiones por sector a nivel mundial el sector energía es el encargado del 73.2% de los cuales el 16.2% corresponde al sector transporte (figura 1-3) [11].

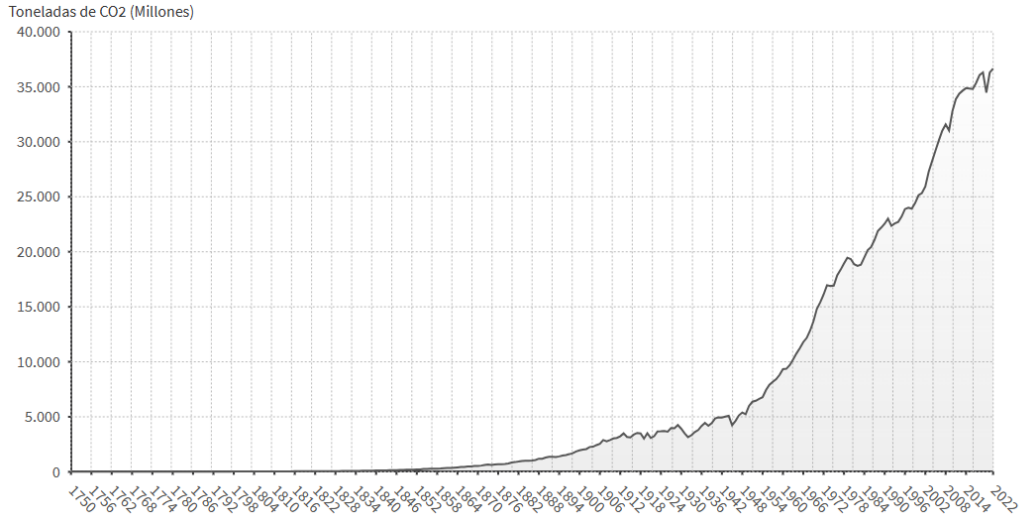


Figura 1 1 Emisiones de CO2 por combustibles fósiles desde la época preindustrial. Fuente: Global Carbon Project.

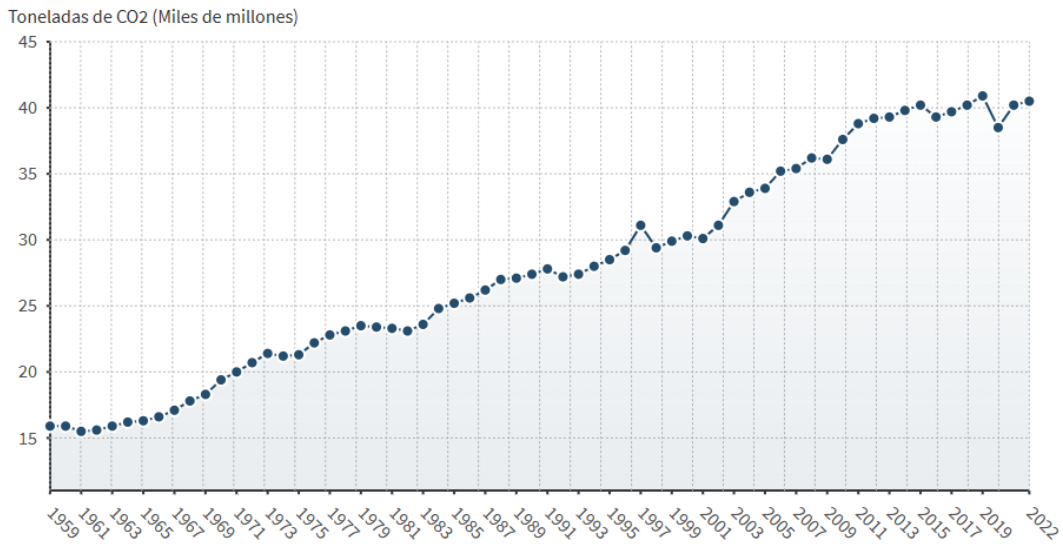


Figura 1 2 Evolución de las emisiones de CO2 en el mundo. Fuente: Global Carbon Project.

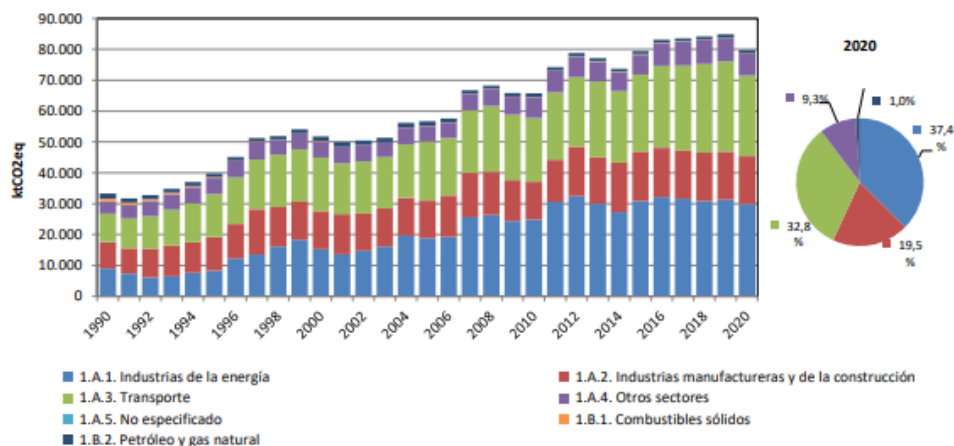


Figura 1 4 Emisiones de GEI en Chile para 2020. Fuente: Ministerio del Medio Ambiente.

1.4. Principales gases de efecto invernadero

Dióxido de Carbono (CO₂): El dióxido de carbono, un GEI fundamental, entra en la atmósfera a través de diversas actividades antropogénicas y naturales. La quema de combustibles fósiles, como carbón, gas natural y petróleo, constituye una fuente significativa de emisiones de CO₂. Además, la combustión de residuos sólidos y la deforestación también contribuyen a la liberación de este gas. La fabricación de cemento y ciertas reacciones químicas también son factores que generan emisiones de CO₂.

Por otro lado, las plantas desempeñan un papel crucial en la mitigación de las concentraciones de CO₂ a través de la fotosíntesis, capturando y almacenando este gas en el proceso biológico del ciclo del carbono. La gestión sostenible de los bosques y la promoción de la reforestación son estrategias clave para contrarrestar las emisiones de CO₂.

Metano (CH₄): El metano, otro GEI relevante, se libera durante diversas actividades relacionadas con la producción y el transporte de carbón, gas natural y petróleo. Las prácticas agrícolas y ganaderas también contribuyen significativamente a las emisiones de metano. La descomposición de residuos orgánicos en vertederos municipales para residuos sólidos es otra fuente destacada.

La gestión eficiente de residuos, la implementación de tecnologías de captura y uso de metano, y la mejora de las prácticas agrícolas son estrategias clave para reducir las emisiones de metano y mitigar su impacto en el efecto invernadero.

Óxido Nitroso (N₂O): Las emisiones de óxido nitroso, otro GEI, tienen su origen en actividades agrícolas e industriales, así como en la combustión de combustibles fósiles y residuos sólidos. El tratamiento de aguas residuales también contribuye a la liberación de N₂O.

La implementación de prácticas agrícolas más sostenibles, la gestión adecuada de residuos y la promoción de tecnologías más limpias en la industria son medidas esenciales para controlar las emisiones de óxido nitroso.

Gases Fluorados: Los gases fluorados, como hidrofluorocarbonos, perfluorocarbonos, hexafluoruro de azufre y trifluoruro de nitrógeno, son GEI sintéticos utilizados en diversos procesos industriales. Aunque se emiten en cantidades relativamente pequeñas, su potencial de calentamiento global es elevado, lo que los clasifica como "Gases de Alto Potencial de Calentamiento Global (GWP alto)" [13].

1.5. Carbono neutralidad

La neutralización de carbono constituye el propósito de disminuir y compensar la cantidad de dióxido de carbono (CO₂) liberado a la atmósfera por una entidad, evento, individuo o institución.

La iniciativa empresarial inicia su proceso mediante la reducción de la cantidad de CO₂ equivalente emitido, seguido por la compensación de las emisiones remanentes a través de inversiones en proyectos de bonos de carbono debidamente certificados.

La consecución de la carbono neutralidad puede alcanzarse en un ámbito global o limitarse a una sola entidad, industria o nación.

El procedimiento para lograr la carbono neutralidad implica la identificación de las fuentes de emisiones de carbono, su cuantificación, el establecimiento de metas de reducción y la implementación de estrategias orientadas a la disminución. Esto conlleva inversiones en tecnologías sustentables y fuentes de energía renovable, así como modificaciones en las prácticas operativas y en los comportamientos tanto del personal como de los consumidores [14].

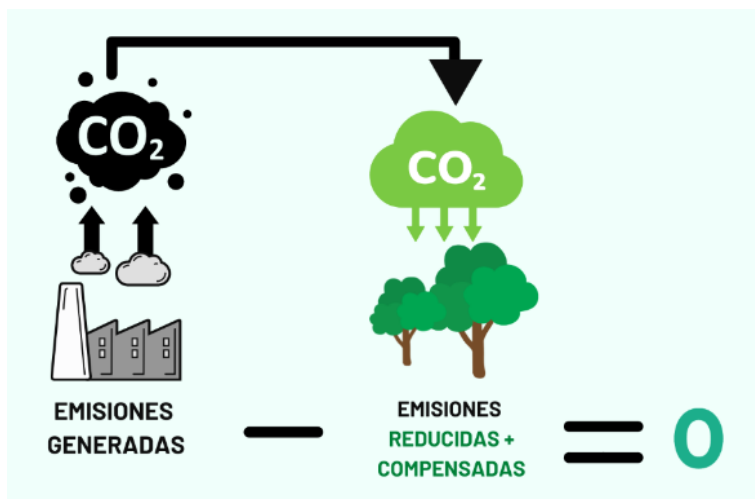


Figura 1 5 La carbono neutralidad.

1.5.1. Beneficios de Alcanzar la Carbono Neutralidad

La consecución de la carbono neutralidad conlleva una serie de beneficios sustanciales para las organizaciones, industrias y países. Dichos beneficios no se limitan únicamente al sector ambiental, sino que abarcan dimensiones sociales, económicas y empresariales. Entre los beneficios destacados se encuentran:

1. **Reducción de Costos Operativos:** Lograr la carbono neutralidad posibilita la identificación y mitigación de las principales fuentes de emisiones y consumos energéticos, contribuyendo así a la reducción de los costos operativos de las empresas.
2. **Mejora de la Imagen Pública:** La adopción de prácticas carbono neutrales mejora la percepción pública de empresas, países e instituciones, consolidando una imagen positiva asociada a la responsabilidad ambiental.
3. **Mitigación de Riesgos Legales:** Al ser carbono neutral, se reduce el riesgo de enfrentar multas o sanciones derivadas del incumplimiento de normativas medioambientales, fortaleciendo el cumplimiento de regulaciones vigentes.
4. **Contribución a Objetivos de Sostenibilidad:** La carbono neutralidad facilita a las organizaciones y países la consecución de sus metas de sostenibilidad, respaldando así los compromisos asumidos a nivel global.

5. **Mitigación de Impactos del Cambio Climático:** Al cuantificar y mitigar los efectos del cambio climático, se contribuye activamente a la protección del medio ambiente y al bienestar de las comunidades.
6. **Mejora de la Calidad del Aire:** La adopción de prácticas carbono neutrales tiene un impacto directo en la calidad del aire a nivel local, promoviendo entornos más saludables y sostenibles.
7. **Protección de la Biodiversidad:** La carbono neutralidad desempeña un papel crucial en la protección de la biodiversidad, tanto a nivel local como global, preservando los ecosistemas y las especies.
8. **Estímulo al Crecimiento Económico:** La inversión en tecnologías limpias y la generación de empleos verdes asociados a la búsqueda de la carbono neutralidad contribuyen al crecimiento económico de un país o región.
9. **Apertura de Nuevos Mercados:** La oferta de productos y servicios neutros en carbono no solo satisface la demanda creciente de consumidores conscientes, sino que también abre nuevas oportunidades de mercado.

1.5.2. Desafíos para alcanzar la Carbono Neutralidad

A pesar de los beneficios, el camino hacia la carbono neutralidad no está exento de desafíos significativos que requieren atención y resolución. Entre los desafíos más prominentes se destacan:

1. **Desafío Económico:** La inversión requerida para adoptar tecnologías y prácticas de reducción de emisiones puede representar una carga financiera considerable, siendo un desafío para muchas organizaciones y países con recursos financieros limitados.
2. **Resistencia y Aceptación Pública:** La implementación de cambios necesarios para reducir emisiones puede encontrarse con resistencia y falta de aceptación pública debido a la impopularidad o la percepción de inconveniencia.
3. **Desafíos Técnicos en Medición y Verificación:** La medición precisa de las emisiones y la verificación de los avances constituyen desafíos técnicos, ya que muchas organizaciones enfrentan dificultades para establecer objetivos realistas y realizar un seguimiento efectivo.

4. **Recopilación y Notificación de Datos:** La diversidad de normativas y estándares en la recopilación y notificación de datos sobre emisiones representa un desafío, generando la necesidad de armonizar y estandarizar los procesos a nivel internacional.

A pesar de estos desafíos, la carbono neutralidad sigue siendo un imperativo crucial en la lucha contra el cambio climático y la promoción de prácticas sostenibles a nivel global. La superación de estos obstáculos requiere una colaboración continua entre gobiernos, empresas, y la sociedad en general para impulsar una transición hacia un futuro más sostenible y equitativo [14].

1.5.3. Acciones clave para alcanzar la Carbono Neutralidad

La búsqueda de la carbono neutralidad, una meta esencial en el contexto global contemporáneo, demanda una serie de acciones y estrategias bien definidas. Dentro de este marco, se identifican cuatro acciones clave que destacan como fundamentales para el logro efectivo de la neutralidad de carbono: iniciativas públicas, privadas y locales; la consideración integral de emisiones directas e indirectas; la atención a las equivalencias de gases de efecto invernadero (GEI); y la implementación de mediciones precisas.

1. **Iniciativas Públicas, Privadas y Locales:** La colaboración y el compromiso de diversos actores, como gobiernos, empresas y comunidades locales, son elementos esenciales en la consecución de la carbono neutralidad. Cada día, un número creciente de países, ciudades y empresas se suma a la campaña global para alcanzar emisiones netas de CO₂ iguales a cero para el año 2050. Este compromiso colectivo no solo establece una visión compartida, sino que también impulsa la adopción de políticas y prácticas más sostenibles a nivel mundial.

Las iniciativas públicas, al establecer regulaciones y metas ambiciosas, motivan a las empresas a adoptar medidas más ecológicas. Las empresas, a su vez, desempeñan un papel crucial al invertir en tecnologías limpias y sostenibles, demostrando que la responsabilidad ambiental es un pilar integral de sus operaciones. A nivel local, las comunidades pueden contribuir mediante prácticas sostenibles y la promoción de la conciencia ambiental, creando un efecto multiplicador en la consecución de objetivos compartidos.

2. **Consideración Integral de Emisiones Directas e Indirectas:** Para lograr la carbono neutralidad de manera efectiva, es esencial tener en cuenta tanto las emisiones directas como

las indirectas. Las emisiones directas comprenden aquellas internas a la empresa, como el consumo de energía, electricidad y vapor. Por otro lado, las emisiones indirectas incluyen factores externos que la empresa no puede controlar directamente, como los residuos, los viajes de negocios y el transporte de empleados.

Aunque las emisiones indirectas pueden escapar al control directo de la empresa, reconocer su impacto es fundamental para una estrategia integral de carbono neutralidad. Este enfoque holístico permite a las organizaciones abordar todas las fuentes de emisión, identificar áreas de mejora y desarrollar estrategias efectivas para mitigar su huella de carbono.

3. **Equivalencias de Gases de Efecto Invernadero (GEI):** La carbono neutralidad no se limita únicamente a la reducción de dióxido de carbono (CO₂). Para abordar de manera completa el problema de las emisiones, es necesario considerar gases adicionales de efecto invernadero (GEI), como el metano y el carbono negro. Estos gases, aunque menos prevalentes, tienen un potencial de calentamiento global significativo. Al incluirlos en la estrategia de carbono neutralidad, se amplía la efectividad de las medidas adoptadas.

En el contexto argentino, se destaca el progreso hacia la carbono neutralidad, evidenciado por la consideración de estos gases adicionales. Empresas como Enel X están liderando el camino al ofrecer productos con eficiencia energética y contribuir a la concientización, promoviendo un enfoque integral para lograr un equilibrio ambiental.

4. **Mediciones Precisas:** La medición precisa de las emisiones se erige como un componente crítico en el camino hacia la carbono neutralidad. Es crucial seleccionar métricas que representen de manera precisa la cadena de valor de la empresa. En este sentido, basar la medición de carbono en índices de ventas u otras métricas no relacionadas puede conducir a evaluaciones erróneas y objetivos poco realistas.

La elección de medidas apropiadas permite una evaluación precisa del progreso hacia la carbono neutralidad y facilita la toma de decisiones informadas. Esto implica adoptar un enfoque basado en la realidad de las operaciones de la empresa, asegurando que las estrategias y acciones implementadas estén alineadas con los objetivos de neutralidad de carbono [15].

1.6. Medidas de mitigación sector transporte.

El balance de carbono cero, se ha convertido en un tema crucial en la agenda global en respuesta al cambio climático. Este concepto implica equilibrar las emisiones de gases de efecto invernadero liberadas a la atmósfera con medidas destinadas a eliminar o compensar esas emisiones.

En el contexto de un estado del arte, es esencial explorar las diversas estrategias, tecnologías y políticas que se están implementando a nivel mundial para alcanzar la carbono neutralidad. Este análisis permitirá comprender los avances actuales, los desafíos enfrentados y las perspectivas futuras en la búsqueda de un equilibrio sostenible entre las actividades humanas y la salud del planeta.

La comprensión y evaluación de las medidas de mitigación de emisiones de transporte existentes desempeñan un papel esencial en la formulación de estrategias efectivas y políticas públicas encaminadas a la reducción de la huella de carbono. En esta sección, se llevará a cabo un análisis exhaustivo y crítico de investigaciones previas, experiencias internacionales y las mejores prácticas implementadas a nivel nacional e internacional.

1.6.1. Medidas de mitigación de emisiones en Chile.

En lo que respecta a nivel país, es importante señalar que el gobierno es la principal entidad responsable de la tarea de mitigación de emisiones contaminantes, ya que dicta, promueve y ejerce el cumplimiento de leyes y normas medioambientales de acuerdo al contexto climático al que se expone Chile. De acuerdo a lo anterior, existen cuatro categorías en cuanto a las medidas de mitigación de emisiones, medidas de carácter regulatorio (modificaciones en la estructura del tráfico vehicular), medidas culturales (acciones de la sociedad), tecnología vehicular y energía utilizada en vehículos.

El Ministerio de Medio Ambiente cuenta con proyectos de Planes de Descontaminación Atmosférica, dentro de los cuales se desglosan distintas medidas para diferentes regiones del país, que a su vez varían en ciertos aspectos particulares debido a cada contexto geográfico. Tomando en cuenta la región Metropolitana por tener la mayor densidad poblacional y concentración de vehículos por persona:

- El Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica (PPDA) para la Región Metropolitana (Decreto Supremo N°31/2017 del Ministerio del Medio Ambiente) [5],

establece una serie de medidas para las principales fuentes de emisión identificadas en la zona respecto al transporte:

- Exigencia de norma Euro VI a flota del Transantiago.
- Mayor exigencia en control de emisiones en plantas de revisión técnica.
- Zona de baja emisión al transporte de carga.
- Incentivo a compra de vehículos de cero y baja emisión.
- Norma de entrada para Maquinaria Fuera de Ruta.
- Restricción permanente de un dígito por antigüedad a vehículos con Sello Verde, entre mayo y agosto.

Existen de igual manera medidas durante la gestión de Episodios Críticos (GEC), que dependiendo de la criticidad del estado del aire se toman ciertas medidas con menores o mayores restricciones, se puede observar en la Figura 1-6, un resumen de qué contempla esta gestión (incluyendo otras áreas aparte del transporte).

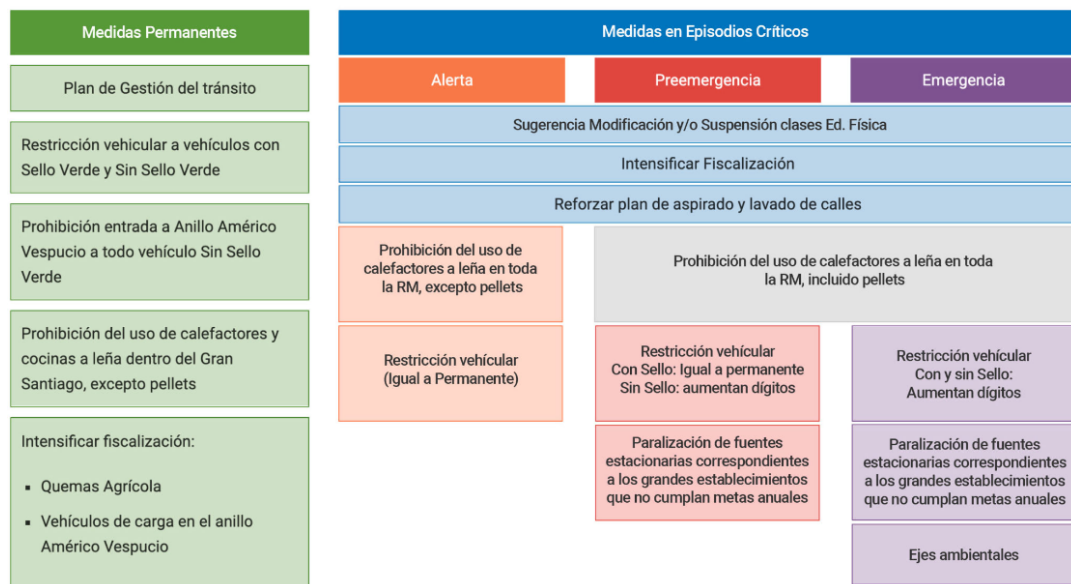


Figura 1 6 Resumen Medidas de Gestión de Episodios Críticos. Fuente: SEREMI Región Metropolitana.

En cuanto a la categoría de tecnología vehicular para mitigación de emisiones, se considera cierta información relacionada a la proyección de demanda del sector transporte, impulsada por el crecimiento de la demanda de transporte de pasajeros, dimensionada por la variable PKM (pasajero-kilómetro), y la demanda de transporte de carga, dimensionada por la variable TKM (tonelada-kilómetro). Estas proyecciones se estiman a partir de los distintos modos de transporte, como lo es el

transporte terrestre privado, taxis, buses, camiones de carga, transporte ferroviario de pasajeros y carga, aviación y transporte marítimo. Al separar por tipo energético (gasolina, diésel, etc.), se estiman las emisiones GEI y los factores de emisión del INGEI. [1]

Para la proyección del sector transporte, la NDC (Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional) que son los compromisos asumidos por los países que forman parte de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), utiliza supuestos respecto al PIB (Producto Interno Bruto), donde se considera la proyección del PIB del informe NDC (Gobierno de Chile, 2020) donde se actualiza tomando en cuenta el impacto de la crisis sanitaria; y respecto a la población, donde su proyección se actualiza considerando nuevos antecedentes disponibles.

Así, las medidas modeladas para caracterizar el escenario NDC, en la categoría de tecnología vehicular, fueron las siguientes:

- Electromovilidad en vehículos particulares y comerciales: un 58% de participación de vehículos eléctricos puros e híbridos en 2050.
- Electromovilidad en taxis y colectivos: Un 100% de participación de vehículos eléctricos para 2040 y 2050.
- Electromovilidad en buses: Un 100% de participación de buses eléctricos para 2040.
- Hidrógeno en transporte de carga: Un 85% de participación de camiones a hidrógeno para 2050.
- Hidrógeno en aviación: Un 10% en el sector hacia 2050.

En el escenario NDC+, que considera medidas sectoriales complementarias a las listadas en la NDC (no representan una propuesta oficial, sino que están basadas en algunas ideas de los expertos consultados durante el proceso participativo para robustecer la acción sectorial y lograr el cumplimiento de la NDC), se incluyeron las siguientes medidas en la categoría medidas culturales:

- Aumento de la participación del transporte público: Se considera un cambio de la participación modal del 10% desde el transporte privado hacia el transporte de buses para el 2050.
- Aumento de la participación del transporte no motorizado: Se considera un cambio de la participación modal del 10% desde el transporte privado hacia las bicicletas para 2050.
- Aumento de la participación del teletrabajo: Se considera una participación del teletrabajo del 10% hacia 2050, como consecuencia de lo cual supone una disminución del transporte privado. [1]

Se señalan las principales fuentes de incertidumbre modeladas en la Tabla 1-1:

Tabla 1 1 Fuentes de incertidumbre modeladas en el sector transporte. Fuente: Banco Interamericano de Desarrollo.

Fuente de incertidumbre	Descripción
PIB	Se consideran distintos escenarios de proyección del PIB, que varían entre un rango máximo y un rango mínimo.
Población	Se consideran distintos escenarios de proyección de la población, que varían entre un rango máximo y un rango mínimo.
Rendimiento de vehículos por tecnología	Se considera rango de variación del rendimiento de entre -10% y +10% con respecto al rendimiento de referencia.
Tasa de carga	Se considera un rango de variación del rendimiento de entre -10% y +10% con respecto a la tasa de carga de referencia.
Saturación de PKM del transporte aéreo	Se considera un rango de saturación de los PKM del transporte, que varía entre 4.5154.741 (valor de saturación del NDC) y 5.4185.690 PKM hacia 2050. El nivel de saturación de los PKM del sector aéreo se seleccionó en función del nivel de emisiones que proyecta el NDC.

De igual manera, las principales fuentes de incertidumbre asociadas a las medidas de reducción de emisiones se señalan en la Tabla 1-2:

Tabla 1 2 Fuentes de incertidumbre asociadas a medidas de reducción de emisiones en transporte. Fuente: Banco Interamericano de Desarrollo.

Fuente de incertidumbre	Descripción
Participación de electromovilidad en vehículos particulares y comerciales	Se considera un rango participación de la electromovilidad que varía entre el 20% y el 70% para 2050. El 20% corresponde al valor utilizado en el Escenario Base del NDC.
Participación de hidrógeno en transporte de carga	Se considera un rango participación de la electromovilidad que varía entre un 50% y un 85% para 2050. El 50% corresponde al valor utilizado en el estudio del Ministerio de Obras Públicas financiado por el BID.

Es importante destacar las estrategias de descarbonización, tomando gran protagonismo el rol de los instrumentos de precio al carbono. En combinación con otras políticas, un precio al carbono puede ayudar a acelerar y asegurar la transición a una economía baja en carbono costo-efectiva. Contempla instrumentos como impuestos al CO₂, sistema de compensación de emisiones (offsets), sistemas de transacción de emisiones (ETS) o programas sectoriales o nacionales de mitigación (NAMAs). Con un total de 57 iniciativas totales de fijación de precios del carbono aplicadas a nivel mundial por el momento, cubriendo alrededor de 11 gigatoneladas de CO₂ equivalente.

Bajo el Acuerdo de París, los países acordaron establecer el Artículo 6 como mecanismo que permite a las partes implementar sus contribuciones determinadas a nivel nacional. Este artículo permite el establecimiento de un mercado de emisiones entre países y otros autores autorizados con el objetivo de acelerar la descarbonización requerida y bajar los costos de tecnologías limpias con alto potencial

de mitigación. En Chile particularmente podría acelerar aún más la penetración de energías renovables, el retiro de las centrales a carbón, la electrificación del transporte y otros sectores, y la eficiencia energética.

Continuando con el panorama nacional, la ley N°21.210/2020 permitió introducir en el artículo 8 de la Ley N°20.780/2014, la implementación de un sistema de compensación de emisiones del impuesto verde, iniciando en 2023, permitiendo a los contribuyentes afectados al impuesto compensar todo o parte de sus emisiones, tanto de contaminantes locales (MP, NOx o SO2) como globales (CO2), con ayuda de proyectos de reducción de emisiones del mismo contaminante.

También existen instrumentos señalados en los artículos 13 y 14 del Proyecto de Ley de la Ley Marco de Cambio Climático (Boletín N° 13.191-12), donde se define la creación de normas de emisión de gases de efecto invernadero y el uso de certificados de reducción de emisiones para compensarlos, permitiendo que proyectos que reduzcan o absorban emisiones de GEI, obtengan certificados para el cumplimiento de las normas. [5]

Volviendo a las tecnologías para la mitigación, estas no estarían cumpliendo a cabalidad y en totalidad su función si es que se mantiene una industria en base a carbón como se menciona. Esto se debe a que en el país aún tienen una gran presencia de centrales a carbón para la obtención de energía eléctrica, por lo que la energía que utilizan estas tecnologías como la electromovilidad no tienen un origen 100% renovable y sustentable, mermando el abatimiento de las emisiones GEI. Los ámbitos con mayor impacto son la Industria Sostenible y el Hidrógeno, representando grandes reemplazos de consumo de diésel por electrificación e hidrógeno verde. El retiro de centrales a carbón es responsable del 76% de reducción de emisiones en el período 2020-2050. Esto se puede visualizar de mejor manera en la Figura 1-7.

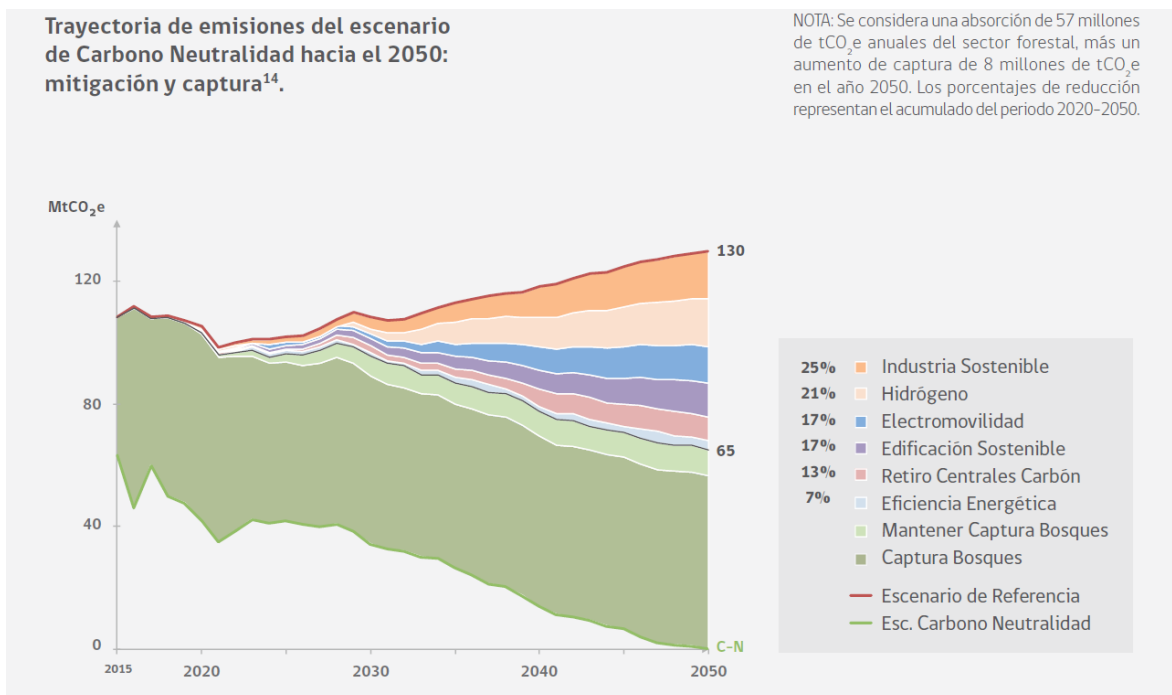


Figura 1 7 Trayectoria de emisiones del escenario de Carbono Neutralidad hacia el 2050: mitigación y captura. Fuente Ministerio de Energía.

En el año 2050, Industria Sostenible e Hidrógeno presentarían reducciones de 16 MtCO₂e y 15 MtCO₂e respectivamente, mientras que la Electromovilidad y Edificación Sustentable reducirían 12 MtCO₂e y 11MtCO₂e respectivamente (Ver Tabla 1-3).

Tabla 1 3 Reducción de emisiones por ámbito de acción. Fuente Ministerio de Energía.

Ámbito	Reducción emisiones Año 2050 [MtCO ₂ e]	Reducción Año 2050 [%]	Reducción acumulada 2020-2050 [MtCO ₂ e]	Reducción acumulada 2020-2050 [%]
Eficiencia Energética	3	5%	53	6%
Edificación Sostenible	11	17%	147	17%
Hidrógeno	15	24%	199	22%
Industria Sostenible	16	24%	219	25%
Retiro de Centrales	8	12%	112	13%
Electromovilidad	12	18%	155	17%
Total general	65	100%	857	100%

Y en la Figura 1-8 puede observarse el impacto de las medidas de mitigación en el período 2020-2050 por ámbito de acción.

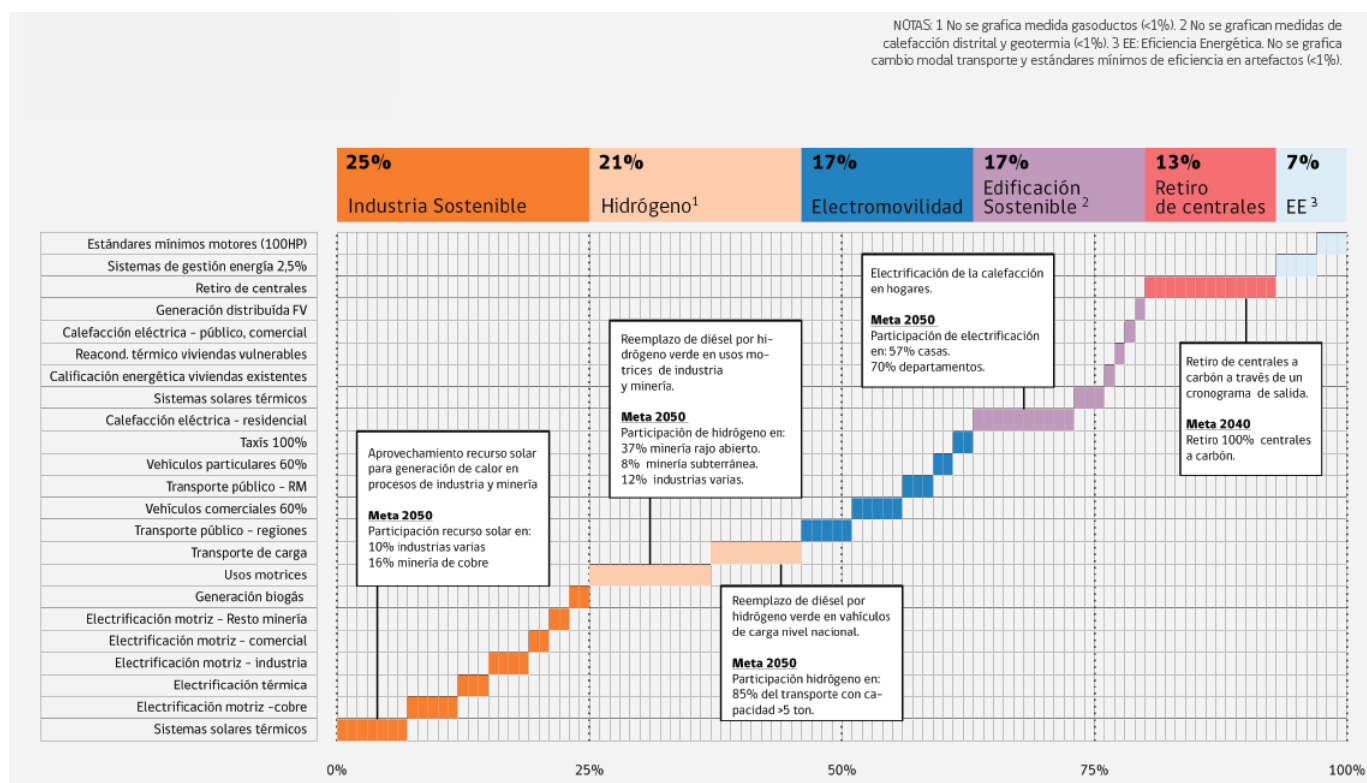


Figura 1 8 Reducción de emisiones acumuladas por ámbito y medida, período 2020-2050. Fuente: Ministerio de Energía.

El plan de descarbonización energética “Energía Zero Carbón” (anunciado en 2019), tiene por objetivos el retiro de ocho unidades generadoras a carbón al año 2024, el cese de generación eléctrica a carbón al año 2040 y finalmente alcanzar la meta de Carbono Neutralidad al año 2050. El cronograma de cierre de las centrales se puede observar en la Figura 1-9.

El reemplazo de estas centrales a carbón permite la expansión del parque de generación eléctrica, tomando protagonismo las centrales eólicas y solares. Esta evolución se puede apreciar en la Figura 1-10.



CIERRE DE LAS CENTRALES A CARBÓN Cronograma Primera Fase 2019-2024



Primera fase: 1.731 MW

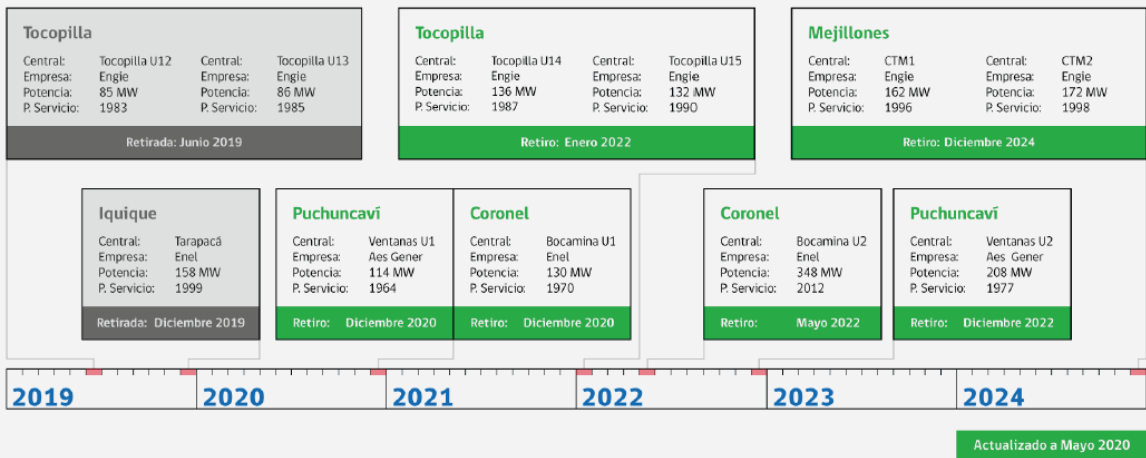


Figura 1 9 Cronograma de la primera fase de retiro de centrales a carbón. Fuente: Ministerio de Energía.

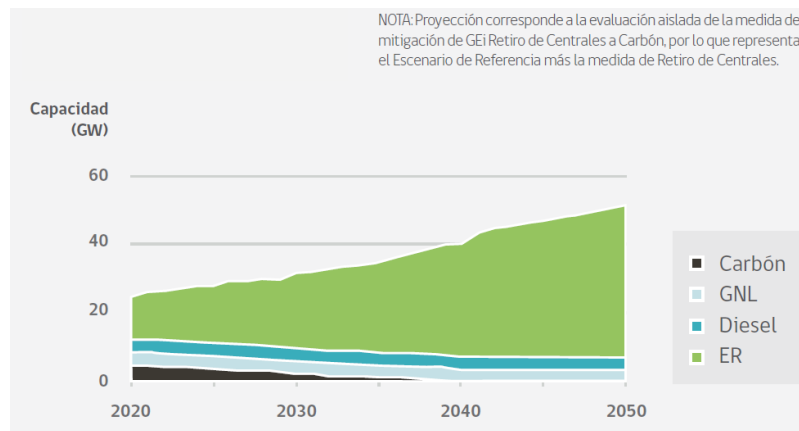


Figura 1 10 Evolución del parque generador con retiro de centrales a carbón. Fuente: Ministerio de Energía.

Ya definida esta pérdida de protagonismo de la energía proveniente de la quema combustible, entra en juego lo que respecta al transporte, la electromovilidad es un ejemplo de esto y una opción bastante prometedora.

En el ámbito nacional, se simularon medidas de electromovilidad en vehículos particulares, comerciales, taxis colectivos, así como en el transporte público. En el escenario de referencia se tiene una penetración de 20% de vehículos particulares y taxis eléctricos al 2050, una penetración de 20% de buses eléctricos en la Región Metropolitana y 0% en las demás regiones del país al 2050. Ahora si se habla desde el escenario carbono neutral se tiene una penetración de casi 60% de vehículos eléctricos particulares y comerciales al 2050, penetración de vehículos eléctricos del 45% al año 2045, y además 100% taxis eléctricos al 2050 y 100% de buses eléctricos al 2040 en todas las regiones del país (Figura 1-11). [5]





Electromovilidad			Referencia		Carbono Neutral				
			2020	2050	2030	2035	2040		
Vehículos particulares 	Ventas	Comerciales	10%	80%	20%	85%	100%		
		Particulares	10%	80%	20%	85%	100%		
				2020	2050	2030	2040	2050	
	Vehículos particulares 	Parque total	Comerciales	2%	20%	3%	30%	60%	
Particulares			2%	20%	3%	30%	60%		
Taxis colectivos 			2%	20%	30%	65%	100%		
Transporte Público 			Regiones		< 1%	20%	20%	100%	100%
			Santiago		< 1%	20%	50%	100%	100%

Figura 1 11 Niveles de penetración de medidas de electromovilidad en escenario de referencia y carbono neutralidad.
Fuente: Ministerio de Energía.

Otra tecnología aplicada a la tecnología para energía en vehículos es el hidrógeno verde, no sólo en el transporte, ofrece vías de descarbonización de un amplio rango de actividades económicas. Se proyecta para contribuir en la mejora del aire y fortalecer la seguridad e independencia energética del país.

El análisis hecho para distintos casos sobre la utilización del hidrógeno verde se desglosa de la siguiente manera (Figura 1-12):

- Reemplazo de diésel en transporte de carga terrestre nacional (85% de vehículos con capacidad mayor o igual a 5 toneladas al año 2050, equivalente al 70% del consumo final de energía en este ámbito).
- Reemplazo de motores diésel en la minería e industria nacional (37%, 12% y 8% de la energía utilizada para fines motrices en los sectores de Cobre de mina rajo, Industrias varias y Cobre de mina subterránea, respectivamente) equivalente al 20% del consumo final de energía en este ámbito.
- Reemplazo de gas para uso residenciales y comerciales (7% de la energía utilizada para agua caliente sanitaria). [5]




Hidrógeno		Referencia	Carbono Neutral		
			2030	2040	2050
Transporte de Carga 		Sin medidas	20%	50%	70%
Usos Motrices 		Sin medidas	2%	10%	20%
Gasoductos 	Residencial	Sin medidas	0%	5%	7%
	Comercial	Sin medidas	0%	2%	2%

Figura 1 12 Niveles de penetración de medidas de hidrógeno en escenario referencial y carbono neutral. Fuente: Ministerio de Energía.

A continuación, se definen las metas en los diferentes plazos hasta 2050 fijadas por la NDC y las consiguientes medidas de mitigación propuestas por los diferentes organismos del estado y campañas de descarbonización para el transporte. Se presentan basados en el enfoque tanto regulatorio, culturales, tecnológico y de energía:

Estrategia Climática de Largo Plazo (ECLP) Contribución Determinada a nivel Nacional de Chile (NDC) - 2020 Carbono Neutralidad en el Sector Energía. [19]

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

Medidas NDC (Energía-Transporte):

- Cambio modal de transporte. (MTT líder, MINVU y MOP involucrados).
- Taxis eléctricos. (MTT líder, Ministerio de energía y MINVU involucrados).
- Vehículos comerciales eléctricos. (Ministerio de energía líder, MTT involucrado).
- Transporte de carga-Hidrógeno. (Ministerio de energía líder, MTT involucrado).
- Transporte público-RM. (MTT líder, Ministerio de energía involucrado).
- Transporte público-regiones. (MTT líder, Ministerio de energía involucrado).
- Vehículos particulares eléctricos. (Ministerio de energía líder, MTT y MINVU involucrados).

Estrategia Nacional de Electromovilidad. [20]

Instrumentos de fomento al transporte cero emisiones:

Incentivos directos e indirectos:

- Habilitar regulatoriamente la participación de los vehículos eléctricos en el esquema Netbilling, de forma que puedan inyectar a la red excedentes de energía y por otro lado, se beneficien de contar con generación renovable en el punto de inyección. (Min energía, CNE, SEC).
- Búsqueda de y aplicación de incentivos indirectos tales como el ajuste al permiso de circulación, revisión de los gastos rechazados a empresas, estacionamientos preferentes, zonas exclusivas de circulación, rebaja de arancel aduanero para vehículos eléctricos, entre otros a estudiar en profundidad. También se trabajará en el desarrollo de desincentivos a la compra y uso de vehículos contaminantes. (Min de energía, MTT, MMA, Min hacienda, MOP, Min vivienda y urbanismo, Min minería y Municipalidades).
- Se continuará impulsando la penetración de la tecnología en el segmento de transporte público menor, actualizando el esquema del programa “Renueva tu colectivo” e incorporando el programa “Mi taxi eléctrico” en regiones. (Min energía, MTT, Seremías, Gobiernos Regionales).
- Se trabajará en la revisión de instrumentos económicos de fomento a tecnologías limpias y eficientes, tales como el impuesto “verde” de vehículos, tal que grave adecuadamente las externalidades negativas de los vehículos afectos a él. (MMA, Min hacienda).

Financiamiento:

- Desde el Estado se generarán instancias de difusión para el llamado a instituciones financieras, tal como el Banco Estado, y otras de inversiones, a involucrarse en los programas de fomento a la electromovilidad con instrumentos de financiamiento ad hoc. Además, se levantarán recursos regionales para llevar la electromovilidad a todo Chile. (Min energía, MTT, MMA, Min hacienda, MOP, Min vivienda y urbanismo, Min minería, Gobiernos regionales).

Ley de Eficiencia Energética:

- Se desarrollará e implementará el reglamento que establece el procedimiento para la fijación de estándares de eficiencia energética vehicular y normas para su aplicación que deberán cumplir los vehículos nuevos motorizados livianos, medianos y pesados comercializados en el país. Adicionalmente se establecerá el primer estándar de eficiencia energética para vehículos livianos, medianos y pesados. (Min energía, MTT).

Transporte Público Mayor:

- Se generarán incentivos para la incorporación de buses eléctricos al transporte público mayor urbano en la Región Metropolitana y se generará un Plan Nacional para incorporar buses eléctricos urbanos en regiones analizando distintos escenarios, identificando barreras y costos. Así, entender cual es la mejor forma de abordar las particularidades regionales, definiendo mecanismos de electrificación para regiones. De esta manera se incorporarán buses eléctricos a nivel regional urbano en las distintas regiones del país, las que se implementarán de manera gradual según las características de cada región, así como se establecerán incentivos para el desarrollo regional de transporte público mayor urbano e interurbano. (Min energía, MTT, División de transporte público regional, Directorio transporte publico metropolitano, CNE, Gobiernos regionales).

Transporte de Carga:

- Se potenciarán proyectos piloto a través del Programa Giro Limpio ejecutado por la Agencia de Sostenibilidad Energética y Electromovilidad Logística del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, con el fin de mostrar experiencias replicables a la adopción de esta tecnología, acelerando el transporte cero emisiones en el transporte de carga. Lo anterior además se dará a conocer a través de la publicación de guías de casos de éxito. (Min energía, MTT, Agencia sostenibilidad energética (Agencia SE), Programa Giro Limpio, Transportistas, Proveedores de vehículos).

Micromovilidad como medio de transporte en la ciudad:

- Se potenciarán nuevos modelos de negocio que consideren incorporar la micromovilidad eléctrica como una opción de transporte. Apoyaremos el desarrollo de la electromovilidad en logística urbana mediante mesas de trabajo intersectoriales. (Min energía, MTT, Secretaría de planificación de transporte (SECTRA), Agencia SE).

Electrificación de la Flota Pública:

- Se impulsará la transición de la electromovilidad en el Estado a través de herramientas que nos ayuden a generar la línea base de consumos de la flota vehicular del Estado e identificar las flotas de uso intensivo para promover la transición a vehículos más eficientes, cero emisiones y cuya operación sea más económica. Se implementarán mecanismos que faciliten la adquisición de vehículos más eficientes eléctricos a través de convenio marco con proveedores de vehículos, proveedores de cargadores, empresas instaladoras, entre otros. Se elaborará un plan de recambio, para aquellas instituciones públicas con alta intensidad de consumo de combustibles, cuantificando los beneficios ambientales y económicos del recambio de las flotas de vehículos a su equivalente eléctricos. (Min energía, Min de hacienda, Dirección de presupuestos (DIPRES), Servicios del estado, Municipalidades).

Transporte Interurbano:

- Se trabajará en la regulación correspondiente al peso máximo de los vehículos que pueden circular por caminos públicos con el fin de impulsar buses y camiones eléctricos en carretera a nivel nacional. Además, se promoverá “Proyectos Caminos Inteligentes” del Ministerio de Obras Públicas, que busca dar valor al uso de fajas fiscales, considerando servicios sustentables, incluyendo movilidad eléctrica. (Min energía, MTT, MOP).

Maquinaria Fuera de Ruta:

- Se promoverá la adopción de maquinaria minera, alineados a la política Nacional Minera y, maquinaria forestal cero emisiones con el fin de contribuir al proceso de descarbonización. (MMA, Min minería).

Regulación del Reciclaje de la Batería:

- Se desarrollará, en el marco de la Ley N°20.920 sobre responsabilidad extendida del productor, el decreto específico de metas de recolección, valorización y otras obligaciones para las baterías, el cual incluirá las baterías utilizadas en medios de transporte eléctricos. Para ello se considerarán los principios que contempla la ley sobre la gradualidad y la jerarquía en el manejo de residuos, que tiene como primera opción la prevención, luego la reutilización, posteriormente la valorización y como última opción la eliminación. Esto llevará, entre otras acciones, a establecer incentivos asociados a la reutilización, que en este caso implicaría que las baterías extraídas de distintos medios de transporte puedan ser utilizadas con otros fines, generando un mercado formal y establecido. (Min energía, MTT, MMA, SEC, CNE, Servicio evaluación ambiental (SEA)).

Habilitación de la Segunda Vida de la Batería en el Mercado Eléctrico:

- Se estudiará y promoverá soluciones tecnológicas para la segunda vida de las baterías con el fin de potenciar la reutilización de las baterías de vehículos eléctricos en los sistemas de almacenamiento de generación eléctrica aislados y conectados a la red y además se revisará la regulación correspondiente para habilitarlo. (Min energía, MMA, Corporación de fomento de la producción (CORFO), Academia, SEC, CNE).

Regulación de la Transformación Vehicular:

- Se desarrollará la regulación que permita la transformación,etrofit, de vehículos de combustión a eléctricos, y la generación de una industria que contemple sus particularidades. (Min energía, MTT, SEC).

Hidrógeno Verde en Transporte:

- Se promoverá el desarrollo de proyectos piloto, comerciales e industriales de vehículos eléctricos que utilicen hidrógeno verde en distintos tipos de transporte, ya sea de pasajeros

como de movimiento de carga, así como en otras aplicaciones de transporte en que el hidrógeno presente competitividad, con el fin de mostrar casos de éxito y experiencias replicables. Además, se trabajará en su regulación habilitante. (Min energía, MTT, Agencia SE, CORFO).

Transporte más allá de la carretera:

- Se impulsarán programas de la línea de transporte eficiente que buscan avanzar hacia la sostenibilidad energética en el rubro del transporte. En este sentido se potenciará el piloto Vuelo Limpio de la Agencia de Sostenibilidad Energética apoyado por la Junta Aeronáutica Civil (JAC), para promover tecnologías y buenas prácticas de ahorro de combustible en el transporte aéreo, además del consumo de combustibles sostenibles en el rubro de la aviación. (Min energía, MTT, Agencia SE).
- Se identificarán iniciativas y se levantará información base de los consumos energéticos y de emisiones a través de trabajos de investigación aplicada y proyectos piloto con el fin de propiciar la electromovilidad del transporte marítimo tanto de cabotaje como internacional. (Min energía, MTT, Academia).
- En el marco de contribuir al desarrollo de un medio de transporte eficiente, limpio y seguro, se pondrán en servicio nuevos trenes eléctricos para los tramos de Estación Central-Melipilla y Santiago-Batuco, beneficiando a más de 70 millones de pasajeros por año. Adicionalmente, se estudiará y promoverán proyectos e iniciativas para aumentar la cobertura nacional del servicio ferroviario eléctrico, con el fin de que los beneficios lleguen a más personas de nuestro país. (Empresa de los ferrocarriles del estado (EFE), MTT).

Expansión Red de Carga en Regiones:

- Se desarrollará y facilitará un Plan Nacional de ubicaciones referenciales de puntos de carga, basados en criterios como flujos vehiculares y disponibilidad de la red eléctrica, con el fin de que los distintos actores involucrados tengan acceso a la mejor información disponible para expandir la red de carga a todas las comunas del país. Además se contempla un análisis normativo detallado de usos de suelo vinculados a puntos de carga. (Min energía, Agencia SE, CNE).

- Se impulsará el establecimiento de la regulación asociada a la instalación y manejo de infraestructura de carga para vehículos eléctricos con celda de combustible de hidrógeno. (Min energía, MTT).

Promover Soluciones de Carga:

- Se generarán recomendaciones y guías de buenas prácticas que establezcan lineamientos, definiciones y posibles modelos de negocio para el desarrollo de infraestructura de carga a los municipios, Servicio de Vivienda y Urbanismo, Departamentos de Obras Municipales, Gobiernos Regionales, entre otros. (Min energía, Municipalidades, Agencia SE).
- Se levantará información sobre actuales barreras a la instalación de infraestructura en espacios públicos, para agilizar e incentivar su desarrollo. (Min energía, Agencia SE).

Promover Soluciones de Carga en Ruta:

- Se incentivará la instalación y uso de elementos y componentes asociados a la electromovilidad en licitaciones del Ministerio de Obras Públicas. (Min energía, MOP, SEC, CNE).

Disminución de los tiempos asociados a la conexión de nuevas estaciones de recarga de vehículos eléctricos:

- Se establecerá una plataforma de conexión de cargadores para las solicitudes de conexión de estaciones de recarga de vehículos eléctricos, que permitirá monitorear y vigilar el cumplimiento normativo de los tiempos de respuestas de las empresas de distribución eléctrica, asociadas a las solicitudes de nuevas conexiones de instalaciones de recarga de vehículos eléctricos. (Min energía, SEC).

Tarifa Horaria Para la Electromovilidad:

- Se incorporará la electromovilidad de forma eficiente a la red eléctrica evaluando mecanismos de incentivo en el precio de la electricidad que permitan lograr motivar a

cargar de forma más eficiente un auto eléctrico, guiando a los consumidores para que la carga se produzca en horarios donde existen mayores holguras en el sistema eléctrico. (Min energía, CNE).

Integración Eficiente con la Red:

- Generar una coordinación activa entre la planificación de nuevos electroterminales y su demanda energética asociados al transporte público y la planificación de las redes eléctricas, de forma que los plazos de cada uno no sean una barrera para el desarrollo de la electromovilidad. (Min energía, MTT, CNE, SEC).

Aporte de la Electromovilidad en la Nueva Distribución:

- Se evaluarán las opciones y espacios de la electromovilidad y su relación con los nuevos actores del sector eléctrico con ocasión del Proyecto de Ley de Portabilidad y posteriores modificaciones legales. (Min energía, CNE).

Interoperabilidad:

- Se desarrollará e implementará el reglamento de Interoperabilidad con el fin de facilitar el acceso y conexión de los usuarios de vehículos eléctricos a la red de carga. Además se realizarán pruebas y pilotos para alimentar las posibles actualizaciones del mismo reglamento en el futuro, y se estudiarán las particularidades a considerar para el caso de vehículos eléctricos con celdas de combustible. (Min energía, SEC, CNE).

Normativa Técnica:

- Se implementará el Pliego Técnico Normativo 15, realizando campañas de medición y monitoreo de instalaciones de carga en vista a levantar insumos para una eventual revisión de la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS). (Min energía, SEC).

- Se desarrollará una guía para el desarrollo de proyectos especiales de infraestructura de recarga de vehículos eléctricos y se estudiará la integración de nuevas tecnologías a la normativa vigente.

Regulación en Edificios y Construcciones:

- Se revisará el alcance de prohibiciones en reglamentos de copropiedad que podrían representar una barrera en el futuro en la instalación de infraestructura de carga en estacionamientos sujetos al régimen de copropiedad inmobiliaria. (Min energía, MVU, SEC).
- Se generará la normativa necesaria para establecer que los estacionamientos de nuevos edificios, tanto residenciales como comerciales estén habilitados técnicamente para la instalación posterior de puntos de carga, buscando incentivos normativos para ello. Adicionalmente, se trabajará en soluciones para edificios existentes. (Min energía, MVU, SEC, CNE).

Infraestructura de Carga en Bienes Nacionales de Uso Público (BNUP):

- Se trabajará en establecer procedimientos para simplificar y unificar el procedimiento de conseguir autorización para usar el Bien Nacional de Uso Público para la instalación de infraestructura de recarga para vehículos eléctricos, velando por la seguridad de las personas y la infraestructura de carga. (Min energía, MVU, Servicios de vivienda y urbanización (SERVIU), Municipalidades, SEC).

Perfiles laborales de electromovilidad:

- Se realizará difusión del levantamiento de perfiles laborales relacionados a la mantención de vehículos eléctricos e instalación de infraestructura de cargadores de vehículos eléctricos, con el fin de dar a conocer el estándar mínimo exigido por el Ministerio de Energía, promoviendo además la formación y/o capacitación de los perfiles en las Instituciones de Educación Superior; asimismo se trabajará en la definición de nuevos perfiles de competencias laborales que permitan robustecer el Marco de Cualificaciones de

Energía y que este sea consultado por las instituciones de educación para la actualización o generación de nuevos procesos formativos en electromovilidad. (Min energía, Min educación, Servicio nacional de capacitación y empleo (SENCE), Instituciones de educación superior, Establecimientos educacionales, SEC y ChileValora).

Gestores Energéticos en el Transporte de Carga:

- Se formulará e implementará un programa de formación de gestores energéticos, enfocado en el sector transporte de carga. Este último entregará herramientas y capacidades a profesionales de empresas transportistas Giro Limpio, a fin de dejar instaladas capacidades en torno a la Eficiencia Energética y electromovilidad en cada una de estas empresas. (Min energía, Agencia SE, Academia).

Manufactura de Batería y Cargadores:

- Se fomentará el desarrollo local de baterías y cargadores a través de proyectos de innovación, así como también procesos asociados a su reciclaje o disposición final. (Min energía, Min minería, CORFO).

Instalador SEC:

- Se trabajará en el desarrollo de una licencia de instalador SEC específica para la transformación vehicular. (Min energía, SEC).

I+D Nacional:

- Se potenciará, a través de los retos de Innovación de Interés Público que lidera CORFO, la electromovilidad, con el fin de incluir desafíos de la tecnología para que puedan ser resueltos con investigación, desarrollo e innovación nacional. Además, se impulsará y promoverá la participación de distintos actores en iniciativas como el Centro para Aceleración de la Electromovilidad (CASE) e Instituto Chileno de Tecnologías Limpias (ICTL) con el fin de contribuir en la aceleración de los procesos de adopción e

electromovilidad en Chile y promover la investigación energética y la minería avanzada. (Min energía, CORFO).

Investigación:

- Se impulsarán estudios de investigación que consideren aplicaciones bidireccionales (vehículo-red eléctrica), incorporación de nuevas tecnologías como la trazabilidad que puede aportar Blockchain, sistemas de pago con moneda digital, extensión a contratos inteligentes en energía potencia u otros servicios a la red, aplicaciones de inteligencia artificial, vehículos autónomos, segunda vida de la batería, transformación o retrofit de vehículos pesados como buses y camiones a celdas de combustible, entre otros. (Min energía, MTT, MMA, Agencia SE, CNE, Academia).

Plataforma de Electromovilidad:

- Se potenciará la Plataforma de Electromovilidad, incorporando mayor contenido que apoye la toma de decisiones, tanto a nivel agregado nacional, como con detalle regional, tal que permita mantener a todos los actores con la información actualizada posible.

Línea de Educación y Difusión:

- Formación ciudadana. Los usuarios requieren estar informados y conocer que aspectos son relevantes en la electromovilidad. En ese sentido, dentro de la línea de educación y difusión del Ministerio de Energía, se incorporarán contenidos de seguridad y rescate en caso de siniestros asociados a vehículos eléctricos, híbridos o a celda de combustible hidrógeno, dentro de lo que se encuentre disponible, además de la explicación del etiquetado de consumo vehicular para vehículos livianos y medianos. (Min energía, Bomberos, Ambulancias y carabineros, Escuelas de conducción).

Aplicación EcoCarga:

- Se seguirá trabajando en mejoras a la aplicación de EcoCarga siempre con el fin de facilitar el acceso a infraestructura de carga de uso público a nivel nacional con la mejor información disponible. Se publicará información en tiempo real de los cargadores públicos, así como también en otras actualizaciones requeridas por los usuarios conforme avance la tecnología. Adicionalmente se actualizará la plataforma Bencina en línea, incorporando los puntos de carga de vehículos eléctricos disponibles. (Min energía, CNE, SEC).

Perspectiva de Género:

- A través de la iniciativa “Energía + Mujer” se promoverá la participación de más mujeres en electromovilidad con el fin de visibilizar a las mujeres que se desenvuelven en el sector de la movilidad eléctrica e incentivar a los gremios e instituciones relacionadas a tomar acciones concretas respecto a la igualdad de género en esta emergente industria. Adicionalmente, se potenciarán acciones conjuntas con las instituciones que forman parte del Acuerdo Público-Privado de Electromovilidad. (Min energía).

Acuerdo Público Privado por la Electromovilidad:

- Se continuará generando instancias de coordinación y colaboración a través del Acuerdo Público-Privado por la electromovilidad, estableciendo mayores instancias de vinculación entre los actores. (Min energía, MTT, MMA).

Rol Articulador:

- El Ministerio de Energía mantendrá y potenciará su labor articuladora de las iniciativas y actores relevantes para el desarrollo de la movilidad eléctrica. (Min energía).

Intercambio de Experiencias:

- Se generarán instancias de intercambio de experiencias con países en distinto nivel de desarrollo de la electromovilidad. (Min energía).

Colaboración Internacional:

- Se mantendrá la colaboración internacional en distintas iniciativas de las que ya Chile es parte, así como también se buscará aquellas nuevas que estén alineadas con los objetivos de electromovilidad y sustentabilidad del país. (Min energía, Min relaciones exteriores, Agencia SE.).
- En el marco de la cooperación internacional se ejecutarán los proyectos del Fondo Mundial para el Medio Ambiente GEF6 y GEF7 (Global Environment Facility, GEF, en inglés) para acelerar la adopción de la movilidad en Chile. (Min energía, MTT, Agencia SE.).
- En el marco de la implementación de la interoperabilidad, se promoverá la colaboración y coordinación con países de la región latinoamericana, con el objetivo de facilitar el acceso y conexión de los usuarios de vehículos eléctricos a la red de carga. (Min energía, Min relaciones exteriores, Agencia SE.).

Estrategia de Instrumentos Económicos. [21]

Impuesto Verde a Vehículos:

- Valor: Modificar la fórmula de cálculo del impuesto para que este alcance el doble de su valor actual al 2030.
- Vigilancia Tecnológica: En 2022 se implementará un sistema de vigilancia tecnológica respecto a la disponibilidad de alternativas de transporte bajas o neutras emisiones.
- Exenciones Tributarias: Eliminar gradualmente las exenciones tributarias a medida que se encuentren alternativas tecnológicas en el mercado.

Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026. [22]

Establecimiento de Estándares de Eficiencia Energética para Vehículos Livianos, Medianos y Pesados:

- A partir de lo que mandata la Ley 21.305, se incentivará la comercialización de vehículos nuevos más eficientes mediante la aplicación de estándares mínimos de eficiencia energética para el parque vehicular.

Aceleración del Despliegue de Medios de Transporte Sustentable y Eficientes:

- Para la implementación del primer eje de la nueva Estrategia Nacional de Electromovilidad, se trabajará en desarrollar instrumentos de fomento al transporte eficiente y cero emisiones, promoviendo la aceleración de la electromovilidad por segmentos, potenciando la creación de condiciones para la economía circular y transformación de vehículos, como también la habilitación de nuevas tecnologías como los vehículos a celdas de combustible de hidrógeno, entre otros.

Desarrollo de Condiciones Habilitantes para la Infraestructura de Carga de Vehículos Eléctricos:

- De forma muy estrecha con el desarrollo del segundo eje de la nueva Estrategia Nacional de Electromovilidad, se promoverá la expansión de la red de carga para todo tipo de vehículos eléctricos, fomentando distintas soluciones de carga y generando las condiciones habilitantes para su desarrollo armónico e interoperable.

Fomento a un Uso Eficiente del Transporte:

- Colaborar con el Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones para fomentar el uso de medios de transporte eficientes, promoviendo y facilitando el uso de transporte no motorizado (caminata y bicicleta) para viajes de hasta 5 kilómetros, mejorando las condiciones y el acceso al transporte público, y evaluando nuevas alternativas de transporte como el carsharing o transporte compartido.

Fortalecimiento de la Formación de Especialistas en Eficiencia Energética para el Transporte Eficiente:

- Se continuará con el trabajo desarrollado por la mesa de capital humano en energía para incluir temáticas de eficiencia energética fomentando la capacitación y certificación de operarios, técnicos y profesionales, de acuerdo a estándares y normativa vigente.

Impulso de la Industria Nacional Mediante el Fomento a la Investigación e Innovación en el Transporte Eficiente y Cero Emisiones:

- En línea con el desarrollo de las medidas del tercer eje de la nueva Estrategia Nacional de Electromovilidad, se fomentará, en conjunto con otras instituciones, el desarrollo local de tecnologías más eficientes aplicadas al sector transporte, tal como la electromovilidad, a través de proyectos de innovación, así como también estudios de investigación que apoyen el desarrollo futuro de un transporte eficiente y cero emisiones.

Difusión de los Resultados y Beneficios de la Eficiencia Energética Aplicada al Transporte:

- Se elaborará y mantendrá disponible material de difusión e información respecto de la aplicación de eficiencia energética en el transporte y se realizarán actividades de difusión enfocada en los distintos actores del sector.

Agenda de Energía 2022-2026. [23]

Transporte Sustentable y Electromovilidad:

- Avanzar en el despliegue de la electromovilidad, expandiendo la infraestructura de la red de carga en regiones y difundiendo información clara para que más personas opten por esta alternativa.
- Replicar el programa Mi Taxi Eléctrico en regiones.
- Habilitar y fomentar una industria de transformación de vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos.
- Implementar los primeros estándares de eficiencia energética para vehículos nuevos livianos, medianos y pesados.
- Impulsar el capital humano y la investigación aplicada a nivel nacional en electromovilidad.

5to Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. (Medidas de mitigación reportadas por el MTT). [24]

- Programa Nacional de Movilidad Urbana Sostenible.
- Apoyo técnico para el diseño de un mecanismo de financiamiento para electromovilidad en Chile.
- Impuesto verde a vehículos motorizados nuevos.
- Medidas del sector transporte en el plan de descontaminación de la región Metropolitana.
- Tren suburbano Tren Nos – Estación Central.
- Tren suburbano de la región de Bio Bio, Biotren.
- Tren suburbano Merval de la región de Valparaíso.
- Trenes suburbanos en la región Metropolitana – Tren Alameda Melipilla.
- Trenes suburbanos en la región metropolitana – Tren Santiago Batuco.
- Estrategia de Carbono Neutralidad 2035.
- Medidas para el sector transporte contempladas en el plan de mitigación de energía.
- Vuelo Limpio.
- Apoyo desde puertos y logística a la estrategia nacional de producción y distribución de hidrógeno verde.
- Incorporación de vehículos de carga basados en hidrógeno verde.
- Disminución de gases de efecto invernadero en el transporte marítimo.
- Mejoramiento e implementación de ciclo vías y sendas multipropósito.
- Estrategia Nacional de Movilidad Sostenible (ENMS).
- Reporte Anual de Emisiones del Sistema de Transporte Público de Buses del Gran Santiago.
- Actualización de Planes de Transporte.
- Gestión del Sistema de Transporte Público de Santiago (RED).
- Renovación de la flota del Sistema de Transporte Público de Santiago (RED).
- Programa renueva tu micro.
- Programa renueva tu colectivo.
- Expansión de la Red de Metro de Santiago.
- Programa especial de fomento a la electromovilidad en regiones.

Plan de Mitigación GEI Sector Energía. [25]

Impulso al Mercado de Medios de Transporte de Bajas Emisiones.

- Búsqueda de apoyo financiero para aumentar la participación de buses híbridos y eléctricos en el transporte público.
- Búsqueda de apoyo financiero para la compra de vehículos híbridos o eléctricos, particulares y taxis colectivos.
- Búsqueda de apoyo financiero para la compra de camiones livianos y medianos, híbridos o eléctricos.
- Búsqueda de apoyo financiero para el desarrollo de la infraestructura necesaria (ej. Redes de carga eléctrica).
- Búsqueda de apoyo financiero para incentivar mejoras tecnológicas en el transporte aéreo/marítimo.

Recambio Tecnológico del Transporte Público.

- Licitaciones en el transporte público con obligación de participación de transporte público de bajas emisiones.
- Regulación para la obligación de participación de taxis y colectivos de bajas emisiones.

Inversión en Modos Eficientes.

- Aumentar infraestructura de transporte ferroviario interurbano bajo esquemas públicos privados.
- Inversión en trenes urbanos (ej. Metro).
- Expansión de la infraestructura para bicicletas y buses urbanos (Vías exclusivas).

Políticas de Apoyo.

- Planificación urbana para disminuir la demanda de transporte y fomentar el transporte público.
- Implementar sistemas pilotos para mejorar la gestión del transporte (carpooling).
- Implementación de sistemas de información, comunicación y coordinación para los sistemas de transporte.

- Instrumentos que desincentiven modos más ineficientes (zona verde, tasa de congestión, entre otros).

Aumentar los Estándares de Eficiencia Energética.

- Estándares de rendimiento medio para vehículos (Marco regulatorio de EE).
- Instalación de kits aerodinámicos en el transporte de carga interurbano, validados con NCH 3331.
- Etiquetado de consumo energético.
- Participar en acuerdos internacionales de EE.
- Desarrollo de plataforma para mejorar tasa de ocupación, gestión horaria y adecuación modal en transporte de carga urbano.

Plan de Adaptación al Cambio Climático para Ciudades 2018 – 2022. [26]

Avanzar hacia una planificación urbana integrada, incorporando elementos de movilidad urbana.

- La normativa urbana puede avanzar hacia una mayor integración, reconociendo las relaciones de interdependencia entre usos de suelo y movilidad y fomentando las que eviten problemáticas ambientales, de acuerdo a las distintas realidades geográficas y especificidad local.

Fomentar la intermodalidad, incorporando modos colectivos y o motorizados.

- Es prioritario relevar iniciativas de vialidad urbana que promueven modos no motorizados de transporte, que atiendan integralmente el concepto de movilidad urbana. Esto involucra impulsar proyectos que incorporen las condiciones óptimas para caminar y desplazarse en bicicleta en la ciudad, potenciando la integración intermodal, bajo un enfoque de inclusión.

Mejorar el Sistema de Transporte Público de las Ciudades.

- La planificación de transporte urbano, labor que realiza el Programa de Vialidad y Transporte Urbano, SECTRA, dependiente del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, tiene como objetivo principal mejorar la operación de los sistemas de transporte urbano de las grandes ciudades y de las de tamaño medio. Para estos efectos, se elaboran, actualizan y se

realiza seguimiento a los Planes Maestros de Transporte Urbano, los cuales involucran inversiones en una cartera de proyectos de infraestructura y gestión de transporte, orientadas al desarrollo de los Sistemas de Transporte Urbano, en concordancia con las políticas de transporte y de desarrollo urbano previsto para las ciudades. Estas inversiones consideran infraestructura vial, incluyendo ciclovías, mejoramiento del transporte público, sistemas automáticos de control de tránsito y medidas de gestión, todo ello con el propósito que el sistema de transporte multimodal de las ciudades responda a las necesidades de transporte de personas y productos mercantiles, actuales y futuras de los habitantes, empleando en la elaboración de dichos Planes criterios de eficiencia y optimización desde el punto de vista social. Ello tiene como consecuencia reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero, GEI, generadas por los ahorros de los consumos de combustibles del sistema de transporte en su conjunto, ahorro que es estimado comparando los consumos del Plan versus una situación base optimizada. De esta manera y con la finalidad de cumplir con esta medida específica, se planea actualizar los Planes de Transporte Urbano y, a su vez, evaluar las emisiones de CO2 asociadas a estos.

1.6.2. Medidas de mitigación a nivel internacional

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) a través de sus estándares para automóviles y camiones implementan medidas destinadas a fomentar reducciones significativas en las emisiones de gases de efecto invernadero, ha establecido normativas y estándares exitosos para automóviles y camiones, las principales medidas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que plantean contempla lo siguiente:

- a. **Eficiencia Tecnológica de Vehículos:** Una de las rutas para reducir las emisiones de GHG es mediante el aumento de la eficiencia de la tecnología de vehículos. Esto implica avanzar en tecnologías más eficientes y sostenibles para vehículos ligeros y pesados.
- b. **Cambios en los Patrones de Viaje y Transporte de Bienes:** Otra vía es cambiar cómo se viaja y se transportan bienes. Esto puede incluir estrategias que fomenten formas más sostenibles de transporte, como el uso de medios de transporte público, compartir vehículos o utilizar opciones de transporte más eficientes.
- c. **Uso de Combustibles con Menor Contenido de Carbono:** La tercera ruta implica el uso de combustibles con menor contenido de carbono. Esto se refiere a la adopción de fuentes

de energía más limpias y sostenibles, como biocombustibles o electricidad generada a partir de fuentes renovables.

- d. **Historia de Éxito y Aplicación de Tecnologías Actuales:** Se destaca la historia exitosa de grandes cambios en el sistema de transporte en Estados Unidos, como la transición de caballos a automóviles y la construcción del sistema de autopistas interestatales en un corto período de tiempo. La aplicación generalizada de tecnologías, combustibles y enfoques de eficiencia de viaje probados hoy puede allanar el camino hacia reducciones significativas en las emisiones de gases de efecto invernadero [7].

Entre las medidas más recientes, la EPA ha introducido normas más ambiciosas con el fin de reducir de manera más significativa las emisiones de contaminantes del aire en vehículos livianos y medianos a partir del año modelo 2027. Estas nuevas propuestas se fundamentan en las normativas finales previas de la EPA, que abordaron las emisiones federales de gases de efecto invernadero en automóviles y camionetas ligeras para los años modelo 2023 a 2026.

Aprovechando los avances en la tecnología de vehículos limpios, se busca desbloquear una serie de beneficios para los ciudadanos estadounidenses, que incluyen desde la disminución de la contaminación climática hasta la mejora de la salud pública, así como el ahorro económico para los conductores mediante la reducción de los costos de combustible y mantenimiento. Es importante destacar que estas normas propuestas serían implementadas de manera gradual a lo largo de los años modelo 2027 a 2032 [8].

1.7. Conclusiones del capítulo

Cerrando este capítulo, se puede vislumbrar la potente influencia del sector transporte en términos de contribuciones en contaminantes atmosféricos, y a su vez la alta participación en la lucha por mitigar estos mismos. Son varios los proyectos impulsados y por impulsar aún que están cuidadosamente diseñados para mitigar las emisiones contaminantes de los vehículos terrestres, entre estos se cuentan con medidas tecnológicas y de energía como lo son la electromovilidad y el hidrógeno verde, de carácter regulatorio y culturales como incentivos económicos varios, promover el cambio modal, la disminución de actividad vehicular compartiendo vehículo para viajes en común o el teletrabajo, todo esto de la mano con una optimización de la infraestructura de las ciudades del país a fin de recibir estos cambios de la mejor manera posible y permitir su viabilidad. Lo anterior siguiendo el lineamiento que promueve lo revisado en el Acuerdo París, enfocándose en la metodología y plazos

correspondientes para cada proyecto por sí solo y en conjunto, consiguiendo finalmente una reducción considerable de emisiones contaminantes, y en el mejor de los escenarios, alcanzar la meta de carbono neutralidad.

2. Metodología.

La metodología de esta investigación propone proyectar al 2050 la flota y emisiones de los distintos tipos de vehículos terrestres de uso en el país, sea de carácter particular, transporte de pasajeros o de carga. Esto siguiendo el supuesto de que las medidas de mitigación para alcanzar la carbono neutralidad fueron aplicadas y su efecto en el tiempo, cumple con las metas propuestas por los organismos gubernamentales y acuerdos mencionados en esta investigación.

Para poder llevar a cabo esto, es que se utilizó un programa creado bajo la autoría de Mauricio Jiménez, estudiante titulado de ingeniería civil mecánica de la Universidad Técnica Federico Santa María. Metodología del programa presente en Anexo de la memoria de título de Mauricio Jiménez. [27]

El programa mencionado permite proyectar al 2050 las emisiones de los distintos tipos de vehículos y sus categorías, utilizando índices relevantes para el cálculo de la flota vehicular y de emisiones de los años 1990 a 2020. Estos se definen como FE y VKT.

Para entrar en detalle sobre lo que realmente está trabajando el programa, se establecerá las consideraciones que hay detrás de cada uno de estos índices.

2.1. Factor de Emisión (FE)

Este índice permite calcular las emisiones de variadas fuentes, dimensionando el contaminante en unidad de masa por alguna unidad relacionada directamente con la emisión contaminante. Para el caso de transporte terrestre abordado en este trabajo de título, se utilizará la medida de [gr/km], donde influencia el recorrido de estos vehículos en estudio. Estos son obtenidos mediante una metodología basada en COPERT [28], pero es necesario clasificar la flota vehicular presente en Chile y encontrar su equivalente en COPERT. La composición de la flota es obtenida mediante el INE y su reporte anual de permisos de circulación por región político-administrativa de Chile [29].

Estas equivalencias se representan en las siguientes tablas 2-1 y 2-2:

Tabla 2 1 Equivalente entre categorías INE y COPERT. Fuente: M. Osses et al.: High-resolution spatial-distribution maps.

Europe COPERT	Chile INE	Category code
Passenger cars (diesel and gasoline, M_1)	Automobile, station wagon, jeep, taxi	LPV
Light commercial vehicles (diesel and gasoline, N_1)	Van, pickup truck, minibus	LCV
Urban bus standard, Urban bus midi	Bus, taxi bus	UBS
Urban articulated bus	Bus	UBA
Intercity bus (coach standard)	Bus	ICB
HDT (rigid ≤ 14 t)	Truck	LDT
HDT (rigid 14–28 t)	Truck	MDT
HDT (rigid > 28 t and articulated)	Truck, trailer truck	HDT
L category (motorcycles)	Motorcycles and similar	MOT

Tabla 2 2 Segmentos vehiculares y su equivalente en COPERT. Fuente: Memoria Mauricio Jiménez.

Segmento chileno	Segment Copert
Vehículo liviano de pasajeros (VLP) y Taxi (TAX)	Medium
Vehículo liviano comercial (VLC)	N1-II
Camión liviano (CAM LIV)	Rigid ≤ 7.5 t Rigid 7.5 - 12 t Rigid 12 - 14 t
Camión medio rígido (CAM MED)	Rigid 14 - 20 t Rigid 20 - 26 t Rigid 26 - 28 t
Camión pesado rígido y articulado (CAM PES)	Rigid 28 - 32 t Rigid >32 t Articulated 14 - 20 t Articulated 20 - 28 t Articulated 28 - 34 t Articulated 34 - 40 t Articulated 40 - 50 t Articulated 50 - 60 t
Bus rígido (BUS RIG)	Urban Buses Standard 15 - 18 t
Bus articulado (BUS ART)	Urban Buses Articulated >18 t
Bus interprovincial (BUS INT PROV)	Coaches Standard ≤ 18 t
Motocicletas (MOT)	Motorcycles 4-stroke < 250 cm ³ Motorcycles 4-stroke 250 - 750 cm ³ Motorcycles 4-stroke > 750 cm ³

El programa requiere de ciertos inputs para proceder con el correspondiente cálculo de FE. Entre estos se toman en cuenta los siguientes:

- 1.A.3.b.i-iv Road Transport Appendix 4 Emission Factors 2021: Archivo del cual se pueden obtener los FE de CH₄, CO, CO₂, N₂O, EC, NH₃, NO_x, PM 2.5, SO_x y VOC, además del consumo de combustible.
- Velocidades medias para los tipos de vehículos en Chile.
- Kilometraje anual según el tipo de vehículo y región. (obtenidos de SECTRA)
- Factores para NH₃.

- Factores para N2O.
- Factores para BC.
- Factores para NOx.

El cálculo de los FE se obtiene en base a la siguiente expresión:

$$FE = \frac{\alpha * V^2 + \beta * V + \gamma + \delta/V}{\varepsilon * V^2 + \zeta * V + \eta} \quad (1)$$

Donde α , β , γ , δ , ε , ζ , η , tienen valores predefinidos en el archivo COPERT para las clasificaciones definidas y donde V es la velocidad media del vehículo contenida en un archivo xls. de velocidades. De esta expresión, interesa para el cálculo de emisiones de NOx, para efectos de esta investigación.

Para el caso de las emisiones de CO2, se requiere del cálculo de consumo de energía EC o también llamado FC, factor que permite el cálculo de FE de CO2 de la siguiente manera:

$$FC_i = \frac{10 - 3 * EC_i * 0,239}{\dot{q}_i} \quad (2)$$

Donde FC_i es el consumo de combustible i en [gr/km], EC_i el consumo de energía para el combustible i [MJ/km] y \dot{q}_i el poder calorífico del combustible i en [Kcal/g].

$$FC_{CO2,i} = 44,011 * \frac{FC_i}{12,011 + 1,008R_{HC,i} + 16,000R_{OC,i}} \quad (3)$$

De aquí, $R_{HC,i}$ y $R_{OC,i}$ se definen como la razón de hidrógeno-carbono y oxígeno-carbono del combustible i, obtenidos en [28].

2.2. Actividad Vehicular (VKT)

Este índice representa los kilómetros recorridos al año según vehículo y su categorización asociada. Hay que tener en consideración variables como el crecimiento del parque histórico, los cambios en la tecnología y la distribución de los vehículos dentro del país.

Para el cálculo del VKT se requiere de una seguidilla de pasos que considera la desagregación del parque histórico, el cálculo de consumo de combustible del parque histórico, cálculo de factores de corrección, cálculo del consumo corregido, cálculo de PKM y TKM corregido, cálculo del parque corregido, obteniendo así el VKT histórico.

Con la información obtenida anteriormente del INE [29], clasifica según año, región y categoría vehicular vista en la tabla 2-1. Aplicando factores porcentuales exponiendo la proporción de vehículos según tipo de tecnología (norma), motorización (gasolina o diésel) y ámbito (urbano o interurbano), esta clasificación se vuelve más precisa.

$$N_{i,j,k,l,m,n} = n_{i,j,l} \times X_{i,j,l,m,n} \times Y_{i,j,k,l} \times Z_{j,l,m} \quad (4)$$

Donde i, j, k, l, m y n, son año, región, ámbito, categoría, motorización y norma respectivamente. X, Y y Z, es el porcentaje de componente tecnológica, ámbito y motorización respectivamente. Tomando en cuenta n como la cantidad de vehículos calculados inicialmente con los datos del INE. Finalmente, N como la cantidad de vehículos ya clasificados.

$$VKT_{i,j,k,l,m,n} = N_{i,j,k,l,m,n} \cdot NA \quad (5)$$

Donde NA es el nivel de actividad. Esto se obtiene de la siguiente tabla generada en [30]:

Tabla 2 3 Nivel de actividad anual por región y tipo de vehículo. Fuente: M. Osses et al.: High-resolution spatial-distribution maps.

Region	Year kilometres travelled [km yr ⁻¹]					
	LPV	LCV	MOT	Taxi	Bus	Truck
I, XIV	8228	9873	5000	16 455	40 361	30 271
II	13 302	15 962	5000	26 604	66 618	46 120
III	14 382	17 259	5000	28 765	57 942	43 456
IV	15 241	18 289	5000	30 482	54 292	37 587
V	13 986	16 784	5000	27 973	33 598	23 260
VI	12 127	14 552	5000	24 254	28 935	20 032
VII	12 582	15 099	5000	25 165	39 394	27 273
VIII	12 390	14 869	5000	24 781	54 455	37 700
IX	13 515	16 217	5000	27 029	56 173	38 889
X, XV	14 494	17 393	5000	28 989	58 059	40 195
XI	12 089	14 507	5000	24 178	31 175	21 175
XII	7284	8741	5000	14 569	45 503	34 877
XIII	14 956	17 948	5000	37 405	67 368	29 471

Estos índices se obtienen al utilizar el programa de Mauricio Jiménez y su estudio para 1990 a 2020 y proyectado a 2050 [27]. Por lo que para efectos de este estudio requerimos de los datos de N

obtenidos de los VKT resultantes y utilizando la ecuación (5) despejando dicha N, y los valores de las emisiones totales del contaminante. Esta última se puede obtener de la ecuación explicada en [30].

$$E_i = VKT \cdot FE_i \quad (6)$$

Donde E_i corresponde a las emisiones totales del contaminante i respectivo. Estos pueden representarse en diferentes combinaciones y categorías explicadas, representando contaminantes a nivel nacional, regional, tipo de vehículo, norma.

Tabla 2 4 Introducción de tecnologías de emisión para las distintas categorías de vehículos y regiones. Basados en los decretos supremos del MTT y MMA. Fuente M. Osses et al.: High-resolution spatial-distribution maps.

Categoría	Región	Año de entrada en vigencia													
		1992	1993	1994	1996	1998	2002	2005	2006	2011	2012	2013	2014	2018	2020
VLP Gasolina	XIII	EPA 83				Euro 1		Euro 3		Euro 4			Euro 5		Euro 6
	V y VI	EPA 83						Euro 1	Euro 3			Euro 4	Euro 5		
	Resto del País			EPA 83				Euro 1	Euro 3			Euro 4	Euro 5		
VLP Diesel	XIII	EPA 83		Euro 1				Euro 3	Euro 4	Euro 5					
	V y VI	EPA 83						Euro 1	Euro 3			Euro 4	Euro 5		
	Resto del País		EPA 83					Euro 1	Euro 3			Euro 4	Euro 5		
Camiones	XIII			Euro 1		Euro 2		Euro 3	Euro 3 DPF	Euro 4		Euro 4	Euro 5		
	IV hasta X							Euro 3		Euro 4		Euro 4	Euro 5		
	II y III							Euro 3		Euro 4		Euro 4	Euro 5		
Buses	Resto del País							Euro 3				Euro 3	Euro 4 DPF	Euro 5	Euro 6
	XIII Transporte público		Euro 1		Euro 2		Euro 3				Euro 3 DPF	Euro 4 DPF	Euro 5		Euro 6
	XIII Otros Buses		Euro 1		Euro 2			Euro 3				Euro 4	Euro 5		
	IV hasta X			Euro 1		Euro 2		Euro 3				Euro 4	Euro 5		
	Resto del País							Euro 3				Euro 4	Euro 5		
Motocicleta	Todo el País			Euro 1				Euro 2	Euro 3						

La tabla 2-4 señala las tecnologías aplicadas a las distintas categorías de vehículos expuestos a trabajar. A estas normas cabe agregar para el caso de estudio, debido a la incorporación de las medidas de mitigación estudiadas en el presente trabajo, la electrificación de la flota, y vehículos a GLP.

2.3. Aplicación de Medidas de Mitigación.

Se genera una planilla de Excel con los resultados de FE y VKT estimados en el programa de Mauricio Jiménez, desde 1990 a 2050 con cada uno de los vehículos para las distintas regiones del país, motorización diésel y gasolina, y ámbito urbano e interurbano.

Mediante este último se busca obtener el comportamiento tanto de la cantidad de vehículos de cada categoría y tecnología, como sus emisiones totales. Esto con el fin de estudiar diferentes escenarios

proyectados al año 2050 en el que se estudiarán el potencial impacto de las medidas de mitigación más relevantes vistas en esta investigación.

2.3.1. Electromovilidad.

Primero se plantean escenarios para la creciente flota vehicular eléctrica. Considerando el escenario de referencia elaborado por el programa y en base a (5), se desprende un escenario optimista, el cual considera el nivel de penetración de la electromovilidad en la flota vehicular total a 2050, buscando alcanzar la meta propuesta por la NDC tanto para vehículos particulares como transporte público. Este supuesto determina que la cantidad de vehículos entrantes a la flota eléctrica desde 2019 en adelante, es proporcional a la flota norma EURO VI que no se incorporan a la flota total desde ese año. Esta proporción está sujeta a un porcentaje de inserción parametrizado con el fin de encontrar el valor que permitiría alcanzar dicha meta de la NDC para los períodos pre y post 2035/2045. Lo siguiente puede verse expresado como:

$$Q_{elopt(i)} = |(Q_{elopt(i-1)} - Q_{elref(i-1)})| + [Q_{elref(i)} + (Q_{elref(i)} \cdot P_{opt}\%)] \quad (7)$$

De donde Q_{elopt} es la cantidad de vehículos eléctricos en el escenario NDC (optimista), Q_{elref} la cantidad de vehículos eléctricos en el escenario de referencia, $P_{opt}\%$ refiere al porcentaje de penetración de la electromovilidad respecto a la norma EURO VI, e i el índice que señala el año correspondiente (de 1990 a 2050).

De manera similar para los vehículos norma EURO VI:

$$Q_{E6opt(i)} = [Q_{E6ref(i)} - (Q_{elref(i)} \cdot P_{opt}\%)] - |(Q_{E6ref(i-1)} - Q_{E6opt(i-1)})| \quad (8)$$

Donde Q_{E6opt} es la cantidad de vehículos norma EURO VI en el escenario NDC, Q_{E6ref} la cantidad de vehículos norma EURO VI en el escenario de referencia.

Para el cálculo del caso pesimista, en el cual la penetración de la electromovilidad es desacelerada en comparación con la integración de EURO VI, se tiene una expresión similar, pero considerando:

$$Q_{elpes(i)} = [Q_{elref(i)} - (Q_{elref(i)} \cdot P_{pes}\%)] - |(Q_{elref(i-1)} - Q_{elpes(i-1)})| \quad (9)$$

Y para el caso de norma EURO VI:

$$Q_{E6pes(i)} = |(Q_{E6pes(i-1)} - Q_{E6ref(i-1)})| + [Q_{E6ref(i)} + (Q_{elref(i)} \cdot P_{pes}\%)] \quad (10)$$

De donde Q_{elpes} es la cantidad de vehículos eléctricos en el escenario pesimista, Q_{E6pes} la cantidad de vehículos norma EURO VI en el escenario pesimista y P_{pes} % el porcentaje de penetración de la electromovilidad respecto a la norma EURO VI en el escenario pesimista.

Para ambos cálculos se considera el condicional de que si $Q < 0$ entonces su valor queda $Q = 0$, debido a que en ciertos períodos al compararse con años anteriores tanto para la electromovilidad como para el EURO VI que van en disminución, se obtenían números negativos y esta situación no se puede dar al tratarse de cantidad de vehículos.

Estos diferentes escenarios permiten dimensionar la cantidad de emisiones contaminantes que se podrían llegar a obtener, aplicando medidas de mitigación de estas. Anteriormente se vio para el caso de la electromovilidad, pero dentro de las vistas a lo largo de esta investigación, hay ciertas medidas o conjunto de ellas que influyen en la variabilidad del VKT de los vehículos, o bien en la cantidad de estos mismos circulando por el país.

2.3.2. Teletrabajo y cambio modal.

A modo de priorizar el impacto de cada una, se consideran las medidas Teletrabajo, enfocada a la disminución de los kilómetros totales de vehículos particulares y por ende reflejado en el VKT, Cambio Modal como una medida especializada en la reducción local de contaminantes.

Para cada uno de los casos anteriores es que se simula cuanto porcentaje de inserción de cada medida, reflejándose en un incremento anual de la presencia de esta, se necesitaría para alcanzar las emisiones de contaminantes en el escenario NDC alcanzado por la electromovilidad; en otras palabras, se busca aplicar la medida al escenario de referencia hasta alcanzar los números obtenidos en el escenario NDC sólo utilizando la penetración de vehículos eléctricos. Esto debido a que son magnitudes que están un tanto fuera del alcance de predicción, pero si por sí solas llegan a números relativamente realistas, en totalidad de medidas considerando la electromovilidad, podría ser un buen indicador de que se es posible llegar a la meta propuesta.

En cuanto al teletrabajo se refiere, esta iniciativa propone evitar los trayectos hogar-trabajo diarios realizados por ciudadanos los cuales su presencia en terreno u oficina de trabajo es primordial ni de primera necesidad. Su aparición más relevante fue durante el período de crisis mundial debido al COVID-19, y fue en ese mismo lapso en el que se evidenció su efectividad al tratarse de reducción de contaminantes debido a la actividad vehicular. Es por esto mismo que para simular su potencial

efecto en los años consiguientes, se busca una intervención en el VKT con un índice de decrecimiento acumulado particular.

A tener en consideración el teletrabajo, su efecto reside en una baja en el kilometraje total de los vehículos livianos del usuario particular o de cargas ligeras, por ende, por cada año que pasa la reducción del VKT en vehículos VLP, VLC y MOT tiene que ir en un aumento sostenido. Esto se puede modelar con una tasa de decrecimiento acumulada (al que cada año la medida se aplica con mayor presencia) aplicada al VKT del escenario de referencia. Lo cual se puede representar como:

$$VKT_{Tel(i)} = VKT_{ref(i)} \cdot (1 - \sum_{i=2025}^n t_i) \quad (11)$$

De donde VKT_{Tel} es el VKT luego de aplicar la medida Teletrabajo, VKT_{ref} es el VKT del escenario de referencia, t es la tasa de decrecimiento e i es el año correspondiente por calcular.

El objetivo de este planteamiento es encontrar una tasa t que iguale lo mayor posible las emisiones obtenidas con el escenario NDC que se logra con la electromovilidad acelerada.

La medida cambio modal en el transporte, lo que se ve reflejado en que cada año el uso de vehículos livianos se ve mermado, incentivando la presencia del transporte público. Al traducirlo en una simulación para las proyecciones a futuro, consiste en una reducción del VKT en vehículos particulares, comerciales y motos, y un considerable aumento en el VKT de vehículos de transporte público como son buses y taxis, debido a que la demanda de recorridos aumentaría y habría que suplirla. Similar al teletrabajo, se considera una tasa de decrecimiento acumulada en el VKT para VLP, VLC y MOT, pero en este caso también aplica una tasa de crecimiento acumulada directamente relacionada con la tasa de decrecimiento para BUS y TAX. Esta relación define que cada 30 vehículos particulares que disminuyen su uso, 1 vehículo de transporte público aumenta su VKT englobando la capacidad de los buses y de los taxis. De aquí se desprende lo siguiente:

$$VKT_{CM-Par(i)} = VKT_{ref(i)} \cdot (1 - \sum_{i=2025}^n u_i) \quad (12)$$

Donde VKT_{CM-Par} es el VKT de vehículos ligeros luego de aplicar la medida cambio modal y u es la tasa de decrecimiento sujeta a la medida.

Por otro lado, respecto al transporte público, la medida asocia una tasa de crecimiento que se relaciona de la siguiente manera:

$$VKT_{CM-Pub(i)} = VKT_{ref(i)} \cdot \left(1 + \frac{\sum_{i=2025}^n u_i}{30} \right) \quad (13)$$

Se desprende VKT_{CM-Pub} como el VKT de vehículos de transporte público luego de aplicar cambio modal.

Para ambos casos el objetivo es el mismo en relación con el teletrabajo respecto a las tasas de decrecimiento y crecimiento, el cual consiste en alcanzar las emisiones obtenidas en el escenario NDC resultante de aplicar la electromovilidad acelerada.

2.3.3. Vehículo compartido.

Esta iniciativa es una medida eficaz, especialmente en áreas urbanas densas ya que propone reducir la cantidad de vehículos en circulación mediante la compartición de vehículos entre varias personas. Existen dos métodos o versiones de esta dinámica, por un lado, se encuentra el carpooling, el cual implica que varias personas compartan un solo vehículo para realizar el mismo viaje o trayecto. Optimiza el uso de vehículo privado aumentando su ocupación promedio. Para este estudio en particular no se trabajará directamente en los cálculos ya que esta iniciativa, si bien cuenta con empresas que facilitan estos encuentros mediante aplicaciones para smartphones, aún no se ha masificado a una escala considerable como ocurre con el siguiente modelo. Por otro lado, está el car-sharing, modelo el cual ofrece acceso a vehículos compartidos sin que las personas tengan que ser propietarios. Este modelo está más masificado hasta el momento, con la ayuda de diferentes empresas que permiten la conexión entre conductor y pasajero, reduciendo el uso del vehículo particular de los pasajeros, pero aumentando el del conductor o vehículo que brinda la empresa.

Esta medida como bien se puede ver, optimiza los recursos y hace un uso eficiente de la flota vehicular. Conlleva a una disminución de vehículos en la vía haciendo que el tránsito sea más expedito y fluido, reduciendo el tiempo al cual el ambiente está expuesto a los contaminantes vehiculares. Lo importante para esta investigación es la reducción del VKT acumulado en los vehículos individuales, pero un aumento considerable en los vehículos que prestan este servicio.

Se desprende entonces cambios en la tabla 2-3 respecto a VLP y VLC, sujetos a un aumento en el kilometraje por año debido a sus nuevos usos, pero a su vez una disminución de la flota para esta categoría de vehículos. Estas variaciones se simulan con un crecimiento y decrecimiento paulatino de igual manera.

Para la variación del kilometraje anual de esta categoría de vehículos, se considerarán ciertas suposiciones tomando como referencia la tabla 2-3:

- Se estima un promedio de 50 [min] en el trayecto hogar-trabajo, tomando en cuenta horas punta y 5 días a la semana.
- Se considera un promedio de 3 [hr] semanales para trayectos varios del usuario.
- Los vehículos que prestan el servicio se ajustarán a una jornada tradicional de trabajo de 8 [hr] diarias promedio, 5 días a la semana promedio.

Estas suposiciones permiten estimar los nuevos valores para el kilometraje anual de los vehículos ligeros. Ahora bien, corresponde simular este cambio de manera transitoria, con la ayuda de una tasa de crecimiento acumulada, y para el caso de la flota vehicular, una tasa de decrecimiento acumulada. Los datos obtenidos de ambos casos permitirán obtener los nuevos valores para el VKT utilizando esta medida de mitigación y así encontrar qué magnitud corresponde para ambas tasas con el fin de que las emisiones totales se asemejen al escenario NDC aplicando la electromovilidad acelerada.

La metodología para obtener estos datos se puede entender analizando las siguientes expresiones:

$$NA_{VC_{i,j,k}} = NA_{j,k} \cdot (1 + \sum_{i=2025}^n c_i) \quad [\text{km/año}] \quad (14)$$

De donde NA_{VC} es el nivel de actividad vehicular aplicando vehículo compartido, c es la tasa de crecimiento del nivel de actividad vehicular NA acumulada, i el año, j la categoría vehicular (VLP, VLC) y k el número de la región de Chile correspondiente. El NA final se calcula en base a las suposiciones descritas, pero para llegar a este valor paulatinamente es que se recurre a la tasa de crecimiento acumulada.

El decrecimiento sostenido de la flota vehicular para VLP y VLC debido a esta medida de mitigación se puede dimensionar de la siguiente manera:

$$Q_{VC_{i,j}} = Q_{ref_{i,j}} \cdot (1 - \sum_{i=2025}^n b_i) \quad [\text{veh}] \quad (15)$$

Donde Q_{VC} es la cantidad de vehículos tras aplicar la medida vehículo compartido y b es la tasa de decrecimiento de la flota vehicular acumulada.

2.4. Conclusiones del capítulo

A manera de replicar el efecto que tendría la aplicación de las principales medidas de mitigación, es que, con la ayuda de un programa computacional, se busca estimar los FE y VKT de la flota vehicular proyectadas al año 2050. Una vez obtenidos estos datos, se proponen métodos específicos que propician la simulación de los efectos de cada una de las medidas propuestas con anterioridad, enfocadas principalmente a alterar la actividad vehicular de cada categoría bajo ciertos parámetros característicos. Son bases de datos muy grandes y que recopilan información estimada, por lo que esto tiene una tendencia bastante general y no ataca vehículo por vehículo y su actuar diario, si no que engloba un comportamiento en conjunto de cada categoría basada en la medida de mitigación en cuestión. El estudio dará hincapié en las medidas de aplicación de electromovilidad y el crecimiento de su flota en el país, aplicación de teletrabajo masificado, incentivo acelerado del cambio modal e incentivo del proyecto de vehículo compartido.

3. Resultados aplicación de medidas

Terminado el trabajo de aplicación de las medidas simuladas mencionadas en el apartado anterior, se obtienen una serie de resultados para cada método, que darán una idea del comportamiento tanto de la flota como de los contaminantes atmosféricos enfrentados a través del tiempo. Se hará una comparativa de cada año estudiado con cada medida y su evolución hasta 2050 a modo de comprobar que tan viable o no es la aplicación de cada medida por separado y en conjunto. Este estudio permitirá hacer un análisis del control de contaminantes y de la flota para así acercarse a unas posibles recomendaciones en cuanto al plan de acción que se debe seguir como país respecto a las actividades de la flota vehicular terrestre.

3.1. Electromovilidad

En base a la ecuación (5) se obtiene la flota vehicular total del escenario de referencia derivado del programa de Mauricio Jiménez visto en la metodología, usando los valores de VKT de esta planilla y los valores de NA de la tabla 2-3. Con este escenario de referencia para la flota vehicular, se intervienen sus respectivos datos con la ayuda de la ecuación (7), (8), (9) y (10), dando cabida a los escenarios NDC (optimista), pesimista y un escenario sin la presencia de flota eléctrica en el tiempo. La relación entre la flota vehicular y la flota total permite ir estimando con distintos valores para

P_{opt} % y P_{pes} % para los vehículos livianos particulares y vehículos de transporte público en el período pre y post 2035/2045.

Se encuentran los valores para los porcentajes de penetración de la electromovilidad en los cuales se cumple con las metas NDC respecto a vehículos ligeros particulares y comerciales eléctricos puros e híbridos de un 58%, respecto a vehículos de transporte público (buses y taxis) eléctricos de un 100%, y un 85% de participación de camiones cero emisiones. La penetración del período pre 2035/2045 para vehículos ligeros particulares y comerciales tiene que ser de un 3% basado en el comportamiento tras su inserción, mientras que la de vehículos de transporte público tiene que ser de un 20% y el de transporte de carga un 5%. Por otro lado, la penetración del período post 2035/2045 para vehículos ligeros particulares y comerciales tiene que ser de un 10%, mientras que la de vehículos de transporte público tiene que ser de un 45% y vehículos de carga o camiones de un 37%. Lo anterior netamente para el escenario optimista NDC, ya que para el escenario pesimista se simuló con una penetración de 3% para vehículos ligeros pre 2035/2045, 10% para transporte público en el mismo período, 5% para transporte de carga. Para el período post 2035/2045 la penetración se mantiene en 10% para todos los casos.

En la siguiente Figura 3-1 se puede observar la evolución de la flota vehicular eléctrica hasta 2050 para los distintos escenarios estudiados:

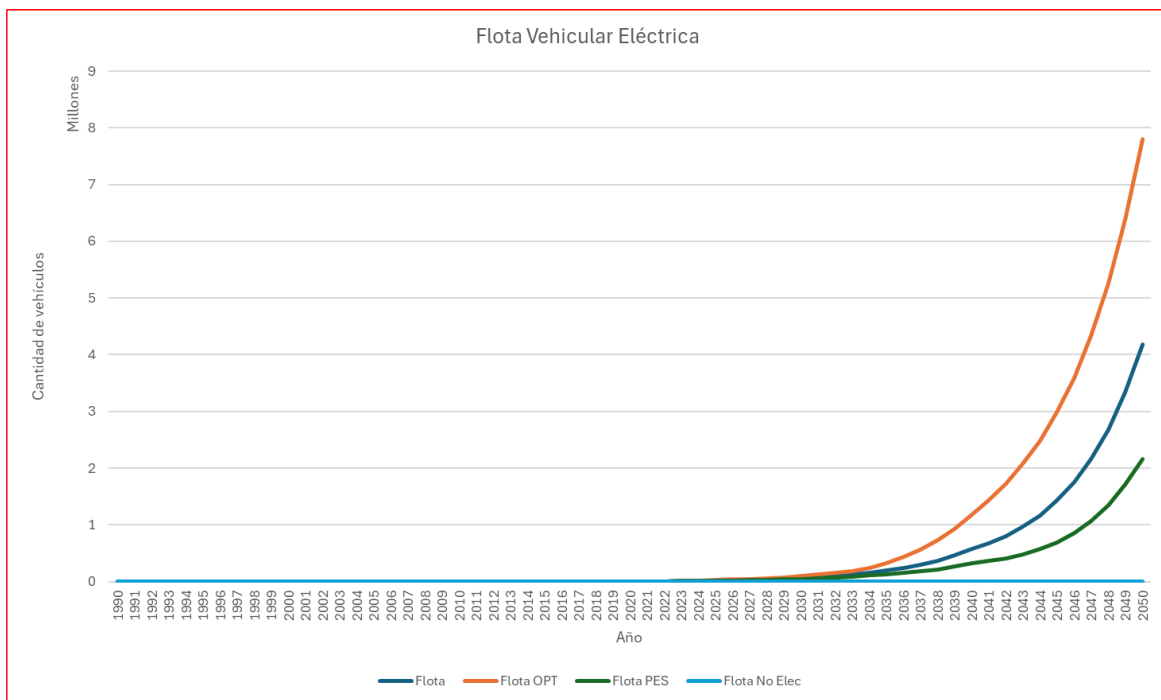


Figura 3 1 Flota vehicular eléctrica 1990-2050 para los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Pero el nivel de penetración en comparación con la flota convencional se puede reflejar de óptima manera con los siguientes gráficos de área Figura 3-2, 3-3 y 3-4 calculados para los tres escenarios principales:

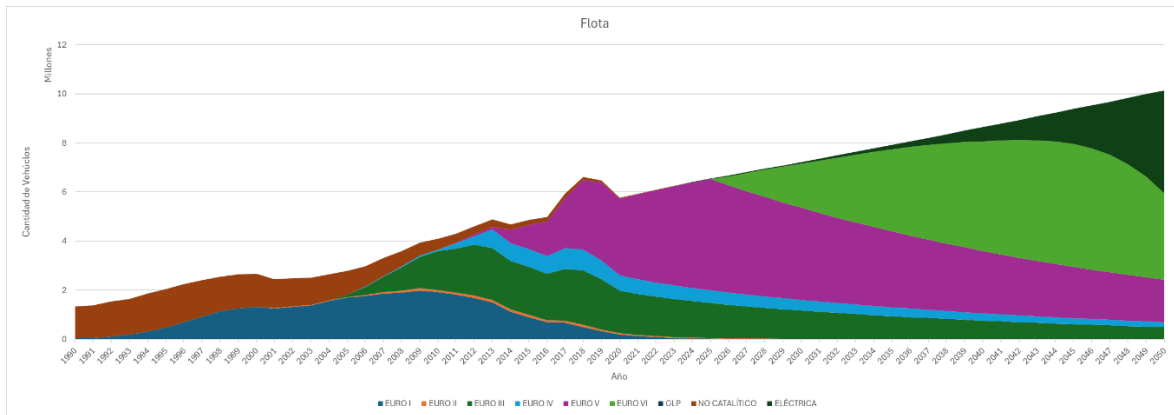


Figura 3 2 Flota vehicular en el tiempo para las distintas tecnologías, escenario de referencia. Fuente: Elaboración propia.

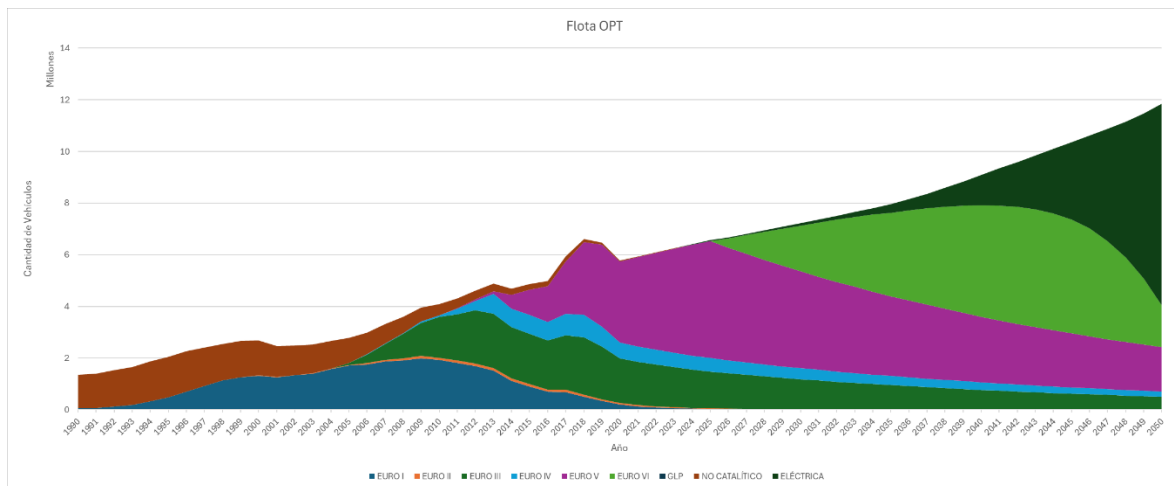


Figura 3 3 Flota vehicular en el tiempo para las distintas tecnologías, escenario NDC. Fuente: Elaboración propia.

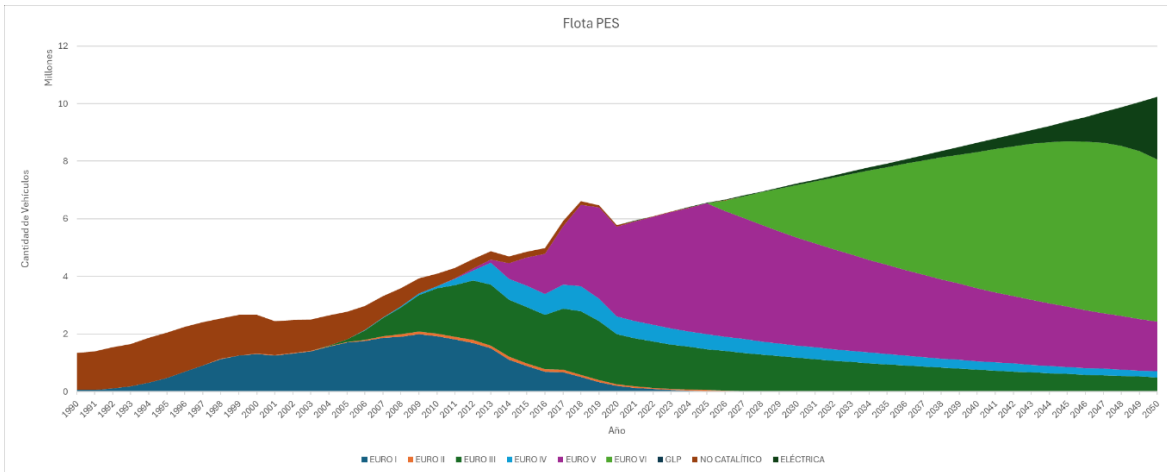


Figura 3 4 Flota vehicular en el tiempo para las distintas tecnologías, escenario pesimista. Fuente: Elaboración propia.

De la Figura 3-2 se puede observar el 40% aproximadamente de la presencia de vehículos eléctricos al 2050 que se tiene estipulado para el escenario de referencia, de la Figura 3-3 el 60% aproximado para el escenario NDC y de la Figura 3-4 cerca del 20% para el escenario pesimista.

Ya con toda la información obtenida respecto a la flota, VKT y los factores de emisión FE adquiridos del programa, con la ayuda de la ecuación (6), se obtienen las emisiones totales para los escenarios vistos para la electromovilidad y su impacto en estas. Se observa entonces en las figuras 3-5, 3-6 y 3-7 las emisiones totales tanto para CO₂ como para NO_x y PM 2.5:

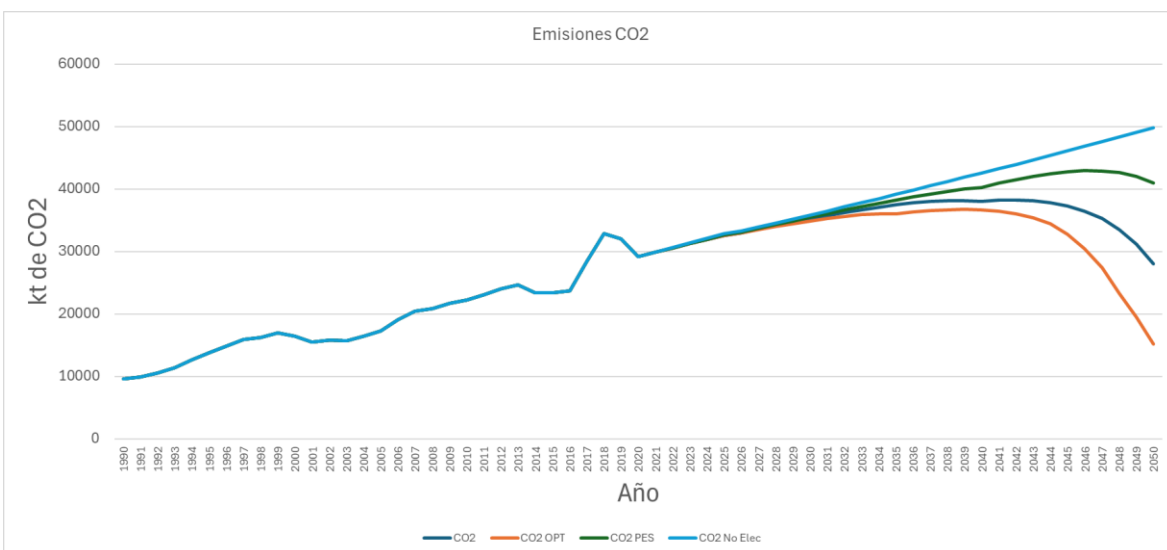


Figura 3 5 Emisiones totales de CO₂ 1990-2050, para los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.

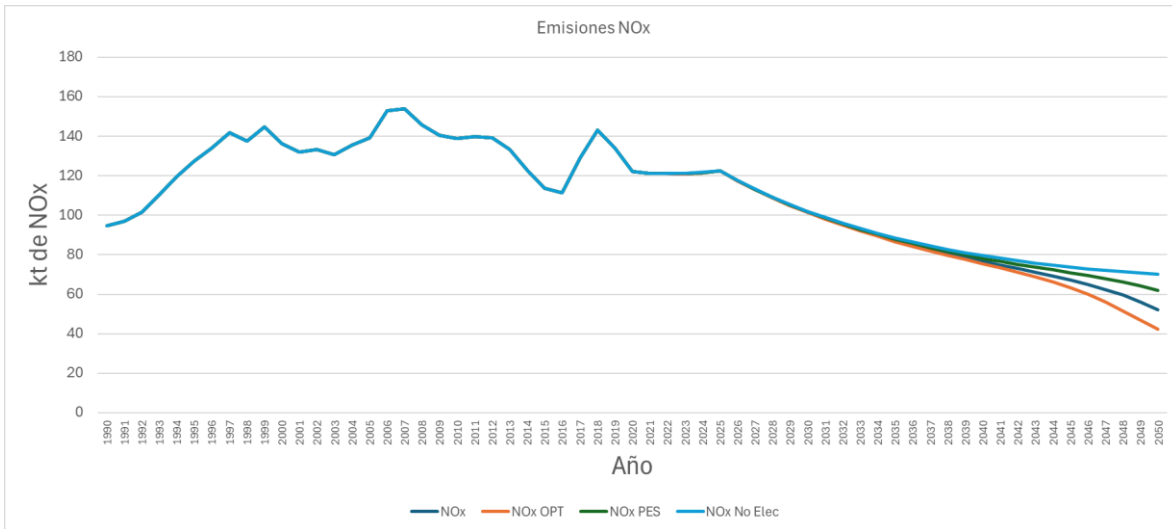


Figura 3 6 Emisiones totales de NOx 1990-2050, para los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.

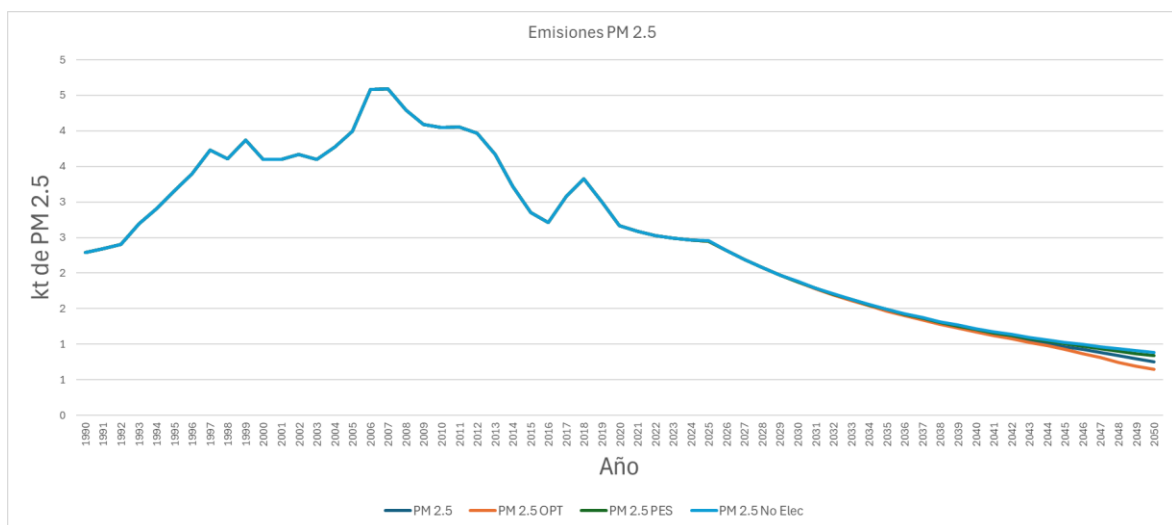


Figura 3 7 Emisiones totales de PM 2.5 1990-2050, para los distintos escenarios. Fuente: Elaboración propia.

Es destacable el punto del cual en la Figura 3-5 el aumento del comportamiento casi lineal de las emisiones de CO2 empieza a tender a la baja exponencialmente desde la aparición de la flota vehicular eléctrica en 2022 en los escenarios de referencia, NDC e incluso pesimista. Llegando para 2050 a un total de 15.191.926 toneladas de CO2, muy similar al punto en el que se encontraba en el 2001. Este valor es importante para poder fijar más adelante, con las medidas de mitigación no tecnológicas, un objetivo a la hora de encontrar los valores para las tasas que definen el comportamiento del VKT que

modificarían estas medidas y así entender qué tanta presencia de ellas es necesarias para cumplir esta meta.

De la Figura 3-6 y 3-7 se puede apreciar que la variación de las emisiones totales de NOx y PM 2.5 respecto a los distintos escenarios no es tan abrupta, la tendencia siempre es a la baja y de un comportamiento bastante lineal. Para el caso del NOx puede deberse a su control a temprana edad, como son las tecnologías modernas e implementación de sistemas de control como los catalizadores de reducción selectiva (SCR) y filtros de partículas, lo cual puede verse reflejado en el gráfico ya que la tendencia a la baja parte desde el 2005-2008, período aproximado en el cual empezó a implementarse la normativa Euro IV en adelante, donde el uso del SCR se fue consolidando en el mundo. Pero de igual manera es importante destacar que la presencia de la electromovilidad reduciría las aproximadamente 72.000 toneladas a 41.000 toneladas de NOx. Para el caso de PM 2.5 se debe principalmente a que su origen no proviene únicamente de la combustión, sino del desgaste de frenos, neumáticos y pavimento, re-suspensión de polvo en las vías debido al tráfico, etc. Por ende, la electromovilidad ayuda en parte, sólo a lo provocado por la combustión. Esto sumado a que la electromovilidad no tiene una fuerte presencia en vehículos pesados debido a los avances tecnológicos e infraestructura de carga, y este tipo de vehículo es una fuente importante de PM 2.5. Pese a todo, los escenarios apuntan a una baja, lo que es alentador para objetivos de control de este contaminante. Esto se permite debido a otro tipo de control de estos contaminantes como mejora de la infraestructura de transporte público, limpieza y mantenimiento de las calles, restricciones de tránsito y zonas de bajas emisiones, etc.

3.2. Teletrabajo y cambio modal

Teniendo en cuenta el escenario de referencia para VKT, se aplica sobre este la ecuación (11) para así obtener el nuevo VKT ajustado debido a la aplicación del Teletrabajo. Para llegar al objetivo de 15.191.926 toneladas de CO2 (Se utiliza este contaminante para el estudio debido a su gran impacto en relación a los otros, también a sus órdenes de magnitud), es que se fue iterando sobre los valores de la tasa de decrecimiento t hasta llegar al valor de 3,2% aproximadamente. Se puede apreciar en Figura 3-8 el impacto que tiene esta medida en el VKT con la respectiva tasa de decrecimiento t que se va acumulando año tras año.

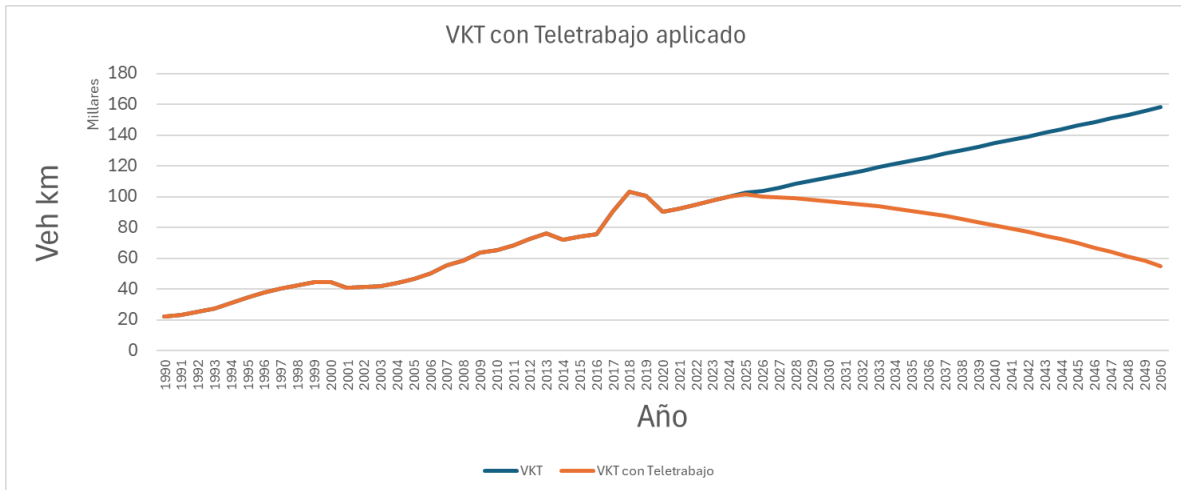


Figura 3 8 VKT tras aplicar la medida Teletrabajo. Fuente: Elaboración propia.

Al observar la Figura 3-8, destaca la tendencia del VKT con el Teletrabajo aplicado a un comportamiento linealmente decreciente a través del tiempo desde el año de aplicación. En comparación con el escenario de referencia que presenta un crecimiento de tendencia lineal para el VKT. Aplicando la tasa de decrecimiento acumulada sujeta a esta medida, se llega a 2050 al valor de aproximadamente 55.000 [veh km].

Esto si se traduce a emisiones contaminantes de CO₂, debería de ocurrir un efecto similar al de electromovilidad visto anteriormente debido a la meta NDC fijada por esta misma. De manera gráfica en la Figura 3-9 se traduce esto.

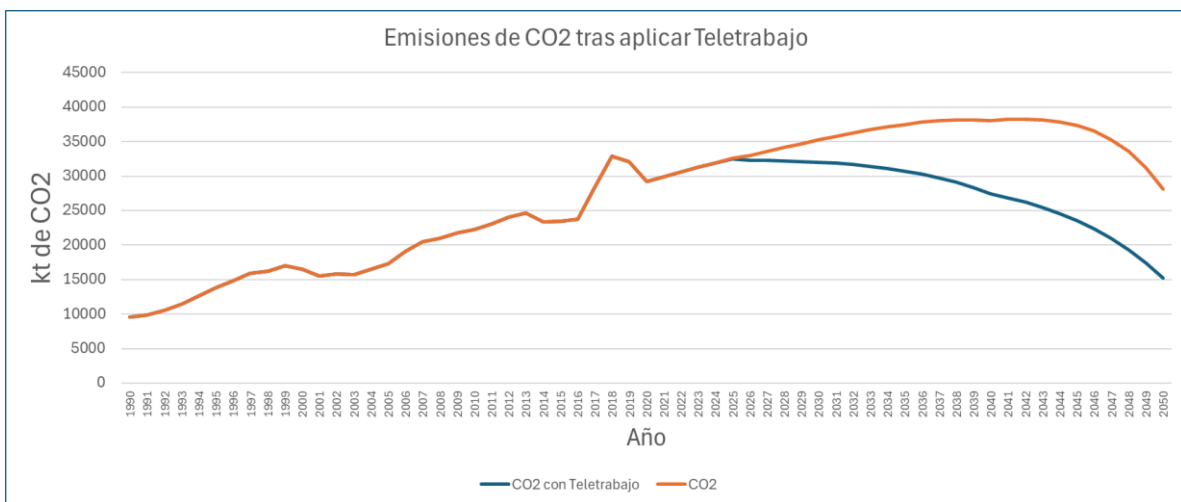


Figura 3 9 CO2 tras aplicar la medida Teletrabajo. Fuente: Elaboración propia.

Para incorporar el cambio modal a los cálculos de VKT reajustados, se recurre a la ecuación (12) y (13), para el decrecimiento del VKT de vehículos livianos y el crecimiento del VKT de transporte público respectivamente. En la Figura 3-10 al sumarle el efecto de cambio modal al efecto del teletrabajo al VKT, su decrecimiento es aún más acelerado y agresivo, posicionándolo en aproximadamente en 55.000 [veh km]. Esto último permite que la tasa de decrecimiento u adquiera un valor de 2,69% aproximadamente y la tasa t un valor aproximado de 1,6%. Finalmente se refleja en un comportamiento de las emisiones de CO2 anuales como aparece en Figura 3-11, donde el comportamiento vuelve a ser similar a las medidas anteriores.

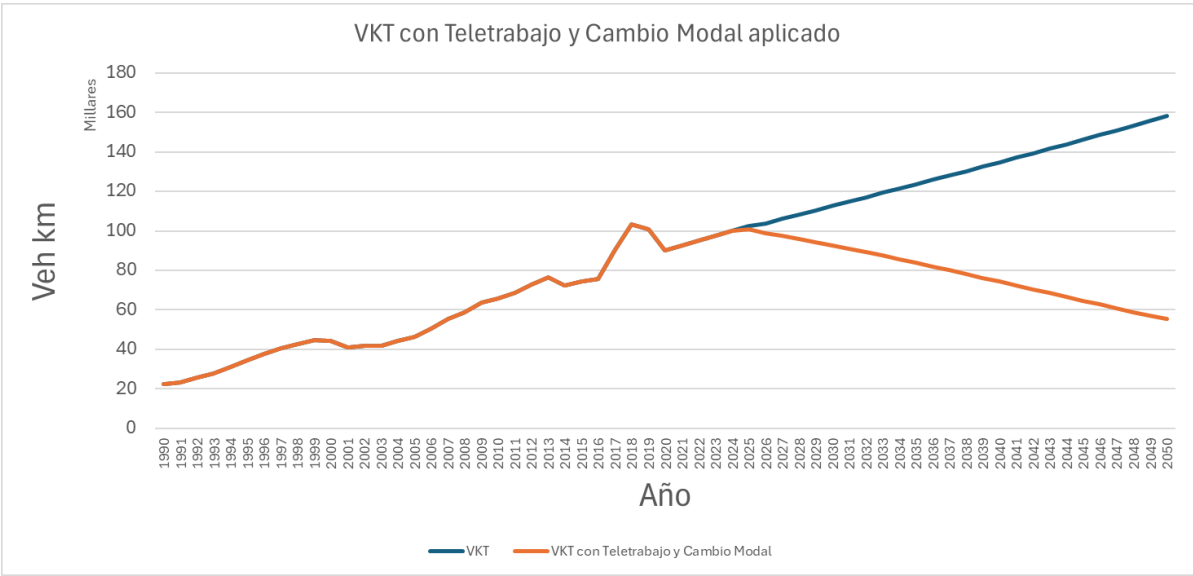


Figura 3 10 VKT tras aplicar Teletrabajo y Cambio Modal. Fuente: Elaboración propia.

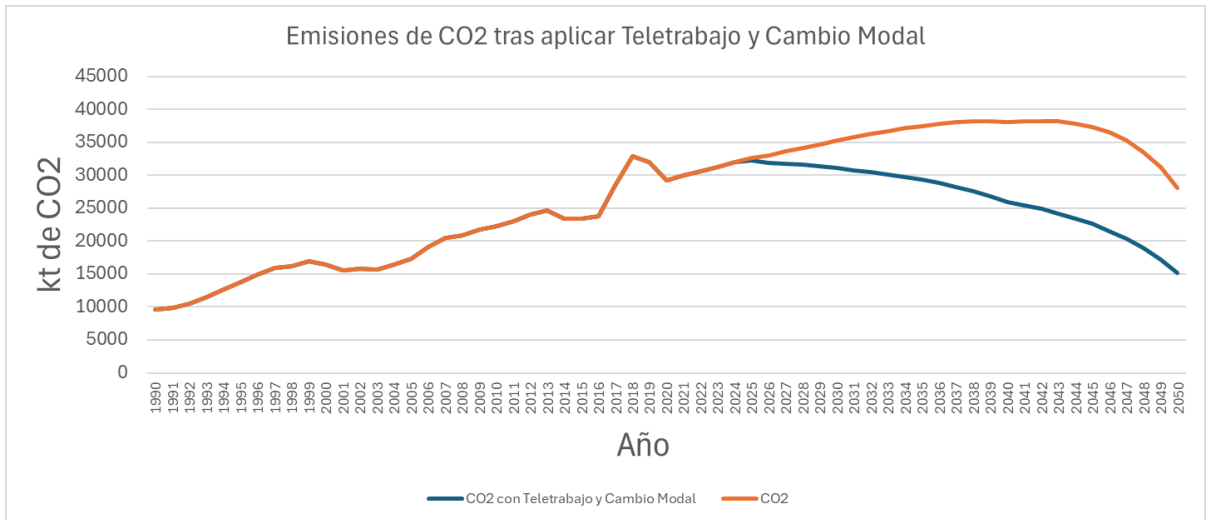


Figura 3 11 Emisiones de CO2 tras aplicar Teletrabajo y Cambio Modal. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Vehículo compartido

Para esta medida en particular se consideran dos apartados. Primero el reajuste de la Tabla 2-3 en la cual se aplica la ecuación (14), obteniéndose la Tabla 3-1 y 3-2 con el crecimiento anual del NA de VLP y VLC respectivamente en cada región. Para este también se consideran los supuestos planteados obteniéndose NA final, observable en el año 2050 de la Tabla 3-1 y 3-2. La tasa de crecimiento c permite el crecimiento acumulado sostenido hasta alcanzar el nivel de actividad del último año. El valor encontrado para que se cumpla esto es para un c de 10,08% aproximadamente.

En cuanto a la flota vehicular que se vería afectada por el decrecimiento descrito por la ecuación (15), la tasa de decrecimiento b encontrada para simular que en base a esta única medida se llega a la meta NDC de emisiones de CO2, resultó en 3,79% para VLP y 3,69% para VLC aproximadamente. En la Figura 3-12 se puede observar el comportamiento de la flota vehicular con esta medida aplicada y como las categorías VLP y VLC impactan drásticamente en la flota total al ser un gran porcentaje de esta misma. Cabe destacar que el porcentaje de disminución de flota respecto de la de referencia es bastante alto, 96% para VLP en 2050 y 93% para VLC en 2050, lo que no es una estimación muy realista considerando las herramientas y contextos actuales.

Se estima el nuevo VKT reajustado después de la aplicación de la medida con la ayuda de la ecuación (5) y se genera un gráfico como se observa en la Figura 3-13 sólo considerando el VKT de VLP y VLC que son los que sufrieron cambios. Se acerca a los casi 21.000 [veh km] con la aplicación de la medida, con un delta de alrededor de 104.000 [veh km] respecto al VKT de referencia para VLP y

VLC. La tendencia para este caso es una curva ascendente hasta alcanzar el punto de 121.000 [veh km] en la que luego desciende, lo que se puede traducir de manera que en un inicio tras aplicar la medida, la disminución de vehículos en tránsito no es tan marcada en comparación con la creciente actividad que empiezan a tener los vehículos destinados al servicio de vehículo compartido, lo que finalmente desde el año 2036 aproximadamente alcanza un peak y la reducción de la flota de VLP VLC llega a ser suficientemente considerable como para que la gran actividad vehicular que tienen los sobrantes merme el efecto de reducción de VKT. Finalmente se observa de la Figura 3-14 un comportamiento similar al del VKT evidentemente, se alcanza un peak de 42.500 [kt] en emisiones de CO2 debido a la creciente actividad vehicular, pero se ve neutralizada por la alta baja en la flota vehicular, alcanzando los niveles propuestos en post de la meta NDC.

Tabla 3 1 Nivel de actividad [km/año] para VLP reajustado. Fuente: Elaboración propia.

Región	LPV	Kilometros por año recorrido [km/año]							
		2025	2026	2027	2028	...	2048	2049	2050
I, XIV	8228	8310	9139	9969	10798	...	27381	28211	29040
II	13302	13435	14776	16116	17457	...	44267	45607	46948
III	14382	14526	15975	17425	18874	...	47861	49310	50759
IV	15241	15393	16929	18465	20001	...	50719	52255	53791
V	13986	14126	15535	16945	18354	...	46543	47952	49362
VI	12127	12248	13470	14692	15915	...	40357	41579	42801
VII	12582	12708	13976	15244	16512	...	41871	43139	44407
VIII	12390	12514	13763	15011	16260	...	41232	42480	43729
IX	13515	13650	15012	16374	17736	...	44976	46338	47700
X, XV	14494	14639	16100	17560	19021	...	48233	49694	51155
XI	12089	12210	13428	14646	15865	...	40230	41448	42667
XII	7284	7357	8091	8825	9559	...	24240	24974	25708
XIII	14956	15106	16613	18120	19627	...	49771	51278	52785
		1%	11%	21%	31%	...	233%	243%	253%

Tabla 3 2 Nivel de actividad [km/año] para VLC reajustado. Fuente: Elaboración propia.

Región	LCV	Kilometros por año recorrido [km/año]							
		2025	2026	2027	2028	...	2048	2049	2050
I, XIV	9873	9972	10967	11962	12957	...	32856	33851	34846
II	15962	16122	17730	19339	20947	...	53120	54728	56337
III	17259	17432	19171	20910	22650	...	57436	59175	60915
IV	18289	18472	20315	22158	24001	...	60864	62707	64550
V	16784	16952	18643	20335	22026	...	55855	57547	59238
VI	14552	14698	16164	17631	19097	...	48428	49894	51361
VII	15099	15250	16772	18293	19815	...	50248	51770	53291
VIII	14869	15018	16516	18015	19513	...	49482	50981	52479
IX	16217	16379	18013	19648	21282	...	53968	55603	57237
X, XV	17393	17567	19320	21073	22825	...	57882	59635	61388
XI	14507	14652	16114	17576	19038	...	48278	49740	51202
XII	8741	8828	9709	10590	11471	...	29089	29970	30851
XIII	17948	18127	19936	21745	23554	...	59729	61538	63347
		1%	11%	21%	31%	...	233%	243%	253%

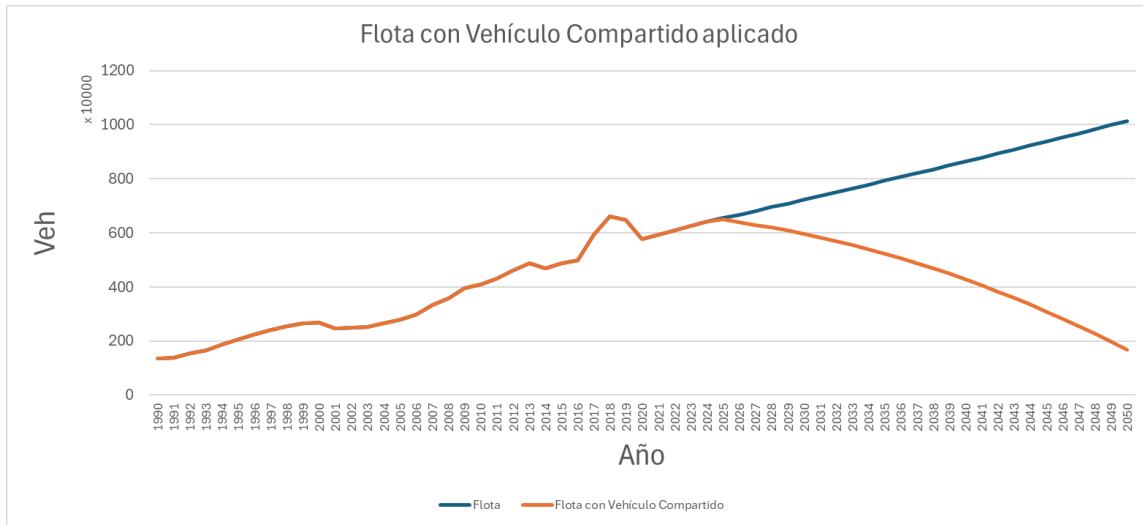


Figura 3 12 Flota vehicular tras aplicar Vehículo Compartido. Fuente: Elaboración propia.

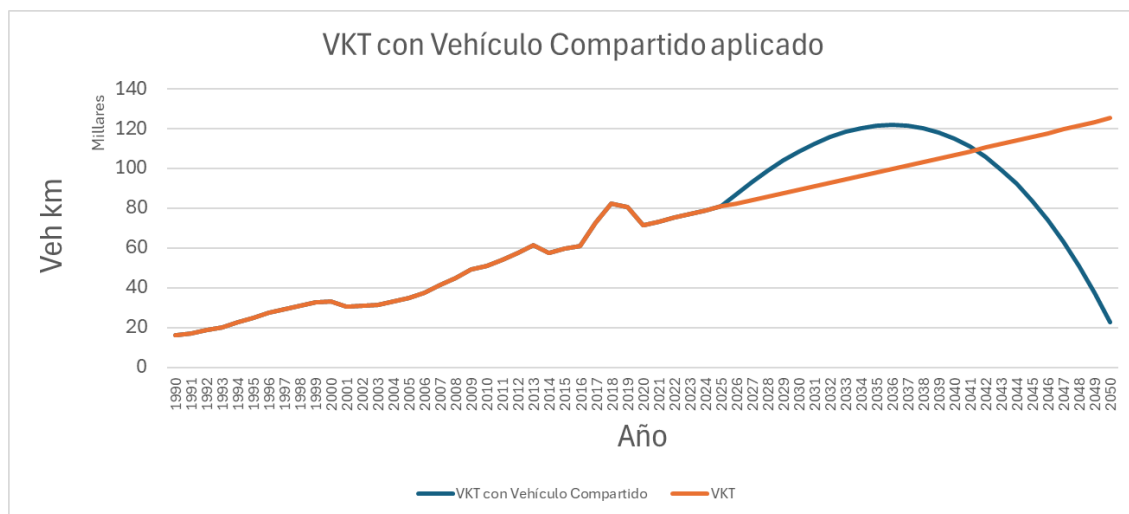


Figura 3 13 VKT para VLP y VLC tras aplicar Vehículo Compartido. Fuente: Elaboración propia.

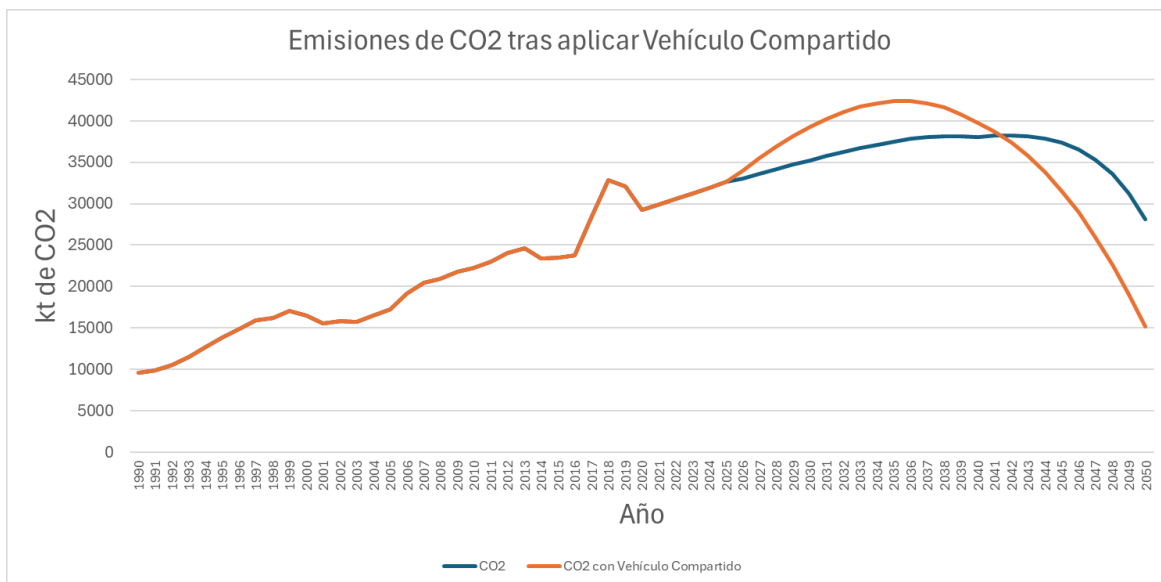


Figura 3.14 Emisiones de CO2 tras aplicar Vehículo Compartido. Fuente: Elaboración propia.

3.4. Resultados aplicación de todas las medidas no tecnológicas

Tras analizar el efecto que tendría cada medida de mitigación revisada en el apartado anterior, coinciden en resultados bastante complicados de llevar a cabo en la realidad y contexto del país, considerando también las capacidades realistas de gestión de los organismos administrativos y comportamiento de la sociedad. Es por esta razón que para acercarse más a la realidad es que hay que considerar que cada una de las medidas propuestas tendrían que actuar simultáneamente y compenetrarse entre ellas para lograr el efecto que se espera de acuerdo a las metas medioambientales fijadas respecto a emisiones contaminantes.

Las tasas específicas de cada medida llegaron a números menos agresivos, al necesitar menos inserción por parte de cada medida para lograr la meta vista en el escenario NDC, pero se genera una especie de conflicto con el aporte de la medida de vehículo compartido. Para la tasa t asociada al teletrabajo, se llegó a un resultado de 1,6% aproximadamente, mismo valor que se mantiene al combinarse con cambio modal en el apartado 3.2. Sumada a una tasa u definida para cambio modal de aproximadamente un 2,57%, valor muy similar al visto en el apartado mencionado anteriormente. Esto debido al impacto de la medida vehículo compartido el cual recién al llegar a valores de b de 3% para VLP y un 2,8% para VLC, se ven resultados para las emisiones de CO2 menores que en el

escenario de referencia. Se puede inferir que este comportamiento se debe a que en los primeros años tras aplicar la medida de vehículo compartido, el kilometraje anual de los vehículos destinados a este servicio aumenta sostenida y considerablemente como se vio en las tablas 3-1 y 3-2, en comparación con la flota que decrece a un ritmo menos agresivo, generándose un alza en el VKT superando los números vistos en el escenario de referencia. Esta alza se detiene recién en el año 2037 aproximadamente como se ve en la Figura 4-2, visto como emisiones de CO₂, y comienzan a disminuir los niveles de VKT hasta superar a la baja al escenario de referencia en el año 2048. Indicando que a 2050 alrededor del 76% de vehículos VLP y un 71% de vehículos VLC se verían reducidos respecto del escenario de referencia para ese mismo año. Son cifras algo más aterrizadas a la realidad basándose en las capacidades del país de penetrar con esta medida en particular en comparación con los resultados del apartado 3.3, pero sigue siendo una gran cifra difícil de visualizar por el momento respecto a la baja de la flota de vehículos livianos de pasajeros y comerciales. Se recomienda, debido al comportamiento del VKT con la medida vehículo compartido, mantener los valores de los índices para teletrabajo y cambio modal encontrados en el apartado 3.2 sin incentivar el aumento de la actividad vehicular que conlleva la medida vehículo compartido como se plantea en esta investigación. Una opción viable por rescatar de este resultado es que la actividad vehicular que aumenta al aplicar servicios de carsharing, no tenga un crecimiento tan agresivo como la jornada laboral completa simulada en este trabajo, si no que el decrecimiento de la flota esté más a la par con este. El teletrabajo y el cambio modal aportan significativamente a este efecto combinadas entre sí.

A continuación, se presenta la Figura 4-1 y 4-2 que permiten visualizar el comportamiento que tendría el VKT y las emisiones de CO₂ al actuar las medidas no tecnológicas revisadas en el apartado de metodología de esta investigación.

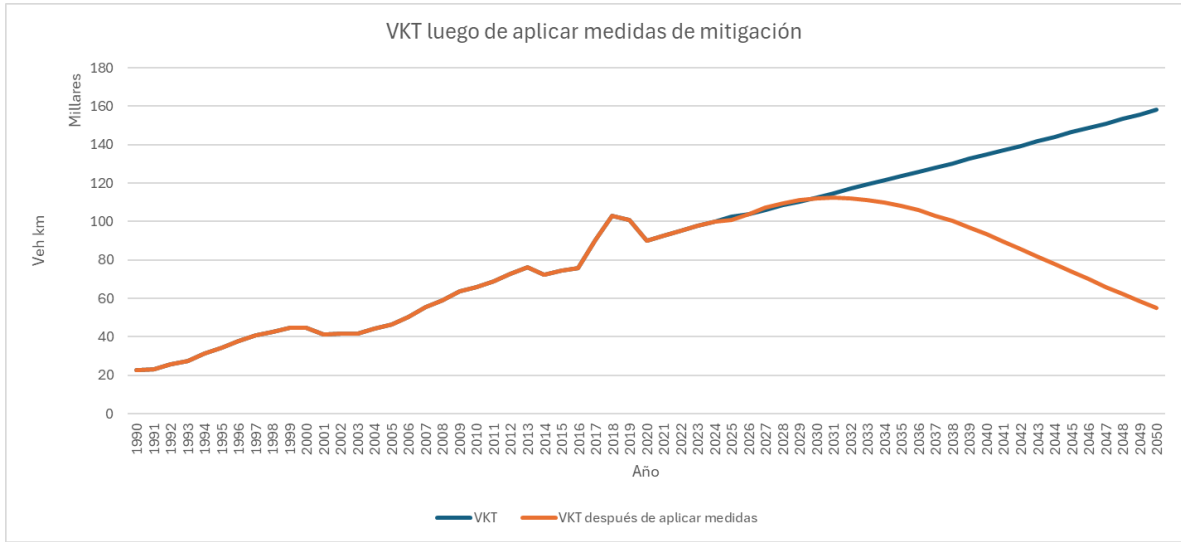


Figura 4.1 Efecto que tendría la aplicación de las medidas de mitigación no tecnológicas en el VKT de referencia. Fuente: Elaboración Propia.

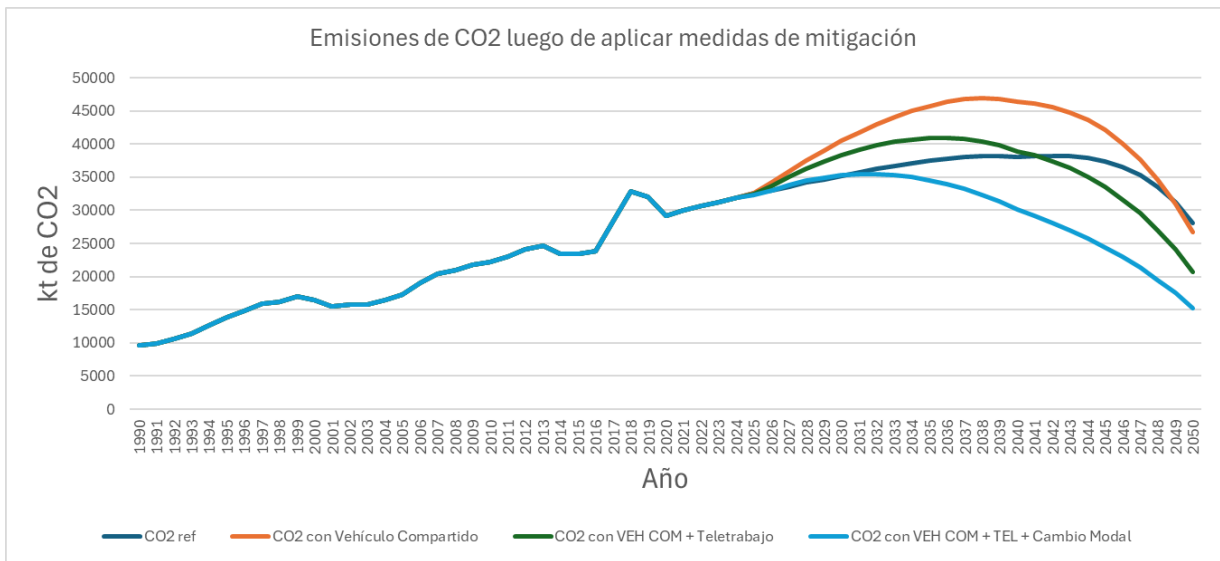


Figura 4.2 Efecto que tendría la aplicación de las medidas de mitigación no tecnológicas en las emisiones de CO2 de referencia. Fuente: Elaboración propia.

3.5. Conclusiones del capítulo

Se pudo apreciar como cada medida por separado, considerando un crecimiento de la electromovilidad basada en el escenario de referencia, requería de una importante y considerable inserción, sobre todo para el caso de vehículo compartido. Esto era de esperarse de cierta manera al

no ser tan apegado a la realidad en la cual los organismos impulsan todas las medidas de mitigación simultáneas al tratarse de alcanzar una meta tan ambiciosa. Luego, al combinarse sus efectos como se esperaría que ocurriese realmente, los índices asociados a cada una de las medidas obtienen valores más acercados a la realidad, lo que culminaría en mayor exactitud del pronóstico si se incluyeran aún más simulaciones de más medidas de mitigación planteadas en el programa nacional.

4. Conclusiones y recomendaciones

4.1. Conclusiones generales

La problemática que surge con las elevadas y crecientes cifras de emisiones contaminantes como los gases de efecto invernadero, consecuente de esto la amenaza de la elevación de la temperatura global la cual está y estará generando grandes cambios climáticos importantes y amenazantes para el normal funcionamiento del planeta y sus ecosistemas, llevó a las naciones del mundo a tomar acción en busca de revertir o apaciguar lo mayor posible el impacto que generaría a gran escala y perturbaría la vida como se conoce, fijándose como meta la carbono neutralidad. La industria es un protagonista bastante relevante en el origen de este problema y dentro de esas las relacionadas con el uso de energía, para efectos de este trabajo la energía utilizada en el transporte.

Se comienzan diferentes proyectos a pequeña, mediana y gran escala en todas las industrias y estados de las naciones, y lo que respecta a la industria del transporte es que se plantean diferentes medidas para mitigar estas emisiones contaminantes. Al revisar la literatura y programas de organismos gubernamentales, se encuentran distintos proyectos de medidas ya implementadas y a implementar. A grandes rasgos se ataca a la tecnología con la que los vehículos hasta el momento utilizaban para transformar energía en su movimiento, normas mundiales que definen y estandarizan ciertos límites respecto a las emisiones permitidas en las flotas emergentes al tratarse de vehículos de combustión interna. Ya más en la actualidad, han surgido otros tipos de tecnologías que eliminarían completamente las emisiones conocidas hasta la fecha, como son la electrificación de los vehículos y el uso de hidrógeno como combustible. Dentro de las distintas medidas también se encuentran el cambio modal con el fin de llevar el uso de transporte particular al uso de transporte público con una flota regulada y adaptada a la tecnología cero emisiones. También incentivar la micromovilidad como el uso de bicicletas, scooters o diversos medios de transportes no motorizados que incluso fomentan el cuidado de la salud de los pasajeros al ser de participación activa. Sumándose a esto, otras

iniciativas como la práctica de compartir vehículo entre pasajeros con destinos similares o limitar el uso del vehículo particular para aumentar el de unos pocos destinados al servicio del transporte particular.

Lo anterior tiene que ir de la mano con una estructura bien diseñada e implementada para que se pueda llevar a cabo sin afectar el estilo de vida que ya se lleva para las personas. Tener una red de carga suficiente y que abarque a todo el país. La correcta capacitación que genere nuevos trabajos que permitan mantener los nuevos activos de tecnología cero emisiones en óptimas y seguras condiciones.

Algunas de estas propuestas revisadas en la literatura fueron puestas a prueba mediante una simulación la cual da una idea más o menos alentadora de lo que se tendría que realizar de aquí a 2050 y con que tanto ímpetu.

4.2. Conclusiones específicas

1. Se puede vislumbrar la potente influencia del sector transporte en términos de contribuciones en contaminantes atmosféricos, y a su vez la alta participación en la lucha por mitigar estos mismos. Son varios los proyectos impulsados y por impulsar aún que están cuidadosamente diseñados para mitigar las emisiones contaminantes de los vehículos terrestres, revisados tanto en la ECLP, en la estrategia nacional de electromovilidad, estrategia de instrumentos económicos, plan nacional de eficiencia energética, agenda de energía, plan de mitigación GEI, etc. Entre estos se cuentan con medidas tecnológicas y de energía como lo son la electromovilidad y el hidrógeno verde, de carácter regulatorio y culturales como incentivos económicos varios, promover el cambio modal, la disminución de actividad vehicular compartiendo vehículo para viajes en común o el teletrabajo, todo esto de la mano con una optimización de la infraestructura de las ciudades del país a fin de recibir estos cambios de la mejor manera posible y permitir su viabilidad. Lo anterior siguiendo el lineamiento que promueve lo revisado en el Acuerdo París, enfocándose en la metodología y plazos correspondientes para cada proyecto por sí solo y en conjunto, consiguiendo finalmente una reducción considerable de emisiones contaminantes, y en el mejor de los escenarios, alcanzar la meta de carbono neutralidad. El impacto que tendría la correcta y acelerada aplicación de todos estos proyectos, según sus propios pronósticos, nos llevaría a este escenario tan codiciado por la sociedad.

2. Con la ayuda de un programa especializado en calcular la actividad vehicular y emisiones históricas y proyectadas, se logra simular el comportamiento de ambos factores mencionados para el 2050. Dando resultados basados en un escenario de referencia que se logró hasta el 2020 y compararlo con un escenario carbono neutral basado en metas fijadas por la NDC para cumplir con los requerimientos ambientales para 2050. Una vez obtenidos estos datos, se proponen métodos específicos que propician la simulación de los efectos de cada una de las medidas propuestas con anterioridad, enfocadas principalmente en alterar la actividad vehicular de cada categoría bajo ciertos parámetros característicos. Son bases de datos muy grandes y que recopilan información estimada, por lo que esto tiene una tendencia bastante general y no ataca vehículo por vehículo y su actuar diario, si no que engloba un comportamiento en conjunto de cada categoría basada en la medida de mitigación en cuestión. El estudio dará hincapié en las medidas de aplicación de electromovilidad y el crecimiento de su flota en el país, aplicación de teletrabajo masificado, incentivo acelerado del cambio modal e incentivo del proyecto de vehículo compartido.
3. Se pudo apreciar como cada medida por separado, considerando un crecimiento de la electromovilidad basada en el escenario de referencia, requería de una importante y considerable inserción, sobre todo para el caso de vehículo compartido. Esto era de esperarse de cierta manera al no ser tan apegado a la realidad en la cual los organismos impulsan todas las medidas de mitigación simultaneas al tratarse de alcanzar una meta tan ambiciosa. Luego, al combinarse sus efectos como se esperaría que ocurriese realmente, los índices asociados a cada una de las medidas obtienen valores más acercados a la realidad, lo que culminaría en mayor exactitud del pronóstico si se incluyeran aún más simulaciones de más medidas de mitigación planteadas en el programa nacional. De lo resultados se puede concluir que cada medida no tecnológica por separado necesitaría de una participación excesiva hablando en términos realistas o más bien algo inalcanzables para el contexto actual y como se esperaría su evolución en el tiempo. Al basarse en la planificación y metas que tiene la NDC en lo que respecta a la electromovilidad, se simuló la penetración de esta misma que tendría que tener cada año para llegar a los números, lo que resultó en un determinado número de emisiones de CO₂ y otros contaminantes a 2050. Fijándose esta meta en términos de emisiones es que se buscó alcanzarlas con las medidas no tecnológicas, que como se mencionó, por separado requeriría demasiada inserción de cada una, siendo poco alentador el resultado. Caso contrario ocurre al sumar los efectos que tendrían cada una acercándose más a la realidad debido a la presencia que tienen estos proyectos en el país. Así es como se esperaría, cerca de casi un 70% de la flota particular disminuiría drásticamente su actividad vehicular y se

incentivaría bastante el uso de transporte público y otros medios no contaminantes, lográndose la meta NDC a costa de esta gran baja. Si a esto se le suma la presencia de la electromovilidad acelerada antes mencionada, se podría tener un gran control de las emisiones, incluso acercándose bastante y quizás hasta superar las bajas emisiones que se tenían en los primeros años de estudio revisados.

4.3. Recomendaciones

Se concluye que, si se llegase a seguir a cabalidad lo impuesto por los organismos que luchan para alcanzar la carbono neutralidad, las emisiones contaminantes se verían mermadas en un alto porcentaje, pero sin alcanzar la totalidad. La flota si no llegase a alcanzar un alta baja en su actividad vehicular habría que instaurar o diseñar medidas aún más impactantes y estrictas en el control de emisiones, habría que incentivar aún más la participación ciudadana y de la industria. También poner foco en soluciones menos impactantes pero que en conjunto permitan disminuir las emisiones controladas con las medidas ya vistas, sea atacando directamente la actividad vehicular o bien que la actividad vehicular inminente sea controlada en tiempos de exposición como ocurriría al proponer el cambio en la congestión vehicular. Se termina por recomendar incorporar medidas disruptivas y de innovación que incorporen todas las nuevas tecnologías en pos de alcanzar la mitigación casi absoluta o idealmente absoluta. Un ejemplo de esto se puede revisar en el documento “Sustainable Traffic Management for Smart Cities Using Internet-of-Things-Oriented Intelligent Transportation Systems (ITS): Challenges and Recommendations” de la editorial de revistas científicas MDPI , que plantea el uso de la inteligencia artificial para una regulación óptima del tráfico vehicular y así hay menos tiempos excesivos de exposición a contaminantes producto de la combustión en transporte.

Como última y no menos importante recomendación, ampliar la simulación vista incluyendo una estimación del impacto por separado y en conjunto, de las sobrantes medidas de mitigación revisadas en la literatura, aunque se proyecten con menor impacto, en un período más largo de tiempo pueden influir en resultados bastante más positivos que los vistos. Y no está demás recalcar que a la hora de la verdad, todos los proyectos revisados tendrán que implementarse, idealmente con el énfasis que se propone en este trabajo como línea base, así la incorporación del resto de medidas habrá superado el límite mínimo para asegurarnos un futuro carbono neutral desde una mirada del sector transporte en energía.

Referencias

- [1] C. C. L. D. M. G. H. G. L. G. D. .. & V.-S. A. Benavides, «Opciones para lograr la carbono-neutralidad en Chile.,» 2021. [En línea]. Available: <https://shs.hal.science/halshs-03410019/>.
- [2] IPCC, «Comunicado de prensa del IPCC.,» 2021. [En línea]. Available: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release-Final_es.pdf.
- [3] Ministerio del Medio Ambiente - Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero, «Sector Energía.,» 2022. [En línea]. Available: <https://snichile.mma.gob.cl/sector-energia/>.
- [4] A. De Vicente, «Sector de transporte en Chile es responsable del 25,5% de las emisiones de GEI del país ¿Cómo aminorar estas cifras?,» 13 junio 2022. [En línea]. Available: <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2022/06/sector-transportes-gases-efecto-invernadero>.
- [5] Ministerio del Medio Ambiente, «Planes de Descontaminación Atmosférica.,» junio 19 2023. [En línea]. Available: <https://ppda.mma.gob.cl/>.
- [6] Organización Marítima Internacional (OMI), «El organismo marítimo de Naciones Unidas adopta una estrategia para combatir el cambio climático en el sector.,» 13 abril 2018. [En línea]. Available: <https://www.imo.org/es/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx>.
- [7] Unite States Environmental Protection Agency, «Routes to Lower Greenhouse Gas Emissions Transportation Future.,» 8 marzo 2023. [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/greenvehicles/routes-lower-greenhouse-gas-emissions-transportation-future>.

- [8] United States Environmental Protection Agency, «Regulations for Emissions from Vehicles and Engines. Proposed Rule: Multi-Pollutant Emissions Standards for Model Years 2027 and Later Light-Duty and Medium-Duty Vehicles,» 26 junio 2023. [En línea]. Available: <https://www.epa.gov/regulations-emissions-vehicles-and-engines/proposed-rule-multi-pollutant-emissions-standards-model>.
- [9] Ministerio del Medio Ambiente, «Emisiones de Gases de Efecto Invernadero,» 2019. [En línea]. Available: <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/emisiones/>.
- [10] Global Carbon Project, «Supplemental data of Global Carbon Budget 2022 (Version 1.0) [Data set]. Global Carbon Project.,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.icos-cp.eu/science-and-impact/global-carbon-budget/2022>.
- [11] Red de periodistas digitales, «Emisiones globales de gases de efecto invernadero por sector,» 24 diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://latitud435.com/2020/12/infografia-emisiones-globales-de-gases-de-efecto-invernadero-por-sector/>.
- [12] «Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, 1990-2020: Resumen de Puntos clave,» División de Cambio Climático Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, 2022.
- [13] SEPA, «Descripción general de los gases de efecto invernadero,» 7 Junio 2023. [En línea]. Available: <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/descripcion-general-de-los-gases-de-efecto-invernadero>.
- [14] Carbonneutralplus, «¿Qué es y cómo alcanzar la carbono neutralidad?,» 27 Febrero 2023. [En línea]. Available: <https://www.carbonneutralplus.com/que-es-la-carbono-neutralidad/>.
- [15] Enel X Argentina S.A.U, «4 puntos clave para lograr la carbono neutralidad,» 2023. [En línea]. Available: <https://www.enelx.com/ar/es/historias/4-puntos-clave-para-lograr-la-carbono-neutralidad>.

- [16] A. Moseman y S. Paltsev, «Are electric vehicles definitely better for the climate than gas-powered cars?,» 13 octubre 2022. [En línea]. Available: <https://climate.mit.edu/ask-mit/are-electric-vehicles-definitely-better-climate-gas-powered-cars>.
- [17] C. S. J. P. S. A. G. M. J. G. R. & M. C. Barría, « Carbono Neutralidad en el sector Energía.,» 2020. [En línea]. Available: <http://54.148.75.48/handle/123456789/3822>.
- [18] R. Martínez y K. Basoa, «Informe del Inventario Nacional de Chile 2022: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile 1990-2020,» Departamento de Mitigación y Transparencia División de Cambio Climático Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, 2023.
- [19] Ministerio del Medio Ambiente. (2021, 21 de octubre). Estrategia Climática de Largo Plazo de Chile. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/11/ECLP-LIVIANO.pdf>.
- [20] Ministerio de Energía. (2021, octubre). Estrategia Nacional de Electromovilidad. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_nacional_de_electromovilidad_2021_0.pdf
- [21] Ministerio de Energía. (2022, enero). Estrategia de Instrumentos Económicos para la Transición Energética. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_instrumentos_economicos.pdf
- [22] Ministerio de Energía. (2021, noviembre). Plan Nacional de Eficiencia Energética 2022-2026. https://energia.gob.cl/sites/default/files/eficiencia-energetica_16-nov.pdf
- [23] Ministerio de Energía. (2022, agosto). Agenda de Energía 2022-2026. https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/agenda_energia_2022_-_2026.pdf
- [24] Ministerio del Medio Ambiente. (2022). 5to Informe Bienal de Actualización ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2022/12/Informe_5IBA_2022.pdf
- [25] Ministerio de Energía. (2017, diciembre). Plan de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero para el Sector Energía. <https://www.energia.gob.cl/sites/default/files/plan-mitigacion-gei-sector-energia-2017.pdf>

[26] Ministerio de Vivienda y Urbanismo, Ministerio del Medio Ambiente. (2021, noviembre). Plan de Adaptación al Cambio Climático para Ciudades 2018-2022. <https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/11/Plan-de-Adaptacion-Cambio-Climatico-para-Ciudades-2018-2022.pdf>

[27] Jiménez, M. (2024). Modelo de Cálculo de Emisiones Vehiculares con Desagregación Espacial para Chile en el Período 1990-2020. [Tesis Ingeniería Civil Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María]. Repositorio USM.

[28] European Environment Agency, «Methodology for the calculation of exhaust emissions –SNAPs 070100-070500, NFRs 1A3bi-iv,» Bruselas, 2020.

[29] Instituto Nacional de Estadísticas, «Permisos de circulación,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/transporte-y-comunicaciones/permiso-de-circulacion>.

[30] M. Osses, N. Rojas, C. Ibarra y a. et, «High-resolution spatial-distribution maps of road transport exhaust emissions in Chile, 1990–2020,» *Earth Syst. Sci. Data*,, vol. 14, pp. 1359-1376, 2022.