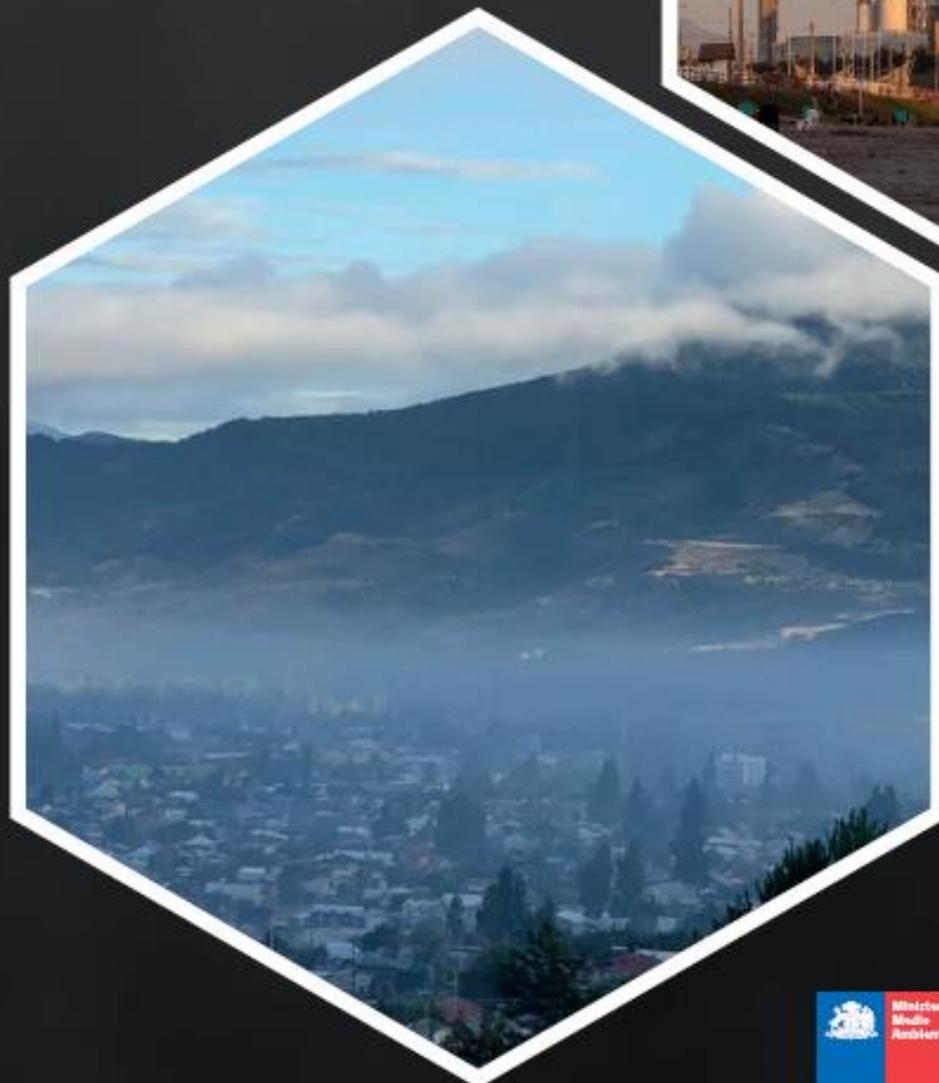


# Mitigación de carbono negro en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile

(CR)<sup>2</sup> | Center for Climate  
and Resilience Research

**Informe extendido**



Santiago, enero de 2020

## PRESENTACIÓN

---

En el contexto del Acuerdo de París, Chile está revisando su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por sus siglas en inglés). Bajo ese marco, el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2, <http://www.cr2.cl/>), de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, está apoyando a la Oficina de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente (MMA) en el diseño, evaluación y justificación —mediante la implementación de un enfoque metodológico— de una meta de reducción cuantificada de carbono negro (BC, por sus siglas en inglés), integrable y consistente con la meta de reducción de gases de efecto invernadero (GEI). Para ejecutar este apoyo se ha suscrito un acuerdo entre las partes a través del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). El mismo está en el marco de la implementación de iniciativas de acción y planificación nacional (*Supporting National Action and Planning on Short-Lived Climate Pollutants*, SNAP) que promueve la Coalición de Aire Limpio y Clima (CCAC, <https://www.ccacoalition.org/>).

Aquí se presenta un informe extendido y anexos que complementan el resumen para tomadores de decisiones.

---

### Citar como:

Gallardo, L., Basoa, K., Tolvett, S., Osses, M., Huneus, N., Bustos, S., Barraza, J., Ogaz, G. (editores) (2020), Mitigación de carbono negro en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile: Informe extendido y anexos. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia para el Ministerio del Medio Ambiente a través de Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la iniciativa *Supporting National Action and Planning on Short-Lived Climate Pollutants* (SNAP), 116 pp. Disponible en: <http://www.cr2.cl/carbononegro/>

## **Equipos responsables**

### **a) *Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia***

- Laura Gallardo (Directora de Proyecto), Profesora Titular, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Investigadora Principal
- Sebastián Tolvett (Director Alternativo de Proyecto), Académico Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica Metropolitana, Investigador Adjunto
- Kevin Basoa (Investigador), Ingeniero de Proyecto, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Tecnológica Metropolitana, Ingeniero
- Nicolás Huneeus (Investigador), Profesor Asistente, Departamento de Geofísica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, Investigador Asociado
- Mauricio Osses (Investigador), Académico del Departamento Ingeniería Mecánica, Universidad Técnica Federico Santa María, Investigador Adjunto
- Susana Bustos, Ingeniera civil industrial (Gestión de proyectos)
- José Barraza, periodista (Divulgación)
- Giselle Ogaz, diseñadora gráfica (Diseño)

El equipo cuenta con el apoyo científico de Luisa T. Molina, *Molina Center for Energy and the Environment* (<http://www.mce2.org/es>) en calidad de asesora externa.

### **b) *Oficina de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente***

- Jenny Mager, encargada de Mitigación e Inventarios
- Bruno Campos, profesional de Mitigación e Inventarios
- Richard Martínez, profesional de Mitigación e Inventarios
- Carmen G. Contreras, de Mitigación e Inventarios

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Presentación	ii
Equipos responsables	iii
a) Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia	iii
b) Oficina de Cambio Climático del Ministerio del Medio Ambiente	iii
Índice de contenidos	iv
Índice de figuras	vi
Índice de tablas	x
Resumen ejecutivo	1
Executive summary	2
I. Introducción	3
1) Carbono negro y sus impactos	4
2) Fuentes de carbono negro	6
II. Aproximación metodológica	9
1) Revisión de antecedentes y determinación de sectores relevantes	9
2) Herramienta de proyección de escenarios y evaluación de impactos	10
a) Herramienta para escenarios y proyecciones	10
b) Herramienta para evaluación de impactos	11
3) Construcción de escenarios y proyecciones de emisiones	14
4) Monitoreo, reporte y verificación	14
5) Interacción y colaboración entre las partes	14
III. Resultados	15
1) Emisiones para el año 2016	15
2) Escenarios de mitigación	20
a) Escenario de políticas actuales	20
b) Escenario de “carbono neutralidad”	20
c) Escenario de “carbono neutralidad +”	20
3) Consumos energéticos sectoriales	21
a) Aéreo	21
b) Comercial	22
c) Consumo Propio	25
d) Industria	26

e)	Maquinaria Fuera de Ruta (MFR).....	39
f)	Marítimo .....	43
g)	Minería.....	44
h)	Consumos motrices de la gran minería.....	51
i)	Público .....	53
j)	Residencial.....	56
k)	Transporte .....	67
l)	Generación de Electricidad (GE).....	68
4)	Cálculo de emisiones y factores de emisión.....	70
a)	Transporte .....	70
b)	Leña Residencial.....	70
c)	Generación Eléctrica.....	72
d)	Factores de emisión .....	72
5)	Proyecciones de emisiones de carbono negro .....	73
a)	Escenario de políticas actuales .....	73
a)	Escenario de carbono neutralidad .....	76
b)	Escenario de carbono neutralidad +.....	79
6)	Proyecciones de emisiones de trazas coemitidas .....	80
7)	Sobre impactos en mortalidad .....	83
IV.	Medición, Reporte y Verificación (MRV) .....	84
1)	Elementos clave de marco MRV a nivel internacional .....	86
a)	Medición .....	86
b)	Reporte.....	86
c)	Verificación .....	87
2)	Elementos clave de los arreglos domésticos institucionales de MRV .....	87
3)	Aplicación de MRV en Chile .....	87
4)	Medidas adicionales de seguimiento.....	88
a)	MRV para el sector transporte .....	88
b)	MRV para maquinaria fuera de ruta .....	88
c)	Inventarios de emisiones de alta resolución.....	88
d)	Mediciones de carbono negro y trazas afines .....	88
e)	Seguimiento integral de medidas y políticas .....	89
V.	Interacción entre las partes .....	90

1) Visita de Luisa T. Molina.....	90
2) Visita de Elsa Lefèvre y Chris Malley .....	90
3) Seminario de presentación de resultados.....	91
VI. Conclusiones y recomendaciones.....	93
Referencias	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Imágenes de microscopía electrónica de transmisión de partículas de aerosoles atmosféricos. A la izquierda (A) una imagen de carbono marrón (Brown carbon, BrC) y, a la derecha (B), un agregado de esférulas de carbono negro en forma de cadena. Extraído desde Alexander et al., (2008). .....	5
Figura 3. Esquema de los múltiples impactos asociados al carbono negro. La figura se basa en una análoga presentada por la Coalición del Aire Limpio y el Clima ( <a href="https://www.ccacoalition.org/en/slcp/black-carbon">https://www.ccacoalition.org/en/slcp/black-carbon</a> ). .....	6
Figura 4. Evolución de las emisiones globales de carbono orgánico (OC) y carbono negro (BC) por sectores entre los años 1750 y 2014. También se indica la evolución según otros inventarios globales, incluyendo el usado en las simulaciones climáticas presentadas en (Stocker et al., 2013). La figura se adaptó a partir de (Hoesly et al., 2018). .....	7
Figura 5 Muestra de la interfaz LEAP usado en este estudio (Versión 2018.1.23). .....	12
Figura 6. Participación relativa de los diferentes sectores para las emisiones de CO <sub>2eq</sub> (panel superior) y BC (panel inferior) para el año 2016. El total de emisiones de CO <sub>2eq</sub> y BC para el año 2016 corresponden a 75 Mton de CO <sub>2eq</sub> y 10 kton de BC, excluyendo los sectores: aéreo, marítimo y MFR con potencias superiores a 560 kW. ....	16
Figura 7. Distribución espacial sobre el territorio continental de Chile de las emisiones de carbono negro y/o material particulado completamente respirable para el año 2016 con una resolución espacial de 1 km <sup>2</sup> . A la izquierda se presenta el sector transporte y, a la derecha, el sector residencial. Mientras el primero refleja la distribución caminera y la densidad de flujos vehiculares, el segundo sigue la distribución de la población y, en primer orden, el uso de leña en la zona central y sur de Chile. Esta distribución es un producto desarrollado por Nicolás Huneeus et al. Los flujos de emisiones, sumados sobre todo el territorio, corresponden a las sumas anuales de emisiones de los sectores transporte y residencial indicados en la Tabla 2. ....	19
Figura 8 Consumo energético anual del sector aéreo en Tcal. Se considera el mismo para todos los escenarios pues no se contemplan medidas de mitigación. ....	22
Figura 9 Consumo energético del sector comercial para los tres escenarios. ....	23
Figura 10 Evolución del uso porcentual de los energéticos para el sector comercial en el escenario políticas actuales. ....	23
Figura 11 Evolución del uso porcentual de los energéticos para el sector comercial en el escenario de “carbono neutralidad”. ....	24
Figura 12 Consumo energético (en Tcal/a) del sector consumo propio para los tres escenarios. ....	25

Figura 13 Evolución del consumo porcentual de los energéticos para el sector consumo propio en los tres escenarios. ....	25
Figura 14 Consumo energético del sector industria para los tres escenarios. ....	27
Figura 15 Evolución de los energéticos para el subsector azúcar en el escenario políticas actuales. ....	27
Figura 16 Evolución de los energéticos para el subsector azúcar en el escenario carbono neutralidad. ....	28
Figura 17 Evolución de los energéticos para el subsector cemento en el escenario políticas actuales. ....	29
Figura 18 Evolución de los energéticos para el subsector cemento en el escenario carbono neutralidad. ....	29
Figura 19 Evolución de los energéticos para el subsector industrias varias en el escenario políticas actuales. ....	30
Figura 20 Evolución de los energéticos para el subsector industrias varias en el escenario de carbono neutralidad. ....	31
Figura 21 Evolución de los energéticos para el subsector papel y celulosa en el escenario políticas actuales. ....	32
Figura 22 Evolución de los energéticos para el subsector papel y celulosa en el escenario carbono neutralidad. ....	32
Figura 23 Evolución de los energéticos para el subsector pesca en el escenario políticas actuales. ....	33
Figura 24 Evolución de los energéticos para el subsector pesca en el escenario carbono neutralidad. ....	34
Figura 25 Evolución de los energéticos para el subsector petroquímica en el escenario políticas actuales. ....	35
Figura 26 Evolución de los energéticos para el subsector petroquímica en el escenario carbono neutralidad. ....	35
Figura 27 Evolución de los energéticos para el subsector siderurgia en el escenario políticas actuales. ....	36
Figura 28 Evolución de los energéticos para el subsector siderurgia en el escenario carbono neutralidad. ....	36
Figura 29 Comparación de los escenarios oficiales y reconstruidos para la estimación del sector maquinaria fuera de ruta. ....	38
Figura 30 Consumos energéticos por usos motrices en base a diésel. ....	38
Figura 31 Emisiones estimadas por GEASUR (2014) y regresiones para cada traza. ....	40
Figura 32 Maquinarias totales en Chile para el periodo 2013 – 2026 (MMA, 2016). ....	42
Figura 33 Comparación de las emisiones de CO <sub>2</sub> entre los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad y las estimaciones de GEASUR (2014). ....	42
Figura 34 Consumo energético del sector marítimo para los tres escenarios. ....	43
Figura 35 Consumo energético del sector minería para los tres escenarios. ....	44
Figura 36 Evolución de los energéticos para el subsector cobre en el escenario políticas actuales. ....	45
Figura 37 Evolución de los energéticos para el subsector cobre en el escenario carbono neutralidad. ....	45
Figura 38 Evolución de los energéticos para el subsector hierro en el escenario carbono neutralidad. ....	46

Figura 39 Evolución de los energéticos para el subsector hierro en el escenario carbono neutralidad. ....	47
Figura 40 Evolución de los energéticos para el subsector minas varias en el escenario carbono neutralidad. ....	48
Figura 41 Evolución de los energéticos para el subsector minas varias en el escenario carbono neutralidad. ....	48
Figura 42 Evolución de los energéticos para el subsector salitre en el escenario carbono neutralidad. ....	49
Figura 43 Evolución de los energéticos para el subsector salitre en el escenario carbono neutralidad. ....	50
Figura 44 Consumo energético por usos motrices en el sector minería para los tres escenarios. ....	51
Figura 44 Consumos energéticos de diésel por usos motrices para los sectores industria, minería y cobre para los escenarios políticas actuales (izquierda) y carbono neutralidad (derecha). ....	52
Figura 46 Emisiones de BC producto del sector MFR y la MFR de la subcategoría cobre para el escenario políticas actuales. ....	53
Figura 47 Emisiones de BC producto del sector MFR y la MFR de la subcategoría cobre para el escenario carbono neutralidad. ....	53
Figura 48 Consumo energético del sector público para los tres escenarios. ....	54
Figura 49 Evolución de los energéticos para el sector público en el escenario políticas actuales. ....	54
Figura 50 Evolución de los energéticos para el sector público en el escenario carbono neutralidad. ....	55
Figura 51 Consumo energético de la subcategoría ACS para los tres escenarios. ....	56
Figura 52 Evolución de los energéticos para la subcategoría ACS en el escenario políticas actuales. ....	57
Figura 53 Evolución de los energéticos para la subcategoría ACS en el escenario carbono neutralidad. ....	57
Figura 54 Consumo energético de la subcategoría artefactos para los tres escenarios. ....	58
Figura 55 Consumo energético de la subcategoría cocina para los tres escenarios. ....	58
Figura 56 Evolución de los energéticos para la subcategoría cocina en el escenario políticas actuales. ....	59
Figura 57 Evolución de los energéticos para la subcategoría cocina en el escenario carbono neutralidad. ....	59
Figura 58 Número de viviendas separadas en casa y departamentos para los tres escenarios. ....	60
Figura 59 Uso de calefacción a nivel país para los tres escenarios. ....	61
Figura 60 Saturación de los energéticos en viviendas tipo casa para el escenario políticas actuales. ....	61
Figura 61 Saturación de los energéticos en viviendas tipo casa para el escenario carbono neutralidad +. ....	62
Figura 62 Saturación de los energéticos (electricidad, kerosene, gas natural y gas licuado de petróleo) en viviendas tipo departamentos para los tres escenarios. ....	62
Figura 63 Eficiencia según energético para los tres escenarios. ....	63

Figura 64 Demanda energética unitaria ponderada de las viviendas tipo casa en el escenario políticas actuales.....	64
Figura 65 Demanda energética unitaria ponderada de las viviendas tipo casa en el escenario carbono neutralidad. ....	64
Figura 66 Demanda energética unitaria de leña de las viviendas tipo casa para los tres escenarios.....	65
Figura 67 Demanda energética unitaria ponderada de las viviendas tipo departamento en el escenario políticas actuales.....	65
Figura 68 Demanda energética unitaria ponderada de las viviendas tipo departamento en el escenario carbono neutralidad. ....	66
Figura 69 Consumo energético total por calefacción para los tres escenarios. ....	67
Figura 70 Demanda energética del transporte terrestre de pasajeros para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.....	67
Figura 71. Demanda de diésel producto del transporte terrestre de carga para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.....	68
Figura 72 Evolución de la matriz energética para el escenario políticas actuales.....	69
Figura 73 Evolución de la matriz energética para el escenario carbono neutralidad. ....	69
Figura 73 Variabilidad de factores de emisión (F.E) para MP <sub>2.5</sub> . A la derecha de la línea naranja se muestra el rango de factores de emisión considerados en distintos planes de descontaminación atmosférica.....	73
Figura 75. Emisiones de CO <sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) bajo el escenario de políticas actuales para el sector energía, excluyendo los sectores: aéreo, marítimo y de MFR con potencia superior a 560 kW.....	73
Figura 76 Evolución porcentual de las emisiones de CO <sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) para el Sector Energía (excluye Aéreo y Marítimo). Escenario políticas actuales. ....	74
Figura 77 Emisiones de CO <sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) para los Sectores Aéreo y Marítimo. Escenario políticas actuales. ....	76
Figura 78 Emisiones de CO <sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) para el sector energía (excluye aéreo, marítimo y de maquinaria fuera de ruta con potencia superior a 560kW). Escenario carbono neutralidad. ....	76
Figura 79. Evolución porcentual de las emisiones de CO <sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) para el sector energía (excluye sectores: aéreo, marítimo y MFR de más de 560 kW). Escenario carbono neutralidad. ....	77
Figura 80 Emisiones de CO <sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) para los sectores aéreo y marítimo bajo el escenario de carbono neutralidad. En azul se muestra el sector aéreo y en naranja el sector marítimo.....	78
Figura 81. Emisiones de CO <sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) para el sector energía (excluyendo los escenarios: aéreo, marítimo y de MFR para maquinaria de potencia superior a 560 kW bajo el escenario de neutralidad +.....	79
Figura 82. Trayectorias de emisiones de trazas contaminantes y gases de efecto invernadero entre 2016 y 2050, considerando políticas actuales (línea negra), carbono neutralidad (línea azul) y carbono neutralidad + (línea verde). Estas trayectorias no contemplan a los sectores aéreo y marítimo.....	81
Figura 83 Participación relativa de los distintos sectores en la emisión de las trazas coemitidas para el año 2016. Se excluye el sector aéreo y marítimo, y se agrupan los sectores: comercial,	

público y residencial en el sector CPR, debido a la baja contribución de los dos primeros sectores mencionados. ....	82
Figura 84. Invitación al seminario de Luisa T. Molina en marzo de 2019.....	90
Figura 85. Imágenes del seminario de presentación de resultados realizado el 31 de enero de 2020. ....	92
Figura 86. Trayectorias de emisiones de CO <sub>2eq</sub> y BC entre 2016 y 2050, considerando políticas actuales (línea negra), carbono neutralidad (línea azul) y carbono neutralidad + (línea verde). Estas trayectorias no contemplan a los sectores aéreo, marítimo, ni a la maquinaria fuera de ruta con potencia superior a 560 kW de la gran minería del cobre. ....	93

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de documentos indicados por el Ministerio del Medio Ambiente para ser revisados en este estudio.....	9
Tabla 2. Resumen de metodología usada en el presente estudio para estimar las emisiones sectoriales de BC para el año 2016.....	17
Tabla 3 Emisiones de carbono negro del año 2016 del sector energía agrupados según códigos del IPCC (kton). Aquí se compara la estimación original y la corregida por este trabajo. Notar que aquí sí se muestran los sectores aéreo y marítimo. ....	18
Tabla 4 Consumos de energía de diferentes energéticos reportados por los BNE para el sector comercial [Tcal/a].....	24
Tabla 5 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el sector consumo propio [Tcal/a]. ....	26
Tabla 6 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector azúcar [Tcal/a]. ....	28
Tabla 7 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector cemento [Tcal/a]. ....	30
Tabla 8 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector industrias varias [Tcal/a]. ....	31
Tabla 9 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector papel y celulosa [Tcal/a].....	33
Tabla 10 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector pesca [Tcal/a].....	34
Tabla 11 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector petroquímica [Tcal/a]. ....	34
Tabla 12 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector siderurgia [Tcal/a]. ....	37
Tabla 13 Resumen de trayectorias de otras trazas. ....	41
Tabla 14 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector cobre [Tcal/a].....	46
Tabla 15 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector hierro [Tcal/a]. ....	47
Tabla 16 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector minas varias [Tcal/a]. ....	49

Tabla 17 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector salitre [Tcal/a].....	50
Tabla 18 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el sector público [Tcal/a].....	55
Tabla 19 Base de datos utilizadas para estimar las emisiones de la subcategoría calefacción. ....	60
Tabla 20. Clasificación del sector transporte.....	71
Tabla 21 Emisiones de CO <sub>2eq</sub> (Mt/año) para el Sector Energía (excluye Aéreo y Marítimo). Escenario políticas actuales.....	75
Tabla 22 Emisiones de BC (kton/a) para el Sector Energía (excluye Aéreo y Marítimo). Escenario políticas actuales.....	75
Tabla 23 Emisiones de CO <sub>2eq</sub> (Mt/año) para el sector energía (excluye sectores: aéreo, marítimo y MFR de más de 560 kW). Escenario carbono neutralidad. ....	77
Tabla 24 Emisiones de BC (kton/a) para el Sector Energía (excluye sectores: aéreo, marítimo y MFR de más de 560 kW)). Escenario carbono neutralidad.....	78
Tabla 25 Emisiones de BC (kton/a) para el Sector Energía (excluye Aéreo y Marítimo). Escenario Neutralidad +. ....	80
Tabla 26 Reducciones esperadas de BC para los escenarios de políticas actuales, carbono neutralidad y carbono neutralidad +. ....	80
Tabla 27 Emisiones de trazas coemitidas para el año 2016 [kton/a].....	83
Tabla 28. Iniciativas MRV ya adoptadas por Chile. Se indica brevemente cómo se aplicaría o extendería al caso de carbono negro.....	85
Tabla 29 Participantes en el seminario de presentación de resultados.....	91
Tabla 30. Emisiones anuales de carbono negro en kton/a para los escenarios definidos en este trabajo. Entre paréntesis, y con números en azul (verde) según la nomenclatura de la figura anterior, se muestran los porcentajes de reducción respecto del escenario de políticas actuales (del año 2016).....	94

## RESUMEN EJECUTIVO

Las urbes son el escenario clave donde la acción climática y los cambios transformacionales deben ocurrir para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y el Acuerdo de París, y así evitar los impactos adversos de un mundo insostenible y en rápido calentamiento. Esto, a su vez, implica lograr la carbono neutralidad global para el año 2050, así como la mitigación de los forzantes climáticos de vida media corta (SLCF, por sus siglas en inglés), metano (CH<sub>4</sub>) y carbono negro (BC) en particular. Esto enfatiza la necesidad de abordar la mitigación de SLCF de manera consistente con el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y otros forzantes climáticos de vida media larga. Además, la evidencia sugiere que reducir los SLCF puede facilitar el logro de los ODS, principalmente a través de cambios en la matriz tecnológica y energética, y sus consecuencias en la calidad del aire.

Lo anterior se aplica al mundo en general, pero especialmente a Chile, donde la fracción de población urbana ha alcanzado casi el 90 % y los problemas de calidad del aire siguen siendo importantes a pesar de los esfuerzos de larga data. Esto fue reconocido por Chile en su Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por sus siglas en inglés) en 2015. En el anteproyecto de actualización presentado el 2019 se establece el objetivo cuantitativo de una reducción de emisiones de carbono negro de entre 10 y 25 % para 2030 con respecto a 2016. En el presente estudio, las medidas de mitigación consideradas para los gases de efecto invernadero de larga duración (LLGG) se han evaluado en términos de su potencial para reducir el BC durante el período 2016-2050, utilizando el marco de análisis del *Long-Range Energy Alternatives Planning System - Integrated Benefits Calculator* (LEAP-IBC). Además de las opciones de mitigación para LLGG, se han evaluado medidas específicas de los planes de descontaminación del aire. El escenario de neutralidad de gases de efecto invernadero implica una reducción desde 10 kton/a de BC en 2016 a 8,7 kton/a en 2030, y a 6,6 kton/ en 2050. Las reducciones correspondientes a trazas coemitidas con el carbono negro también se muestran. Si bien la neutralidad de LLGG da como resultado reducciones significativas a nivel nacional de partículas, incluyendo BC y sus precursores, la misma no implica una mejora significativa en la calidad del aire o los efectos climáticos regionales relevantes. Esto se debe al tiempo de residencia muy diferente de LLGG y partículas, incluido el BC. Por eso se propuso un escenario transformacional, con medidas específicamente enfocadas a reducir el carbono negro en entornos urbanos, suponiendo la implementación de calefacción distrital y de estándares más estrictos para maquinaria fuera de ruta. Este escenario es funcional a enfrentar la pobreza energética y la desigualdad ambiental que prevalecen en el centro y sur de Chile.

El carácter regional de los impactos del carbono negro y la necesidad de buscar opciones con beneficio tanto en el clima como en la calidad del aire, hacen necesario coordinar e integrar la gestión de ambos. En particular, es nuestra opinión experta que se requiere desarrollar inventarios nacionales para partículas, incluyendo carbono negro y sus precursores gaseosos, en la mayor resolución espacial posible (ca. 1 km<sup>2</sup>) y extender el alcance de los planes de descontaminación atmosférica, complementándolos con monitoreo del carbono negro y especies asociadas, así como de dióxido de carbono urbano. Finalmente, el estudio esboza un sistema de monitoreo, reporte y verificación basado en iniciativas existentes, generalmente orientadas a la transición energética y la mitigación de gases de efecto invernadero.

## EXECUTIVE SUMMARY

Cities are the key scenario where climate action and transformational changes must occur to achieve the Sustainable Development Goals (SDGs) and the Paris Agreement, avoiding the adverse impacts of an unsustainable and rapidly warming world. This implies achieving global carbon neutrality by 2050, as well as mitigating short-lived climate forcers (SLCF), methane (CH<sub>4</sub>) and black carbon (BC) in particular. This, in turn, emphasizes the need to address the mitigation of SLCF in a manner consistent with carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) and other long-lived climate forcers. In addition, the evidence suggests that reducing SLCF can facilitate the achievement of the Sustainable Development Goals (SDGs), mainly through technological and energy matrix changes and its consequences on air quality.

The above applies to the world in general, but especially to Chile, where urbanization has reached almost 90% and air quality problems remain an issue of concern despite long-standing efforts. This was recognized by Chile in its Nationally Determined Contribution in 2015. In the draft update version presented in 2019, a quantitative black carbon mitigation objective of between 10 and 25% with respect to 2016 by 2030 is established. In this work, mitigation measures considered for long-lived greenhouse gases (LLGG) have been evaluated in terms of their potential to reduce BC during the 2016-2050 period using the Long-Range Energy Alternatives Planning System analysis framework - Integrated Benefits Calculator (LEAP-IBC). In addition to the mitigation options for LLGG, specific measures of air pollution attainment plans have been evaluated. The LLGG neutrality scenario implies a reduction from 10 kton/year of BC in 2016 to 8.7 kton/year in 2030, and 6.6 kton/year in 2050. The corresponding reductions of tracers co-emitted with black carbon are also shown. While LLGG neutrality results in significant reductions at the national level of particles, including BC, and its precursors, it does not imply a significant improvement in air quality or the relevant regional climatic effects. This is due to the very different residence times of LLGG and particles, including BC. That is why a transformational scenario was proposed, with measures specifically focused on reducing black carbon in urban environments, assuming the implementation of district heating and stricter standards for off-road machinery. This scenario is functional in addressing the energy poverty and environmental inequality that prevails in central and southern Chile.

The regional nature of the impacts of black carbon and the need to look for options that benefit both climate and air quality, make it necessary to coordinate and integrate the management of both. In particular, in our expert opinion, it is necessary to develop national inventories for particles, including black carbon, and their gaseous precursors, in the greatest possible spatial resolution (~ 1 km<sup>2</sup>) and extend the scope of air pollution attainment plans, complementing them with monitoring of carbon black and associated species, as well as urban carbon dioxide. Finally, the study outlines a monitoring, reporting and verification system based on existing initiatives generally oriented towards energy transition and the mitigation of greenhouse gases.

## I. INTRODUCCIÓN

Ante la vigésimo primera conferencia de las partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC), Chile presentó en septiembre de 2015 una Contribución Nacional Tentativa (INDC, por sus siglas en inglés) organizada en torno a cinco pilares: mitigación; adaptación; construcción y fortalecimiento de capacidades; desarrollo y transferencia de tecnologías; y financiamiento (INDC, 2015). La misma sería luego ratificada por el Congreso de la República al adoptar el Acuerdo de París (<http://bcn.cl/20ory>). Bajo el acápite de mitigación de la INDC se encuentra la sección sobre contaminantes de vida media corta (SLCP por sus siglas en inglés). Allí se reconoce el rol de mitigación climática de los SLCP y se resaltan los cobeneficios en términos de reducir los niveles de contaminación atmosférica locales en centros urbanos, refiriéndose en especial al carbono negro (BC, por sus siglas en inglés). Se indica que el BC es parte significativa del material particulado fino –específicamente del material particulado de tamaño aerodinámico inferior a 2,5  $\mu\text{m}$  o PM2.5 (por sus siglas en inglés)– y cuyas fuentes principales son transporte que usa diésel y la calefacción y cocina residencial a leña. Además, se sostiene que los planes de descontaminación atmosféricos serían las herramientas para reducir el material particulado fino y, por ende, el BC. En suma, la NDC chilena de 2015 introduce el potencial de mitigación climática del BC y sus cobeneficios en términos de calidad de aire. No obstante, no se establece explícitamente una meta de mitigación, cuestión que se quiere abordar en la revisión hacia la ambición de la NDC de Chile, a ser presentada en el año 2020 y para lo cual se desarrolla el presente estudio.

La consideración de los contaminantes de vida media corta en la NDC de Chile en 2015, en general, y del carbono negro, en particular, está en línea con la participación de nuestro país desde 2012 en la Coalición por el Aire Limpio y el Clima ([Climate and Clean Air Coalition](#), CCAC). Esta coalición convoca a un conjunto de estados y otros participantes provenientes de la sociedad civil organizada, academia, consultores, etc., y promueve la protección del clima e iniciativas para mejorar la calidad del aire a través de acciones que permitan reducir los SLCP. Dicha coalición surge a partir de un informe científico publicado por PNUMA y la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 2011 (UNEP y WMO, 2011). El informe mostró evidencia de oportunidades derivadas de las medidas dirigidas a los contaminantes climáticos de vida media corta, específicamente ozono ( $\text{O}_3$ ) y carbono negro (BC), que podrían lograr resultados beneficiosos tanto para el clima, para la calidad del aire (por ello “win-win”) y el bienestar humano en un plazo relativamente corto. A ese informe ha seguido un creciente volumen de literatura científica la cual ya ha sido evaluada y ponderada en informes publicados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) y a la cual se dedicará un capítulo especial en el sexto informe que debe ser presentado en 2022 (Masson-Delmotte et al., 2018; Stocker et al., 2013).

Por otro lado, hay evidencia que sugiere que abatir SLCP puede facilitar la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), principalmente a través de los cambios tecnológicos y de matriz energética y sus implicancias sobre la calidad del aire (e.g., Haines et al., 2017; Melamed et al., 2016; Shindell et al., 2017). En este contexto, se destaca que, al adoptar dichas acciones, se logra disminuir la mortalidad de la población asociada a la mala calidad del aire, particularmente a través de las medidas para reducir los niveles de aerosoles, las cuales se asocian con el BC (Anenberg et al., 2019; Haines y Ebi, 2019; Melamed et al., 2016; Silva et al., 2017).

Lo anterior es de particular importancia en Chile, donde la exposición a material particulado fino, esto es, MP2.5, resulta en la muerte de miles de personas cada año (MMA, 2014, 2017; Romieu et al., 2012), y donde la descarbonización de la matriz energética constituye un objetivo en el contexto de la acción climática declarada de Chile (NDC, 2019). La descarbonización conlleva cobeneficios económicos y también sobre la salud de la población cuando se realiza con el objetivo complementario de mejorar la calidad del aire en zonas urbanas (Anenberg et al., 2019; Lacey y Henze, 2015; Li et al., 2018; Markandya et al., 2018; Vandyck et al., 2018; Xie et al., 2018). De hecho, las zonas urbanas constituyen el escenario donde transformaciones profundas y principales deben ocurrir para alcanzar los ODS y los compromisos del Acuerdo de París (Acuto, 2016; Grandin et al., 2018; Lamb et al., 2019).

### 1) **Carbono negro y sus impactos**

El carbono negro es una forma de aerosoles que contienen carbono. Dicho carbono se genera, principalmente, en condiciones de quema incompleta de combustibles fósiles, biomasa y otros, en presencia de llamas (Bond et al., 2013). Las fuentes de BC también emiten aerosoles orgánicos primarios (POA, por sus siglas en inglés), esto es, compuestos que contienen carbono, hidrógeno y, a menudo, oxígeno. Además, dichas fuentes también emiten gases que pueden dar lugar a la formación de aerosoles orgánicos secundarios (SOA, por sus siglas en inglés). La combinación de aerosoles orgánicos y carbono negro se denominan aerosoles carbonáceos.

El carbono negro tiene una estructura similar al grafito y consiste en agregados o cadenas de esférulas de tamaños entre 10 y 50 nm aproximadamente; se volatiliza a 4000 K, (es decir, es refractario), es insoluble en agua y otros solventes; por último absorbe eficazmente la radiación solar en el espectro visible (Bond et al., 2013). En ausencia de un método de medición que permita cuantificar todas sus propiedades, se recomienda usar el término carbono negro en términos cualitativos y usar una terminología específica según el método de medición usado (Petzold et al., 2013). Las formas más comunes de medición de carbono negro se basan en su calidad refractaria y la capacidad absorbente de radiación en el espectro visible e infrarrojo, que corresponden a las técnicas térmicas y los métodos ópticos respectivamente (Chow et al., 2011; Petzold et al., 2013). Ver la Figura 1.

La característica que hace del carbono negro una sustancia de relevancia climática es, primero, su capacidad de absorber radiación solar dando lugar a calentamiento. A escala global, se estima que el BC da lugar a un forzamiento entre aproximadamente 0.2 y 1 W/m<sup>2</sup> (Gustafsson y Ramanathan, 2016), el cual, en el rango superior, es del mismo orden de magnitud que el forzamiento global por dióxido de carbono pero, como su tiempo de residencia atmosférico es de unos pocos días, su mitigación tiene un efecto inmediato sobre su abundancia en el sistema climático (Masson-Delmotte et al., 2018; Stocker et al., 2013). Cabe destacar que regionalmente dicho forzamiento puede ser hasta dos veces el promedio global e.g., (Mallet et al., 2016; Mena-Carrasco et al., 2014). Segundo, puede afectar la formación y abundancia de nubes alterando la estabilidad atmosférica o actuando como núcleo de condensación de nubes de agua y hielo (Bond et al., 2013; Boucher et al., 2013). Tercero, al depositarse sobre la criósfera puede volver las superficies más absorbentes y acelerar los procesos de derretimiento (Ménégoz et al., 2014; Molina et al., 2015; Rowe et al., 2019). Hay que mencionar que tanto el BC como el polvo o “carbono marrón” (BrC, por sus

siglas en inglés) también son aerosoles con un efecto de calentamiento sobre el sistema climático. El BrC se distingue del BC por absorber radiación en un espectro más amplio de longitudes de onda, esto es, no sólo en el visible sino que especialmente en el ultravioleta y por su composición tanto orgánica como inorgánica (Andreae y Gelencsér, 2006; Yan et al., 2018). También, el BrC es de mayor tamaño que el BC (Bond et al., 2013).

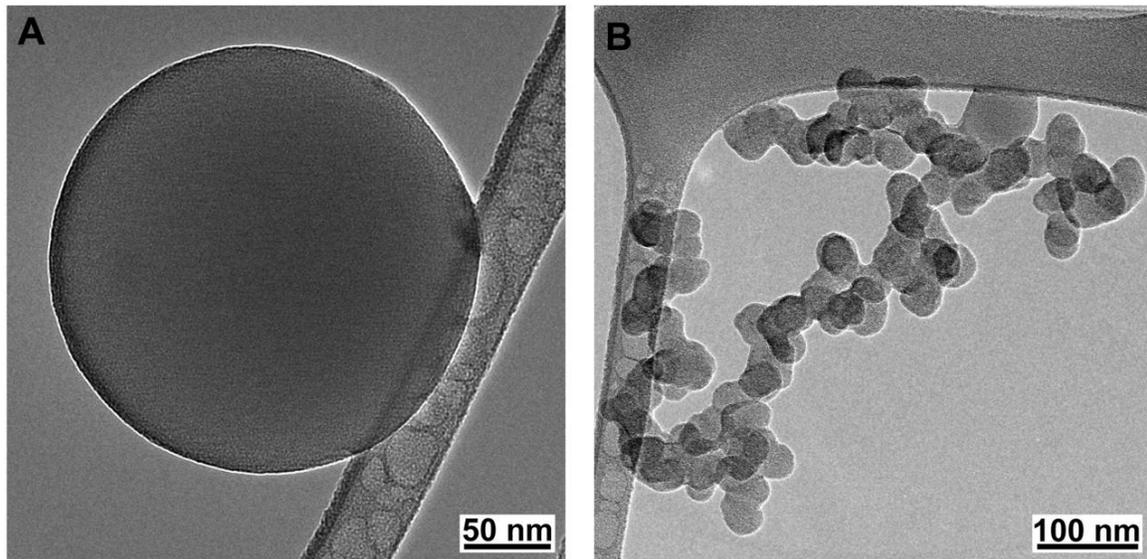


Figura 1. Imágenes de microscopía electrónica de transmisión de partículas de aerosoles atmosféricos. A la izquierda (A) una imagen de carbono marrón (Brown carbon, BrC) y, a la derecha (B), un agregado de esférulas de carbono negro en forma de cadena. Extraído desde Alexander et al., (2008).

A escala global, se estima que cada año mueren prematuramente, por exposición a material particulado completamente respirable (MP2.5), entre 1,61 y 4,81 millones de personas en el mundo (Lelieveld et al., 2015). Dado que el carbono negro forma parte del MP2.5, la reducción de su abundancia en la atmósfera da como resultado un menor riesgo a la exposición de aerosoles o partículas en la población, sobre todo, porque se han identificado impactos sobre la salud humana atribuibles directamente al carbono negro, e.g., (Nichols et al., 2013). No obstante, en general, resulta difícil distinguir los efectos específicos del BC (Kirrane et al., 2019).

En la Figura 2 se sintetizan varias de las características e impactos asociados al carbono negro. Es evidente, entonces, que la mitigación de las fuentes de carbono negro y material particulado es beneficiosa para la salud y potencialmente para el clima. Hay que tener presente, empero, que la reducción de ciertas fuentes de BC también llevará a la reducción de carbono orgánico, generalmente un agente de enfriamiento, así como de precursores de aerosoles reflectantes como sulfatos o nitratos. Por lo tanto, no todas las medidas tienen un efecto positivo sobre el clima y deben ser adecuadamente ponderadas (Bond et al., 2013).

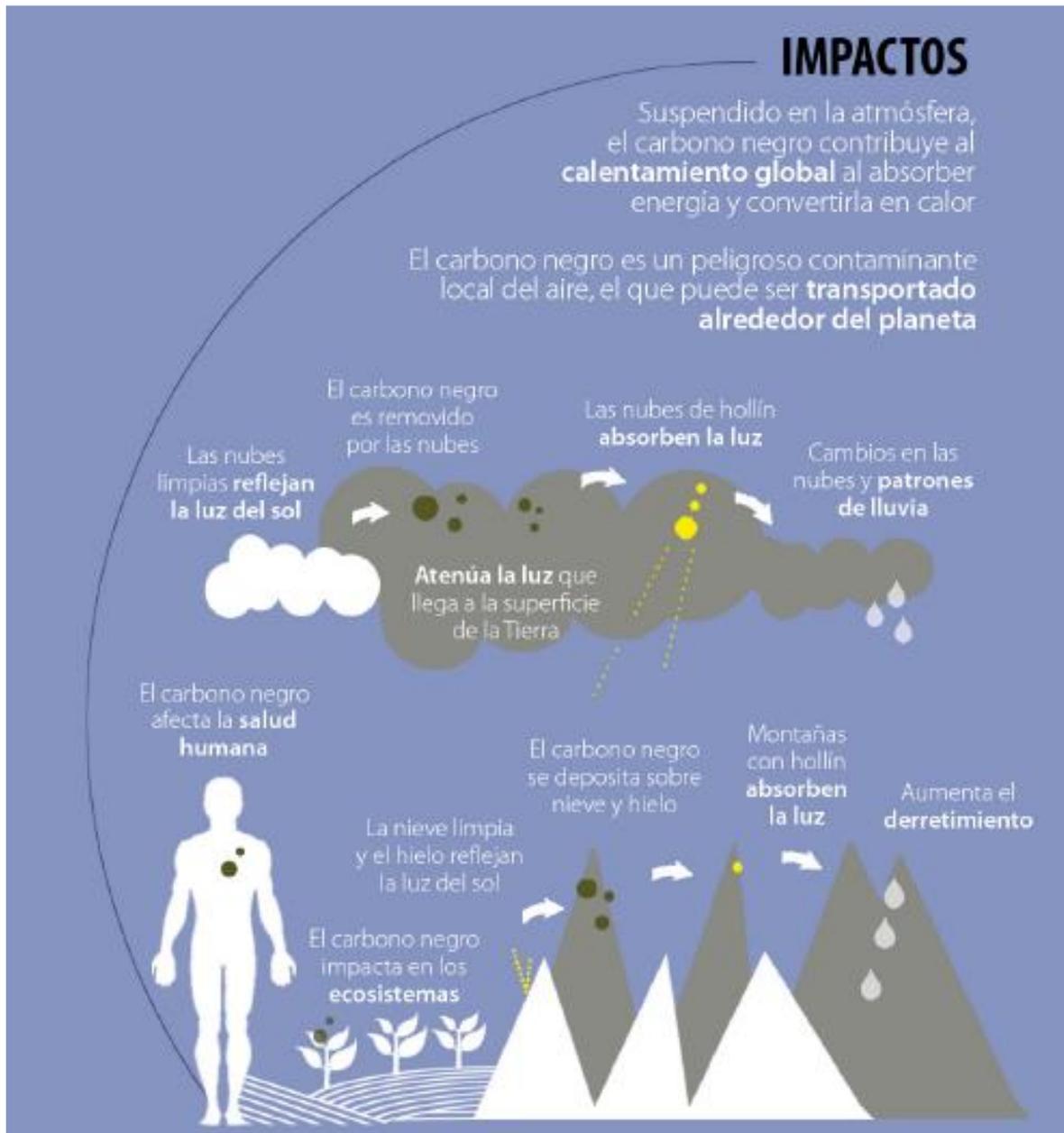


Figura 2. Esquema de los múltiples impactos asociados al carbono negro. La figura se basa en una análoga presentada por la Coalición del Aire Limpio y el Clima (<https://www.ccacoalition.org/en/slcp/black-carbon>).

## 2) Fuentes de carbono negro

Como ya se dijo, el carbono negro se origina principalmente en condiciones de quema incompleta de combustibles fósiles, biomasa y otros, en presencia de llamas. Estimaciones globales de emisiones de material particulado, incluyendo carbono negro, indican que hacia el año 2010 se emitían 7,2 Tg de BC en el mundo, correspondiendo a alrededor de un 15% de las emisiones globales de MP2.5 (Klimont et al., 2017). Un inventario global reciente, desarrollado para estudios climáticos, muestra la evolución de las emisiones de aerosoles

carbonáceos – orgánico (OC, por sus siglas en inglés) e inorgánico (BC) – entre los años 1750 y 2014, indicando un crecimiento significativo desde la época preindustrial (Hoesly et al., 2018). Estos estudios muestran que, a escala global, las emisiones de BC se asocian mayoritariamente a los sectores residencial, transporte, energía, industria y quema de desechos (Figura 3). En América del Sur, se estima que en 2010 se emitían alrededor de 0,75 Tg de BC, de los cuales un 55% correspondía a quema de biomasa y, el resto, a otras fuentes antrópicas e.g., (Molina et al., 2015).

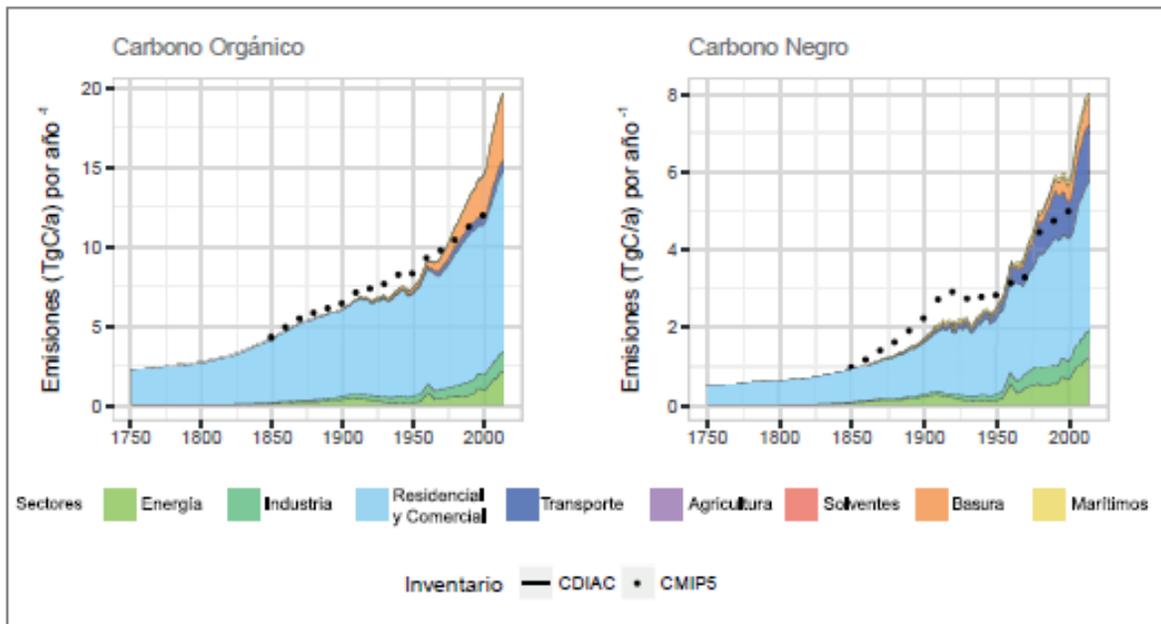


Figura 3. Evolución de las emisiones globales de carbono orgánico (OC) y carbono negro (BC) por sectores entre los años 1750 y 2014. También se indica la evolución según otros inventarios globales, incluyendo el uso en las simulaciones climáticas presentadas en (Stocker et al., 2013). La figura se adaptó a partir de (Hoesly et al., 2018).

A petición del Ministerio del Medio Ambiente, en 2017 se generó el primer inventario de emisiones de carbono negro para Chile considerando como año base 2013 (GreenlabUC, 2016). Este inventario contempló los sectores transporte, maquinaria fuera de ruta (MFR), calefacción a leña, generación de electricidad, consumo de energía en industrias, entre otros, sumando 22,6 kton de BC para el año 2013. La quema de leña se estimó responsable de un 45 % de dichas emisiones. Luego, en el Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (MMA, 2018), se estimó la evolución de las emisiones de BC para el período entre 1990 y 2016. Dicho inventario consideró los niveles de actividad que se utilizan para estimar gases de efecto invernadero, complementados por aquellos provistos en (GreenlabUC, 2016) y usando factores de emisión de la literatura. De acuerdo con este inventario, las emisiones de BC en 2016 sumaban 17,7 kton. En el presente estudio, las emisiones de BC se estiman para los siguientes sectores: 1) Comercial, público y residencial (CPR); 2) Consumo propio, vale decir, el consumo energético de los sectores productores de energía; 3) Industria; 4) Maquinaria fuera de ruta (MFR); 5) Minería; 6) Transporte (terrestre); y 7) Generación de electricidad. También se hace una estimación de las emisiones

de los sectores: marítimo, aéreo y de maquinaria fuera de ruta con potencias superiores a 560 kW de potencia. Pero las mismas se excluyen de las proyecciones, pues estas no están contempladas en los escenarios provistos para la mitigación de gases de efecto invernadero (NDC, 2019; Palma Behnke et al., 2019). Además, una caracterización detallada de las mismas requeriría de la recolección y análisis de información que excede el alcance de este estudio. No obstante, los mismos pueden tener impactos relevantes en el clima y en la calidad del aire, estando sujetos a un creciente escrutinio y a iniciativas nacionales e internacionales de mitigación, e.g., (Blakey et al., 2011; Farías et al., 2019; Johansson et al., 2017; Lund et al., 2017; Smith y Ahmad, 2018; Sofiev et al., 2018).

En el capítulo siguiente se describe la metodología usada en este estudio y en el subsiguiente se presentan los resultados. El cuarto capítulo aborda el esbozo de un procedimiento de monitoreo, reporte y verificación (MRV). Un resumen de seminarios y reuniones de trabajo entre las partes de este estudio se encuentra en el cuarto capítulo. Conclusiones y recomendaciones se abordan en el sexto capítulo.

## II. APROXIMACIÓN METODOLÓGICA

Este capítulo contiene la metodología usada para generar estimaciones y proyecciones de emisiones de carbono negro y especies afines en el contexto del desarrollo de la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC, por sus siglas en inglés) de Chile a ser presentada ante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático en el año 2020. Aquí se describe aspectos relacionados con la modelación de escenarios realizada para obtención de proyecciones de emisiones de carbono negro y otros contaminantes. También aborda cómo se determinó el sistema de monitoreo, reporte y verificación. Asimismo, se discute brevemente la manera en que trabajó entre las partes.

### 1) Revisión de antecedentes y determinación de sectores relevantes

Tabla 1. Lista de documentos indicados por el Ministerio del Medio Ambiente para ser revisados en este estudio.

Documento	Institución responsable	Ente ejecutor
Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre el Cambio Climático.	Ministerio del Medio Ambiente.	Ministerio del Medio Ambiente. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).
Ruta Energética 2018 – 2022.	Ministerio de Energía.	Ministerio de Energía.
Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022.	Ministerio del Medio Ambiente.	Ministerio del Medio Ambiente.
Plan de Mitigación de Gases de Efecto Invernadero para el Sector Energía.	Ministerio de Energía.	Ministerio de Energía. <i>Partnership for Market Readiness (PMR).</i> Banco Mundial.
Apoyo a la Iniciativa para el Plan de Mitigación de los Contaminantes Climáticos de Vida Corta en Chile.	Ministerio del Medio Ambiente	Dictuc. Pontificia Universidad Católica de Chile Universidad Técnica Federico Santa María.
Evaluación de la Reducción de carbono negro CCAC.	Ministerio del Medio Ambiente.	Ministerio del Medio Ambiente. <i>Climate and Clean Air Coalition (CCAC).</i>
Estrategia de planes de Descontaminación Atmosférica.	Ministerio del Medio Ambiente.	Ministerio del Medio Ambiente. Superintendencia del Medio Ambiente.

Primero se revisaron múltiples documentos de política pública (Tabla 1) para identificar medidas relevantes para la mitigación de carbono negro (La revisión de cada documento se presenta en el Anexo 1). Luego, en la medida que los escenarios de mitigación de gases de efecto invernadero que se incluyen en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile ante el Acuerdo de Paris (NDC, 2019), fueron puestos a disposición del Ministerio del Medio Ambiente, se identificaron un subconjunto de medidas relevantes para la mitigación de carbono negro.

## 2) Herramienta de proyección de escenarios y evaluación de impactos

Las medidas antes identificadas fueron incorporadas en una herramienta de simulación de escenarios energéticos e impactos usada en el contexto de iniciativas de acción y planificación nacional (*Supporting National Action and Planning on Short-Lived Climate Pollutants*, SNAP), que promueve la Coalición de Aire Limpio y Clima (CCAC, <https://www.ccacoalition.org/>). A ello se agregaron medidas derivadas de los planes de descontaminación vigentes, especialmente aquellos asociados al consumo de leña residencial, transporte y maquinaria fuera de ruta.

En efecto, en el presente estudio se ha adoptado el modelo *Long Range Energy Alternatives Planning System - Integrated Benefits Calculator* (LEAP-IBC) (<https://www.energycommunity.org/>). Este modelo está orientado a su uso por parte de planificadores y analistas con un enfoque al sector energético, donde también se pueden incluir variables no energéticas. El sistema se puede obtener a través de internet, con la opción de contar con distintas licencias de usuario gratuitas o pagas.

LEAP-IBC consiste en dos partes. La primera es LEAP, y es la que permite calcular diferentes consumos o demandas energéticas y estimar emisiones en base a estos consumos o demandas. El sistema LEAP es usado en diversos lugares del mundo e.g., (Emodi et al., 2017; Grande-Acosta y Islas-Samperio, 2017; Hong et al., 2016; Hu et al., 2019). Eso le da la ventaja de haber sido usado por diversos usuarios y en variadas condiciones, cuestión que le da robustez metodológica. Pero más allá de los métodos, subyace como factor limitante la calidad de la información de entrada, por ejemplo, proyecciones de crecimiento económico o de demanda energética o factores de emisión u otros, e.g., (Palma Behnke et al., 2019). La segunda parte es IBC y corresponde al complemento que incluye los sectores no energéticos. El mismo también calcula diferentes beneficios en base a las emisiones estimadas desde LEAP. En el caso de impactos sobre la mortalidad se usan los métodos descritos en Anenberg et al. (2010).

### a) Herramienta para escenarios y proyecciones

Como se mencionó anteriormente, se usa la herramienta *Long Range Energy Alternatives Planning System* (LEAP). La flexibilidad del modelo LEAP permite realizar una estimación de emisiones con una metodología *top-down* o *bottom-up*, dependiendo de diferentes parámetros o variables que deben ser definidas al momento de comenzar el trabajo de modelación. A continuación, se presenta una descripción breve de algunos de los aspectos a considerar en la modelación de emisiones y escenarios de evolución.

- **Parámetros básicos:** La definición de parámetros básicos en LEAP define la cantidad de años que se quiere proyectar las demandas energéticas (y emisiones contaminantes), también se pueden definir la periodicidad (emisiones anuales, bianuales, etc.) en que se desean estimar los consumos energéticos y/o emisiones.
- **Estructura:** La estructura es fundamental para la modelación, esta definirá que tan detallada será la estimación de consumos o emisiones. Por ejemplo, para el sector calefacción residencial, dependiendo de la estructura, se podrá evaluar las emisiones de todo el parque de viviendas que utilicen calefacción o se podrá evaluar el consumo unitario de cada vivienda del parque. La importancia de este ejemplo radica en las medidas que se podrían evaluar en cada caso, siendo en el primer caso, una modelación

*top-down*, donde se podría evaluar una disminución del consumo nacional por uso de calefacción. Por otra parte, en el segundo caso, con una modelación *bottom-up*, se podría ver en detalle el beneficio de reducción de “X” viviendas sobre “Y” viviendas, a un nivel más local.

- **Tipo de demanda:** En LEAP existen dos tipos de demandas que pueden ser modeladas. Primero, la demanda energética que puede venir dada por un consumo específico de algún energético. Segundo, se puede calcular la cantidad de vehículos del parque vehicular, definiendo: número de vehículos que entran al parque, número de vehículos que salen del parque, cantidad de distancia recorrida por el vehículo y ciclos de vida de los vehículos. Esta metodología de estimación se denomina, en LEAP, “*Stock Turnover Method*” e.g., (Huo et al., 2019).
- **Factores de emisión:** Dentro de LEAP se pueden cargar diferentes factores de emisión, estos pueden ser definidos por el usuario o se pueden obtener de la base de datos por defecto del modelo. Esto último es particularmente útil para estimar emisiones en donde no se cuenta con ninguna base de datos local.
- **Escenarios:** LEAP cuenta con la opción de evaluar diferentes escenarios de forma rápida y sencilla, estos son definidos según los intereses del usuario y pueden ser construidos en base a diferentes escenarios que se hayan creado.

La interfaz gráfica del software en uso se ilustra en la figura siguiente. También se ilustra el nivel de detalle considerado en el sector transporte.

#### ***b) Herramienta para evaluación de impactos***

Se intentó hacer uso de la herramienta *Integrated Benefits Calculator* (IBC) que estima diferentes beneficios asociados a la salud (muertes prematuras), el ecosistema (pérdida de cultivos) e impactos en el clima (aumento de temperatura). A continuación, se presentan algunas de las métricas utilizadas por IBC para estimar los diferentes impactos y cobeneficios. Para ello, se consideran los siguientes pasos y aproximaciones:

- **Conversión de emisiones en concentraciones:** Esta se realiza en base a la versión adjunta (Jacobiano) del modelo de química atmosférica global *Geoschem* según se describe en (Henze et al., 2007). El modelo estima la concentración de material particulado a partir de su sensibilidad ante un cambio en las emisiones. En su versión original, el modelo tenía una resolución horizontal de 4° de latitud por 5° de longitud. Versiones más actuales tienen otras opciones ([http://wiki.seas.harvard.edu/geoschem/index.php/GEOS-Chem\\_horizontal\\_grids](http://wiki.seas.harvard.edu/geoschem/index.php/GEOS-Chem_horizontal_grids)).
- **Impacto en salud:** Este se calcula en base a los métodos utilizados por (Anenberg et al., 2010). Estos métodos se utilizaron en la evaluación de ozono y carbono negro (UNEP y WMO, 2011). Por otra parte, se utilizan las funciones estándar de dosis-respuesta utilizadas (Burnett et al., 2014).
- **Impacto en cultivos:** Estos se estiman en base a los lineamientos de Van Dingenen et al. (2009).

- **Impacto en el clima:** Estos impactos se basan en las métricas presentadas y descritas por el modelo de Shindell (2012) y Lacey y Henze (2015).

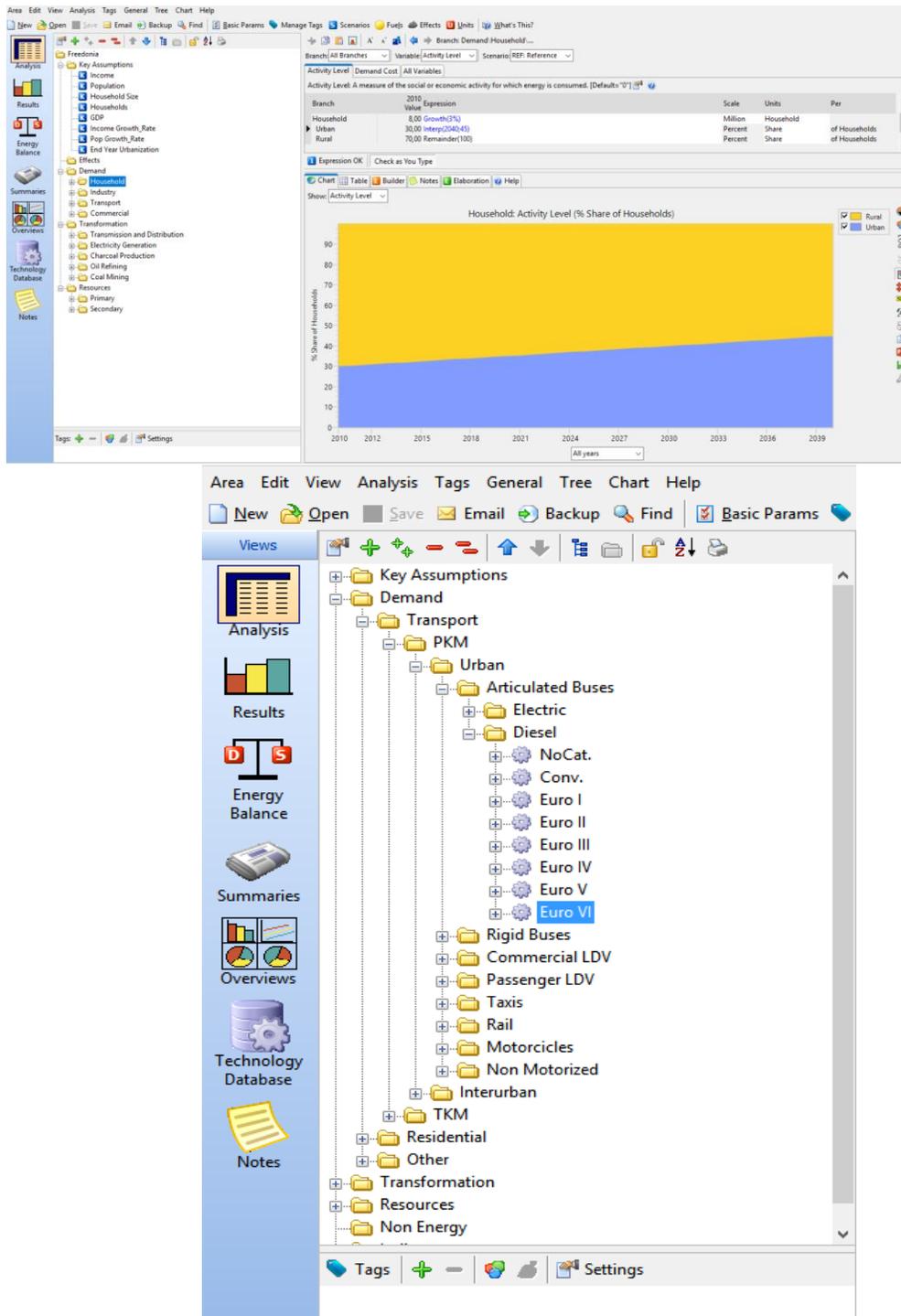


Figura 4 Muestra de la interfaz LEAP usado en este estudio (Versión 2018.1.23).

En particular, para este estudio se quiso evaluar los beneficios e impactos en salud estimados por complemento IBC. Estos consideran los efectos en salud por cuenta de exposición a material particulado completamente respirable según (Anenberg et al., 2010). Esencialmente, los estudios epidemiológicos establecen un llamado riesgo relativo (RR) que permite estimar la fracción de la morbilidad o la mortalidad observada atribuible a un factor de riesgo específico, en este caso, la presencia de contaminantes. A continuación, se describen las métricas utilizadas por el modelo.

La fracción atribuible de mortalidad o morbilidad (FA) viene dada por:

$$FA = \frac{RR - 1}{RR}$$

Por otro lado, el riesgo relativo por cambios en concentración de un contaminante ( $\Delta C$ ) está dada por la relación:

$$RR = \exp [\beta \Delta C]$$

donde el factor  $\beta$  corresponde a la relación entre la concentración y la respuesta en términos de morbilidad o mortalidad. El mismo se deriva empíricamente de sendos estudios epidemiológicos, típicamente, estudios de cohorte, la mayoría de los cuales provienen de Estados Unidos de América y Europa (Burnett et al., 2014). Por lo tanto:

$$FA = 1 - \exp [-\beta \Delta C]$$

Con todo, si se conoce la mortalidad total de la población ( $y_o$ ) y se conoce la población expuesta (POP), el cambio en mortalidad ( $\Delta Mort$ ) dado un cambio en la concentración quedará dado por:

$$\Delta Mort = y_o \{1 - \exp [-\beta \Delta C]\} POP$$

Estos métodos se han utilizado previamente, por ejemplo en el caso de ozono y carbono negro (UNEP y WMO, 2011). Como ya se dijo, las relaciones de entre dosis y respuesta o entre exposición y respuesta considerados no son necesariamente representativos, entre otros, por los niveles de concentración para los cuales fueron desarrollados y factores confundentes asociados a la salud de cada población (Anenberg et al., 2016; Hasenkopf, 2016).

Adicionalmente a los problemas derivados de la determinación de la relación entre dosis y respuesta, en el caso de Chile continental, dada su topografía compleja, resulta particularmente difícil estimar los niveles de material particulado a los que está expuesta la población basándose en modelos globales como los que subyacen a la herramienta en uso (Henze et al., 2007). Estudios recientes usan resultados de modelos globales que simulan la calidad del aire, pero que se han “corregido” con inferencias satelitales de la distribución de material particulado e.g., (Alvarado et al., 2019; Anenberg et al., 2019; van Donkelaar et al., 2010; Shaddick et al., 2018). Esta nueva aproximación resulta prometedora, pero la misma no está disponible al momento de escribir este informe. Con todo, la estimación de impactos sobre la mortalidad por carbono negro en uso no cuenta con una contextualización nacional ni una distribución espacial suficiente para realizar una proyección confiable. No obstante, como ya se indicó, es amplia la evidencia del impacto nocivo del material particulado completamente respirable en la salud de la población.

### 3) **Construcción de escenarios y proyecciones de emisiones**

Se construyen sobre la base de información disponible a través de la literatura revisada y aquella provista por el Ministerio del Medio Ambiente en cuanto a escenarios y proyecciones de mitigación para gases de efecto invernadero, con esta información se alimentó la herramienta antes descrita (LEAP) y se generaron escenarios de mitigación para carbono negro. Los mismos se discuten en el capítulo siguiente.

Juntamente con lo anterior se revisó la literatura para recopilar factores de emisión de carbono negro para distintos sectores, tecnologías y fuentes de energía. En esto fue crucial la interacción con la experta Luisa Molina, quien nos proveyó de la compilación realizada en el contexto de la construcción de escenarios de mitigación para carbono negro de México. La base de datos recopilada será entregada en un anexo digital y en archivo formato LEAP.

### 4) **Monitoreo, reporte y verificación**

El seguimiento de los compromisos de mitigación corresponde a una acción clave para garantizar que las emisiones se reduzcan efectivamente. Para ello se debe realizar un procedimiento de “medición, reporte y verificación (MRV)”. Esto sirve para identificar fuentes, caracterizar trayectorias de emisiones, diseñar estrategias de mitigación, y, ciertamente, para dar transparencia y credibilidad a los procesos, permitiendo corregir el curso en el caso de ser necesario (WRI, 2016). Las iniciativas de MRV pueden referirse al seguimiento de emisiones, acción climática o de financiamiento. En este caso, se consideró, por un lado, un MRV asociado a la acción climática y, por otro lado, se recogieron iniciativas en curso que abordan gases de efecto invernadero, sugiriéndose su adaptación para incluir aerosoles y carbono negro en particular.

### 5) **Interacción y colaboración entre las partes**

Este proyecto se ha realizado por el equipo del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), pero en estrecha colaboración con la contraparte del Ministerio del Medio Ambiente a través de su Oficina de Cambio Climático y la subunidad de inventarios. También ha contado con el apoyo de la profesora Luisa T. Molina del *Molina Center for Energy and the Environment*, en California, Estados Unidos y de Chris Malley del *Stockholm Environment Institute* en la Universidad de York. La interacción con el personal del Ministerio ha ocurrido a través de correos electrónicos, reuniones presenciales, seminarios y presentaciones. En estas instancias también han participado profesionales de otras áreas del Ministerio, especialmente de la unidad de calidad de aire. Adicionalmente, se entregaron dos informes con avances parciales y minutas en el contexto de la discusión de la actualización de la NDC. También se colaboró en la generación de un “*white paper*” en el que se describen múltiples aspectos de la estrategia de mitigación adoptada por Chile (Palma Behnke et al., 2019).

### III. RESULTADOS

En el presente capítulo se presentan los resultados obtenidos en este estudio relativos a emisiones y proyecciones de escenarios de emisiones. Este capítulo se separa en siete secciones. Primero, se presenta la estimación de emisiones de carbono negro para el año 2016 y se compara con estimaciones previas. Luego, se muestran los escenarios de mitigación de gases de efecto invernadero y su implicancia para carbono negro, así como medidas *ad hoc* propuestas en este estudio. En la sección 3 se indican los consumos energéticos sectoriales. En la sección 4 se muestra cómo se procedió al cálculo de emisiones, incluyendo la selección de factores de emisión. proyecciones para los escenarios de mitigación se presentan en la sección 5. En la sección 6 se indican en los escenarios correspondientes para trazas contaminantes coemitidas con el carbono negro. Finalmente, en la sección 7, se presentan las razones que subyacen a no incluir las estimaciones de mortalidad aplicando la herramienta IBC en la configuración presente. Los resultados obtenidos de este mismo son, no obstante, entregados en el Anexo 1. La información relativa a MRV se entrega en el siguiente capítulo.

#### 1) Emisiones para el año 2016

En el presente estudio, las emisiones de BC se estiman para los siguientes sectores: 1) Comercial, público y residencial (CPR); 2) Consumo propio, vale decir, el consumo energético de los sectores productores de energía; 3) Industria; 4) Maquinaria fuera de ruta (MFR); 5) Minería; 6) Transporte; y 7) Generación de electricidad. También se han incluido estimaciones preliminares para los sectores aéreo y marítimo. Los mismos, empero, no han sido incluidos en los escenarios de mitigación pues ellos no forman parte del paquete de medidas contemplados en la actualización de la NDC y, una caracterización detallada de las mismas requeriría de la recolección y análisis de información que excede el alcance de este estudio. No obstante, como ya se indicó, los mismos pueden tener impactos relevantes en el clima y en la calidad del aire, e.g., (Lund et al., 2017; Sofiev et al., 2018). Algunos aspectos metodológicos se resaltan en la Tabla 2. Vale hacer notar que los sectores son consistentes con los usados en MMA (2018), excepto MFR. Este último se estima, en este trabajo, a partir del consumo energético para usos motrices de los sectores industria y minería para evitar doble contar este sector. También se hace una estimación para maquinaria de más de 560 kW correspondiente a la gran minería del cobre, suponiendo que todo su consumo de diésel es para este tipo de maquinaria. Los detalles en cuanto a consumos energéticos de cada sector se detallan en la sección 3 de este capítulo.

Primero se comparan las emisiones estimadas con nuestra metodología y estimaciones previas. A petición del Ministerio del Medio Ambiente, en 2017 se generó el primer inventario de emisiones de carbono negro para Chile considerando como año base 2013 (GreenlabUC, 2016). Este inventario contempló los sectores transporte, maquinaria fuera de ruta (MFR), calefacción a leña, generación de electricidad, consumo de energía en industrias, entre otros, sumando 22,6 kton de BC para el año 2013. La quema de leña se estimó responsable de un 45 % de dichas emisiones. Luego, en el Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (MMA, 2018), se estimó la evolución de las emisiones de BC para el período entre 1990 y 2016. Dicho inventario consideró los niveles de actividad que se utilizan para estimar gases de efecto invernadero, complementados por aquellos provistos en (GreenlabUC, 2016) y usando factores de emisión de la literatura. De acuerdo con este inventario, las emisiones de BC en 2016 sumaban 17,7 kton.

En la Figura 5 se ilustran las contribuciones sectoriales del presente inventario, excluyendo los sectores aéreo y marítimo. Las emisiones totales de BC en 2016 corresponden a 10 kton/a para los sectores 1 a 7. Las emisiones de los sectores aéreo y marítimo corresponden a 0,1 y 0,9 kton/a de BC, respectivamente. La Figura 4 también ilustra la diferencia de las contribuciones relativas de los sectores a las emisiones de gases de efecto invernadero y de aerosoles, en este caso, carbono negro. La Tabla 3 muestra una comparación de las emisiones de BC para 2016 entre el inventario del Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático (MMA, 2018) y el del presente estudio, así como la clasificación correspondiente del IPCC (Penman et al., 2006). En la tabla se indican brevemente las razones que explican las diferencias entre ellos.

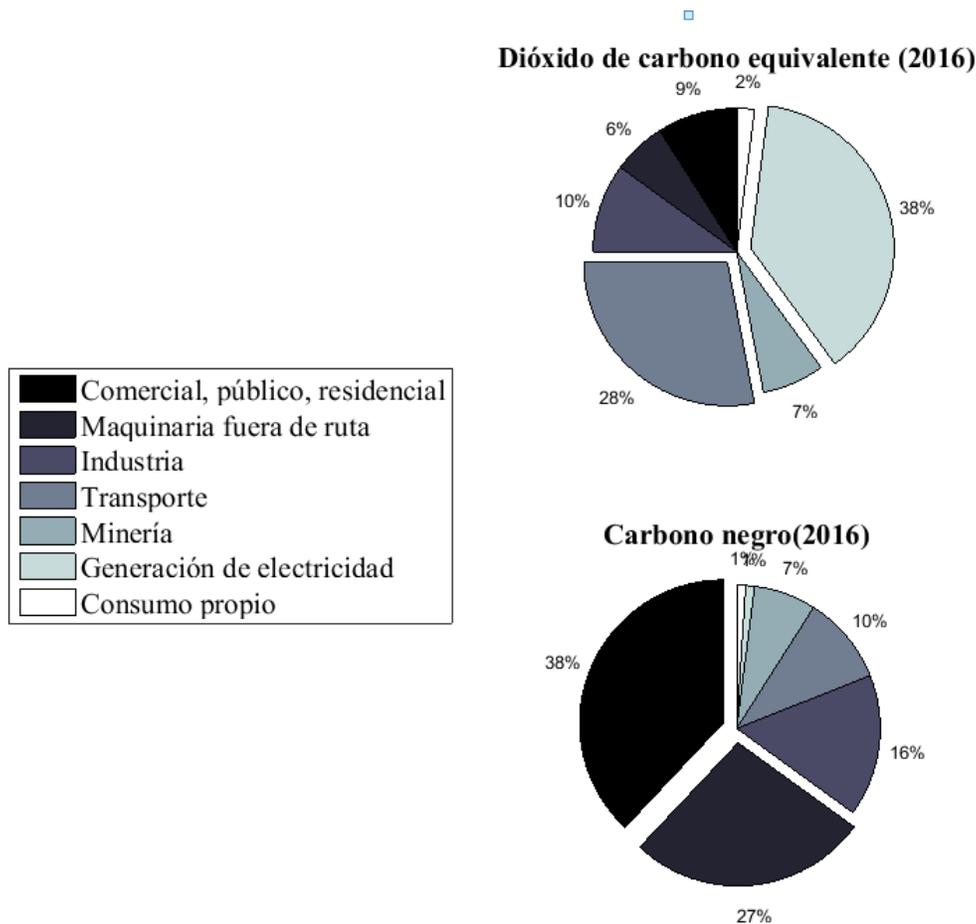


Figura 5. Participación relativa de los diferentes sectores para las emisiones de CO<sub>2eq</sub> (panel superior) y BC (panel inferior) para el año 2016. El total de emisiones de CO<sub>2eq</sub> y BC para el año 2016 corresponden a 75 Mton de CO<sub>2eq</sub> y 10 kton de BC, excluyendo los sectores: aéreo, marítimo y MFR con potencias superiores a 560 kW.

Tabla 2. Resumen de metodología usada en el presente estudio para estimar las emisiones sectoriales de BC para el año 2016.

Sector	Datos de actividad	Factores de emisión	Estimación (kton/a)	Observación
Comercial, Público y Residencial	Demanda energética según NDC (2019)	Literatura según se especifica al final de este informe.	3,8	Predomina el uso de leña en el sector residencial
Consumo Propio			$5 \times 10^{-2}$	Prevalece el uso de electricidad y gas natural
Industria			1,7	Se consideró abatimiento en el sector de papel y celulosa de 90 %.  En la categoría “industrias varias” existe un significativo uso de leña.  Se resta el uso motriz de diésel
Maquinaria Fuera de Ruta	Demanda energética de los sectores industria y minería para usos motrices en base a diésel	(GreenlabUC, 2016)	2,8	Se deriva del uso motriz de diésel de industria y minería. Excluye maquinaria de más de 560 kW  La proyección se basa en GEASUR (2014)
Minería	Demanda energética según NDC (2019)	Literatura según se especifica al final de este informe.	0,7	Se resta el uso motriz de diésel
Transporte	Consumo energético por tecnología vehicular, considerando toneladas por kilómetro (TKM) y pasajeros transportados por kilómetro (PKM).	(SECTRA, 2014)	1,0	La demanda energética de hidrógeno se considera como emisiones nulas y no contribuye a la actividad (TKM, PKM)
Generación de electricidad	Generación de electricidad por tecnologías para satisfacer la demanda energética de los distintos sectores.	Literatura según se especifica al final de este informe.	0,1	Supone uso de sistemas de abatimiento y control eficientes
Aéreo	Demanda energética según NDC (2019)	(SECTRA, 2014)	0,1	No forma parte del paquete de medidas contempladas en (NDC, 2019).
Marítimo			0,9	
MFR Gran Minería del Cobre	Demanda energética según NDC (2019)	(GreenlabUC, 2016)	2,0	Se deriva de los usos motrices de la subcategoría cobre y aplica a maquinaria de más de 560 kW. No forma parte escenarios en NDC (2019).

*Tabla 3 Emisiones de carbono negro del año 2016 del sector energía agrupados según códigos del IPCC (kton). Aquí se compara la estimación original y la corregida por este trabajo. Notar que aquí sí se muestran los sectores aéreo y marítimo.*

<b>Código IPCC</b>	<b>Sector IPCC</b>	<b>(MMA, 2018) kton BC</b>	<b>Este trabajo kton BC</b>	<b>Sectores incluidos</b>	<b>Razón de la diferencia</b>
1.A.1.	Industrias de la energía	0,2	0,1	-Generación de Electricidad -Consumo Propio	Se usó un factor de emisión distinto, respaldado en la literatura científica (Bond, 2004).
1.A.2.	Industrias manufactureras y de la construcción	9,7	5,2	-Industria -MFR -Minería	Se supone abatimiento de partículas en las industrias de papel y celulosa, las que tienen el 75 % de las emisiones de BC en este grupo.
1.A.3.	Transporte	3,0	2,0	-Transporte -Aéreo -Marítimo	Se considera disminución de partículas según normativa vehicular más reciente.
1.A.4.	Otros (incluyendo el sector residencial)	4,8	3,8	-Comercial -Público -Residencial	Pesca se incluyó en Industria (1.A.2).  Considera un consumo de leña menor, según datos provistos por el MMA para este estudio.
	<b>Total</b>	<b>17,7</b>	<b>11,1</b>		

Los inventarios de BC presentados en las tablas 2 y 3 consideran totales nacionales sin considerar la diversa distribución espacial de las fuentes para cada sector. Dado que el carbono negro tiene un tiempo de residencia atmosférica que varía entre horas y días, su distribución e impacto es de escala regional. Por lo tanto, la distribución de las fuentes de carbono negro debe tenerse en cuenta a la hora de determinar sus impactos y diseñar medidas de mitigación. En la Figura 6 se muestra la distribución espacial de las emisiones de carbono negro basada en la distribución estimada de MP2.5 asociadas a los sectores residencial y transporte (Huneus, com. personal). Esta imagen permite inferir que la mitigación de dichos sectores tendrá impactos heterogéneos en el territorio continental de Chile.

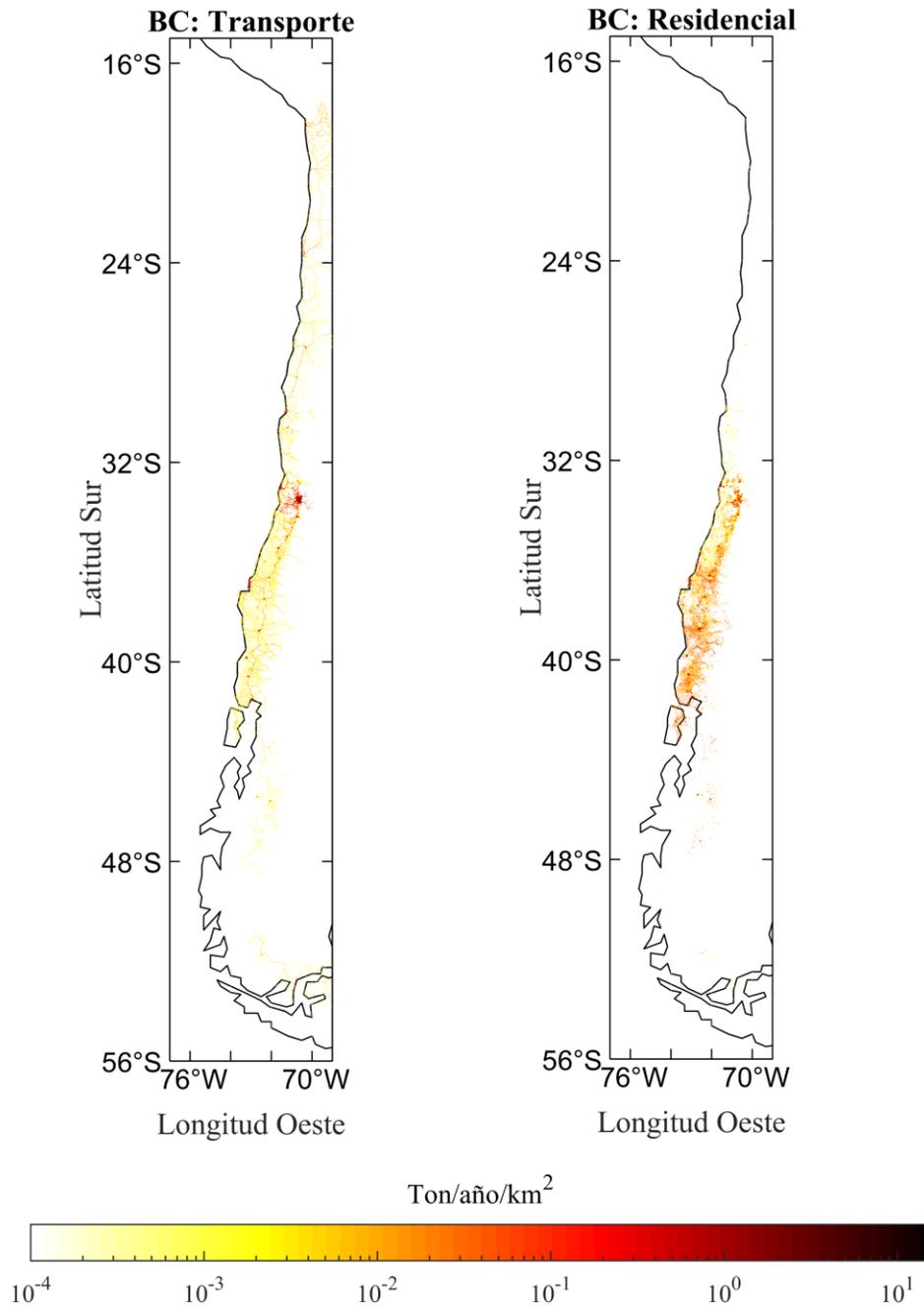


Figura 6. Distribución espacial sobre el territorio continental de Chile de las emisiones de carbono negro y/o material particulado completamente respirable para el año 2016 con una resolución espacial de  $1 \text{ km}^2$ . A la izquierda se presenta el sector transporte y, a la derecha, el sector residencial. Mientras el primero refleja la distribución caminera y la densidad de flujos vehiculares, el segundo sigue la distribución de la población y, en primer orden, el uso de leña en la zona central y sur de Chile. Esta distribución es un producto desarrollado por Nicolás Huneeus et al. Los flujos de emisiones, sumados sobre todo el territorio, corresponden a las sumas anuales de emisiones de los sectores transporte y residencial indicados en la Tabla 2.

## 2) Escenarios de mitigación

Para este estudio se evaluaron tres escenarios de mitigación, los cuales se denominan arbitrariamente por parte de los especialistas de CR2: a) políticas actuales; b) carbono neutralidad y c) carbono neutralidad +. Cada uno de ellos se explica a continuación. Los dos primeros corresponden a los escenarios considerados en la actualización de la NDC para gases de efecto invernadero y el tercero es una propuesta de este trabajo, relevando el carácter urbano de las emisiones de carbono negro.

### a) *Escenario de políticas actuales*

El escenario políticas actuales consiste en proyecciones de consumo energético desde el 2016 hasta el 2050, en el cual se consideran las medidas de mitigación que afectan los consumos de energía. Estas medidas se encuentran actualmente en implementación o en fase de planificación, considerándose altamente probable su implementación. Estas medidas ya se consideraron en Tercer Informe Bienal (MMA, 2018). Los mismos fueron generados por el Ministerio de Energía y provistos al Ministerio del Medio Ambiente, quienes nos traspasaron la información. A este escenario se le considera como línea base.

### b) *Escenario de “carbono neutralidad”*

El escenario “carbono neutralidad” consiste, al igual que el escenario anterior, en proyecciones de consumo energético desde el 2016 al 2050. El mismo se deriva de la proyección de las emisiones de gases de efecto invernadero, las cuales, a su vez, resultan de las medidas de mitigación contempladas en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile (NDC, 2019). Dichas medidas son mayoritariamente de carácter tecnológico y de cambio de fuentes de energía. En el caso de este escenario sólo se contó con las emisiones de gases de efecto invernadero y por lo tanto se debieron ajustar los consumos energéticos de modo de reproducir dichas emisiones. El procedimiento se muestra en el Anexo 2. En esencia, la proyección correspondiente para carbono negro se reconstruyó a partir de las emisiones totales de CO<sub>2eq</sub>, usando una relación simple entre los consumos energéticos y emisiones del escenario políticas actuales, para estimar los consumos energéticos del escenario de “carbono neutralidad”.

### c) *Escenario de “carbono neutralidad +”*

El escenario de “carbono neutralidad +” contempla dos medidas adicionales a las del escenario de “carbono neutralidad”. Como se verá en la sección siguiente, la “carbono neutralidad” resulta en una reducción sustantiva de las emisiones nacionales de carbono negro. No obstante, como esas medidas no consideran la quema de leña pues la misma se supone neutral en términos de dióxido de carbono, el escenario no redanda en beneficios relevantes en términos de calidad de aire y salud en zonas urbanas. Tampoco aporta de modo sustancial a enfrentar la pobreza energética que afecta a más de un millón de hogares en la zona central y sur del país (Billi et al., 2018). Por ello, para enfatizar la mitigación en zonas urbanas, se decidió añadir dos medidas.

La primera medida añadida es calefacción distrital, la cual emerge de las políticas de sostenibilidad energética y ambiental, e.g., (EBP, 2018). Este escenario supone implícitamente un esfuerzo coordinado y de gran escala de parte del Estado para superar la pobreza energética que afecta a una parte significativas de nuestros ciudadanos. La misma es

una medida de carácter transformacional coherente con abordar los problemas de inequidad socio-ambiental que afectan a Chile, afín a paliar los impactos de la contaminación atmosférica domiciliar y extra domiciliar, y a disminuir nuestra vulnerabilidad ante el cambio climático, e.g., (Krellenberg et al., 2017; Smith y Henríquez, 2019).

La segunda medida de mitigación se refiere a la aplicación de una norma de emisión más exigente que la actual para la maquinaria fuera de ruta (<http://bcn.cl/1yok8>). Una norma de estas características se encuentra en discusión en el Ministerio del Medio Ambiente. Hay que hacer notar que 46% de las emisiones de CO<sub>2</sub> del sector MFR corresponden a la actividad relacionada con la construcción (GEASUR, 2014). En nuestro estudio, suponemos que la construcción ocurre mayoritariamente en zonas urbanas, siendo una medida relevante en dicho contexto.

Con todo, suponemos:

- **Calefacción distrital:** Esta medida contempla un cambio de la calefacción tradicional a leña (estufa a leña) a un sistema de calefacción distrital, el cual conlleva una reducción en el consumo de energía por vivienda y reducción de las emisiones de material particulado, incluyendo carbono negro, producto del uso de leña. El supuesto utilizado en este caso fue que las regiones con mayor consumo de leña (Regiones: VII, VIII, IX, X y XIV), e.g., Schueftan et al. (2016) pasan desde la condición actual con calefacción a leña, a un sistema de calefacción distrital en un 100% al año 2050, aumentando linealmente en el tiempo la penetración de esta tecnología. De esta forma, el consumo de leña por medio de una estufa tradicional se elimina al 2050.
- **Normativa para maquinaria fuera de ruta:** Esta medida supone la implementación de una nueva normativa, más estricta, para maquinaria fuera de ruta, suponiendo una entrada en vigor desde el año 2021.

### 3) **Consumos energéticos sectoriales**

Se evaluaron diferentes sectores energéticos de Chile, siendo estos los sectores: Aéreo, Comercial, Consumo Propio, Industria, Maquinaria Fuera de Ruta, Marítimo, Minería, Público, Residencial y Transporte. A continuación, se detalla la composición de cada uno de los sectores y la estructura adoptada en cada uno.

#### **a) Aéreo**

El sector aéreo se conforma de los consumos de combustibles en el sector transporte que corresponde a kerosene de aviación y gasolina de aviación, siendo utilizados para aviación comercial y privada respectivamente. El kerosene de aviación representa más del 99% del consumo energético del sector para todo el periodo. Por otro lado, como ya se indicó, las emisiones de este sector son apartadas del análisis general en los resultados pues los escenarios discutidos en NDC (2019) no las contemplan y estimarlas en propiedad excede el alcance de este trabajo. Por ello, los consumos de este sector no consideran cambios entre los tres escenarios, esto es, en los tres escenarios se supone la misma evolución de los consumos energéticos del sector aéreo, como se ilustra en la Figura 7. Llama la atención que se considere una baja hacia 2030 pues en general es un sector cuyas crecientes emisiones son de preocupación del mismo sector (Ver <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/default.aspx>).

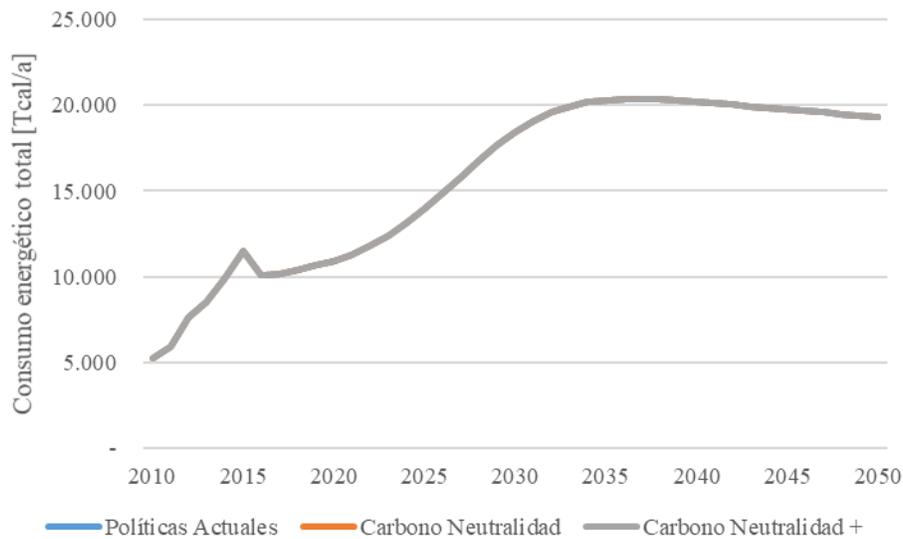


Figura 7 Consumo energético anual del sector aéreo en Tcal. Se considera el mismo para todos los escenarios pues no se contemplan medidas de mitigación.

Con respecto a este sector se debe señalar que, primero, solo se consideró que el sector aéreo consume kerosene de aviación, debido al dominio de este en todo el periodo. Segundo, la reconstrucción del periodo 2010-2015 se hizo en base a los datos de (SECTRA, 2014). Las emisiones de este sector se estimaron con una metodología *top-down*, vale decir, se estimaron con el consumo energético en los tres escenarios y un factor de emisión. Se considera el mismo consumo energético para todos los escenarios pues no se contemplan medidas de mitigación para este sector. Como se indicó antes, el sector de aviación es particularmente relevante en el contexto climático en tanto sus emisiones ocurren en una alta proporción en altura, e.g., (Brasseur et al., 2015; IPCC, 1999; Lund et al., 2017). Por otro lado, la aviación también tiene un impacto sobre la calidad del aire en tanto durante el despegue y el aterrizaje, los motores están forzados dando lugar a emisiones significativas de gases y partículas (Bo et al., 2019; Grobler et al., 2019; Phoenix et al., 2019). El crecimiento de las emisiones de la aviación a escala global hacen buscar con ahínco combustibles alternativos y modos de regulación de las emisiones en el marco de las legislaciones nacionales e internacionales (Blakey et al., 2011; Smith y Ahmad, 2018). También en Chile se ha avanzado en la regulación del sector (<http://bcn.cl/2c1uz>).

### **b) Comercial**

El sector comercial consiste en diferentes actividades de consumo energético relacionadas con el comercio, como lo son: sistema bancario, servicios de salud privados (clínicas), centros comerciales, supermercados, entre otros. El consumo de este sector está dominado por uso de electricidad y diésel (BNE, 2017). Normalmente el sector comercial se encuentra bajo la categoría CPR (Comercial, Público y Residencial). La demanda energética generada por este sector es comparable a la del sector residencial pero no así las emisiones de BC dado que mientras en el sector residencial predomina el uso de leña, en el sector comercial predomina la electricidad, que no contabiliza emisiones directas de BC. A

continuación, se presentan los consumos energéticos totales del sector comercial para los tres escenarios.

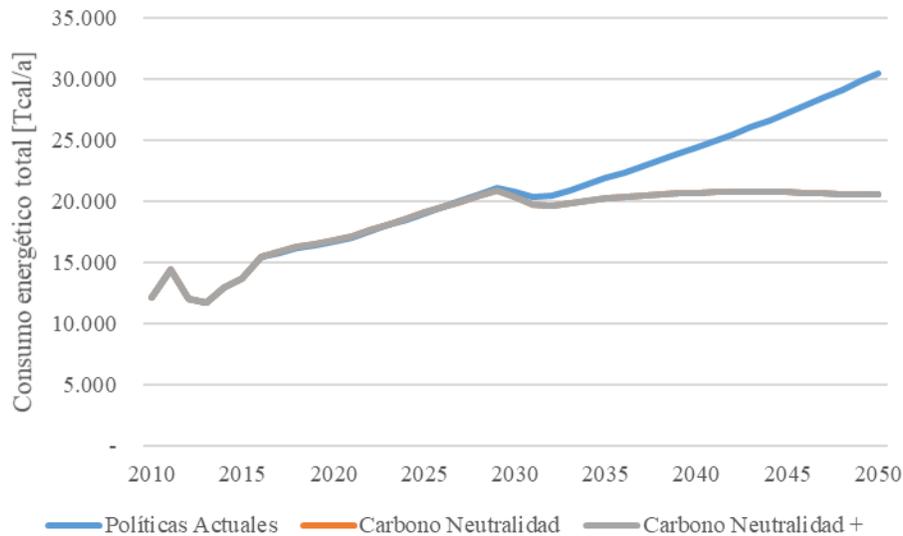


Figura 8 Consumo energético del sector comercial para los tres escenarios.

Al igual que el caso anterior, las emisiones de este sector se estimaron con una metodología *top-down*, diferenciando entre los diferentes energéticos utilizados en este sector. Para este sector los consumos energéticos solo cambian en el tiempo en los escenarios de políticas actuales y de carbono neutralidad. Esto se debe a que el escenario carbono neutralidad + no considera medidas en este sector, por lo tanto, los consumos no cambian. A continuación, se presentan la evolución en la participación de los energéticos en el sector comercial para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad. Cabe mencionar que la periodicidad de los resultados es anual, sin embargo, para efectos de lectura, se presentan cada cinco años.

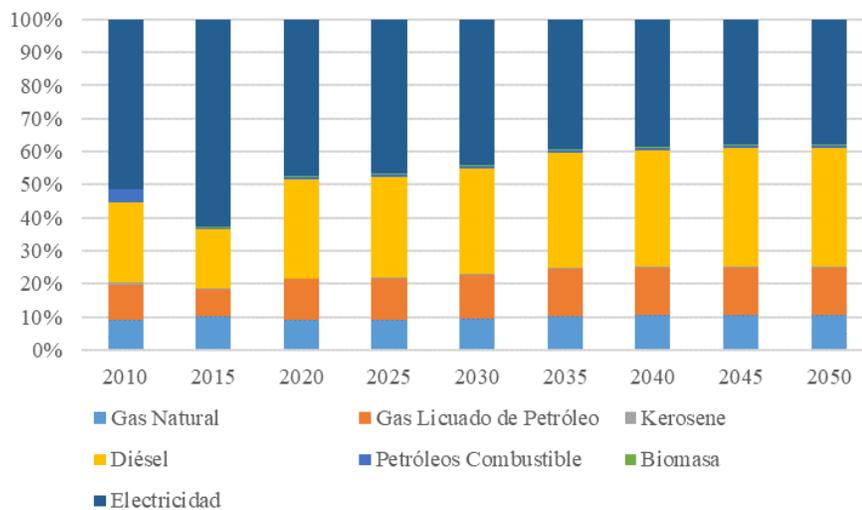


Figura 9 Evolución del uso porcentual de los energéticos para el sector comercial en el escenario políticas actuales.

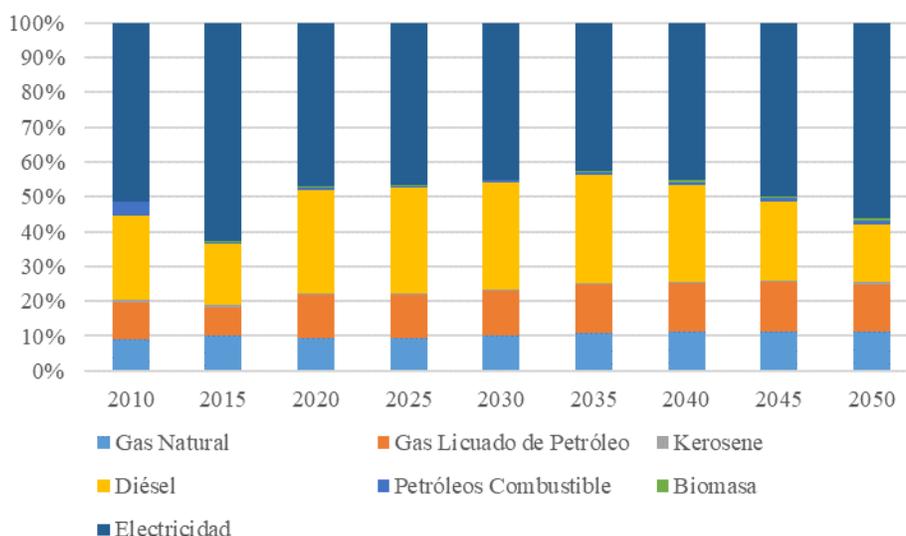


Figura 10 Evolución del uso porcentual de los energéticos para el sector comercial en el escenario de “carbono neutralidad”.

De las figuras anteriores se desprende que el mayor cambio en los energéticos en el sector comercial es la baja en el consumo de diésel en el escenario carbono neutralidad. Para el escenario políticas actuales, el máximo relativo de consumo de diésel llega en el año 2035, para luego mantenerse con la misma participación hasta el 2050. Este máximo es cercano al 60% del total del consumo de energético del sector. Por otro lado, para el escenario carbono neutralidad, el consumo llega a un máximo relativo de consumo de diésel, también, en el año 2035, solo que menor a 60%.

La reconstrucción del periodo 2010-2015 se realizó en base a los consumo de los Balances Nacionales de Energía (BNE), disponibles en <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>. A continuación, se presentan una tabla resumen de los valores utilizados en la reconstrucción obtenidos de los diferentes BNE.

Tabla 4 Consumos de energía de diferentes energéticos reportados por los BNE para el sector comercial [Tcal/a].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Gas Natural</b>	1.118	1.091	1.095	1.153	1.585	1.392
<b>Gas Licuado de Petróleo</b>	1.289	1.439	1.524	300	1.125	1.108
<b>Kerosene</b>	12	14	6	10	16	15
<b>Kerosene de aviación</b>	61	64	13	71	10	69
<b>Diésel</b>	2.912	4.696	2.610	2.401	1.601	2.422
<b>Petróleos Pesados</b>	491	513	442	292	348	67
<b>Leña y Biomasa</b>	-	10	0	23	90	54
<b>Electricidad</b>	6.157	6.534	6.265	7.455	8.093	8.402
<b>Gas de Refinería</b>	-	0	-	-	-	-
<b>Gas Corriente</b>	76	83	80	38	70	48
<b>Total</b>	<b>12.115</b>	<b>14.445</b>	<b>12.035</b>	<b>11.743</b>	<b>12.935</b>	<b>13.577</b>

Los consumos energéticos pequeños, como lo son el gas de refinería y el gas corriente, se sumaron al consumo de electricidad para simplicidad de los resultados. Para el caso del kerosene, este está compuesto por los consumos de kerosene y kerosene de aviación, también, por simplicidad de los resultados.

**c) Consumo Propio**

Este sector corresponde a la demanda energética por auto consumo de los sectores transformadores de la energía, vale decir, son consumos de energía de algún energético que es producido por quien lo consume. Los principales energéticos utilizados son: electricidad y gas natural (BNE, 2017). A continuación, se presentan los consumos energéticos para los tres escenarios. Para el sector consumo propio ocurre lo mismo que en el caso del sector aéreo donde no se encuentran diferencias en los consumos energéticos entre los tres escenarios. Las emisiones de este sector fueron estimadas con una metodología *top-down*. Por otra parte, se presentan la evolución de los energéticos para el sector consumo propio.

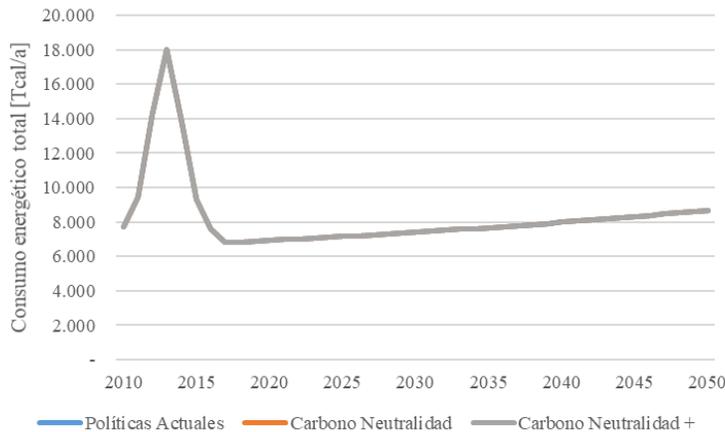


Figura 11 Consumo energético (en Tcal/a) del sector consumo propio para los tres escenarios.

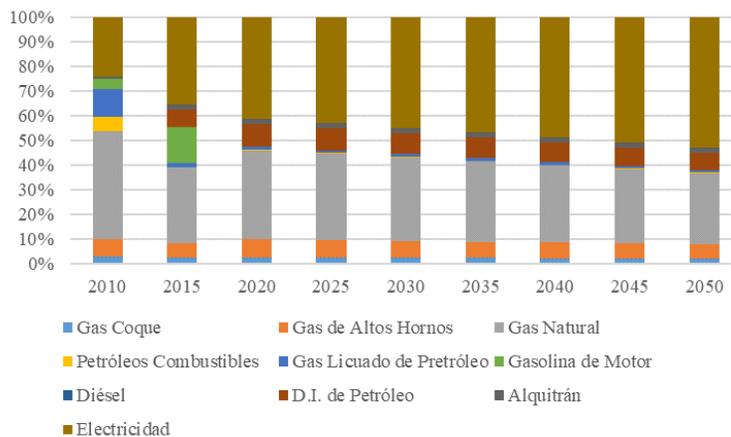


Figura 12 Evolución del consumo porcentual de los energéticos para el sector consumo propio en los tres escenarios.

Como se mencionó anteriormente, no hay cambios en el sector consumo propio, por lo que la evolución de los energéticos en el sector es válida para los tres escenarios. Con respecto a las evoluciones, se observa un dominio entre electricidad y gas natural, donde este último decrece con el paso de los años. Por otra parte, y, al igual que en el caso anterior, el periodo 2010-2015 es reconstruido con datos provenientes del BNE. A continuación, se presentan una tabla resumen de los datos obtenidos del BNE.

*Tabla 5 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el sector consumo propio [Tcal/a].*

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Gas Coque</b>	237	315	361	277	265	235
<b>Gas de Altos Hornos</b>	521	889	827	608	531	552
<b>Gas Natural</b>	3.356	4.926	2.582	6.759	4.850	2.854
<b>Petróleos Combustible</b>	459	66	-	375	88	34
<b>Gas Licuado de Petróleo</b>	853	671	144	451	167	153
<b>Gasolina de Motor</b>	-	-	1.118	863	-	-
<b>Diésel</b>	-	-	119	391	319	1
<b>D.I. de Petróleo</b>	-	-	5.390	4.796	3.831	672
<b>Alquitrán</b>	61	177	173	160	155	195
<b>Electricidad</b>	1.867	2.313	3.448	3.266	3.192	3.296
<b>Gas Corriente</b>	-	2	2	8	1	0
<b>Gas de Refinería</b>	2	2	2	1	2	1
<b>Nafta</b>	324	80	24	35	300	1.344
<b>Kerosene</b>	-	-	47	-	-	0
<b>Total</b>	<b>7.679</b>	<b>9.441</b>	<b>14.236</b>	<b>17.991</b>	<b>13.700</b>	<b>9.338</b>

En este caso, las demandas de gas de refinería y gas corriente pasan a ser demanda de electricidad, por simplicidad de los resultados. Para el caso de la nafta, al no contar con factores de emisión, esta se incluye a la demanda de motor. Si bien estos cambios podrían tener consecuencias en las emisiones finales, debido a la baja demanda de cada uno, se decide hacer esta agrupación.

#### *d) Industria*

Este sector se compone de los consumos energéticos de las diferentes industrias, entre ellas se encuentran las industrias de: papel y celulosa, siderurgia, petroquímica, cemento, azúcar, pesca y otras industrias. Dicha categorización proviene de las categorías entregadas por los balances nacionales de energía, donde se separan los consumos del sector industrial y minero. Los principales energéticos utilizados en el sector industrial son biomasa y electricidad (BNE, 2017), donde la biomasa se utiliza mayormente (aproximadamente un 3/4 del total del consumo) en las industrias de papel y celulosa. Cabe mencionar que las emisiones de este sector se estimaron con una metodología *top-down*. A continuación, se presentan los consumos de energía para los tres escenarios.

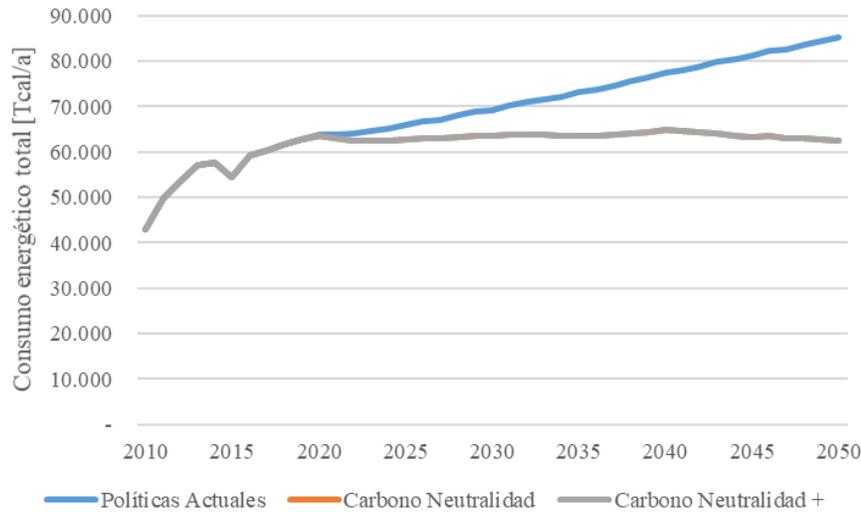


Figura 13 Consumo energético del sector industria para los tres escenarios.

Al igual que los sectores anteriores los consumos energéticos del escenario carbono neutralidad y carbono neutralidad + son los mismos, debido a que no hay medidas extras en dicho sector. Para este estudio el sector industria sirve como insumo del sector maquinaria fuera de ruta, donde los consumos energéticos de diésel para usos motrices se utilizan para estimar las emisiones del sector maquinaria fuera de ruta. Por lo tanto, los consumos energéticos expuestos en la Figura 7 no contienen las demandas por usos motrices en base a diésel, lo que se traduce en una menor demanda y, por lo tanto, una menor emisión de CO<sub>2</sub>, la cual se compensa con las emisiones del sector maquinaria fuera de ruta. Por otro lado, se presenta la evolución de los energéticos en el sector industria, para este caso se presentan los energéticos para cada actividad industrial, con su respectiva reconstrucción del periodo 2010-2015.

### i. Azúcar

Para la actividad industrial correspondiente a la azúcar se tiene la siguiente evolución de los energéticos.

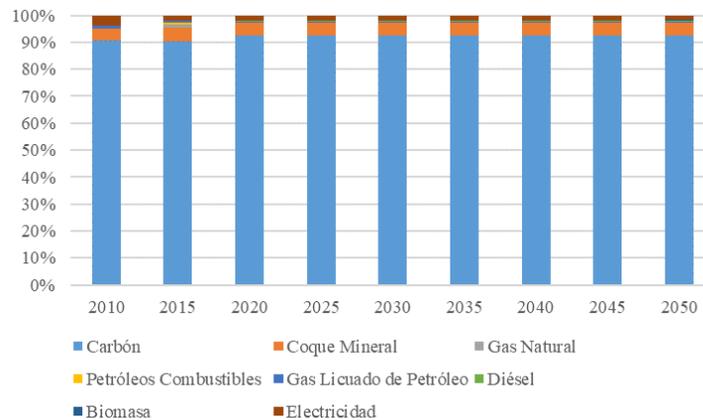


Figura 14 Evolución de los energéticos para el subsector azúcar en el escenario políticas actuales.



Figura 15 Evolución de los energéticos para el subsector azúcar en el escenario carbono neutralidad.

Para los dos escenarios se presenta la misma tendencia de los energéticos, con un dominio total del uso de carbón durante todo el periodo. Cabe destacar que, los consumos energéticos finales en el escenario carbono neutralidad son menores que en el escenario políticas actuales, lo que se refleja en menores emisiones en el sector. Por otro lado, se presenta una tabla resumen de la reconstrucción del periodo 2010-2015.

Tabla 6 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector azúcar [Tcal/a].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Carbón</b>	653	989	674	690	713	714
<b>Coque Mineral</b>	30	34	41	43	42	42
<b>Electricidad</b>	28	15	17	17	15	16
<b>Gas Licuado</b>	7	8	7	2	3	3
<b>Gas Natural</b>	-	-	0	6	0	9
<b>Leña y Biomasa</b>	-	6	7	4	6	-
<b>Petróleo Diésel</b>	1	1	1	1	1	1
<b>Petróleos Combustibles</b>	-	1	137	8	6	6
<b>Total</b>	<b>720</b>	<b>1.054</b>	<b>884</b>	<b>772</b>	<b>787</b>	<b>790</b>

Como se mencionó anteriormente, los consumos de diésel en usos motrices pasan a ser demandas energéticas del sector maquinaria fuera de ruta, por lo que la tabla anterior, no coincide exactamente con los valores del BNE debido a la resta de los consumos de diésel. Para obtener el consumo de diésel en usos motrices en los años reconstruidos, se utilizó la misma metodología en todas las subcategorías, por lo que se detallará al final de esta sección.

## ii. *Cemento*

Para la actividad industrial correspondiente al cemento se tiene la siguiente evolución de los energéticos.

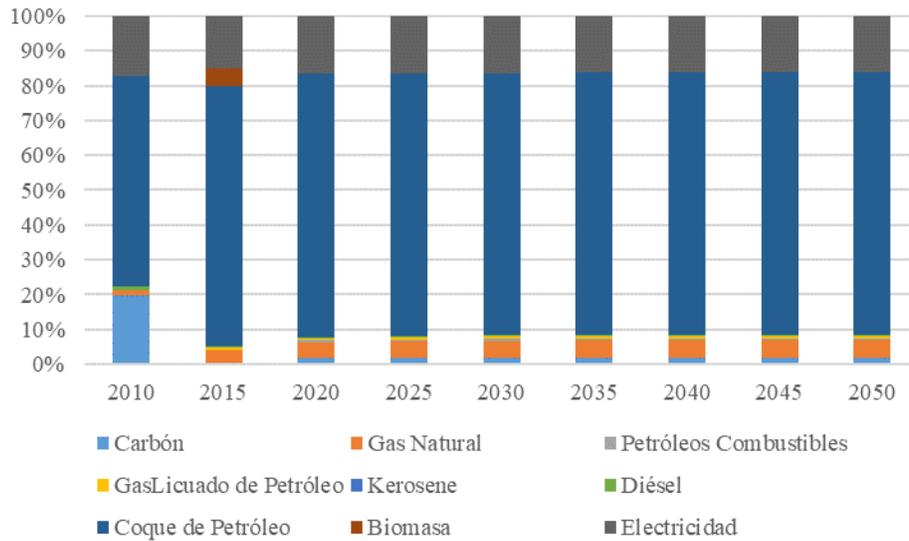


Figura 16 Evolución de los energéticos para el subsector cemento en el escenario políticas actuales.

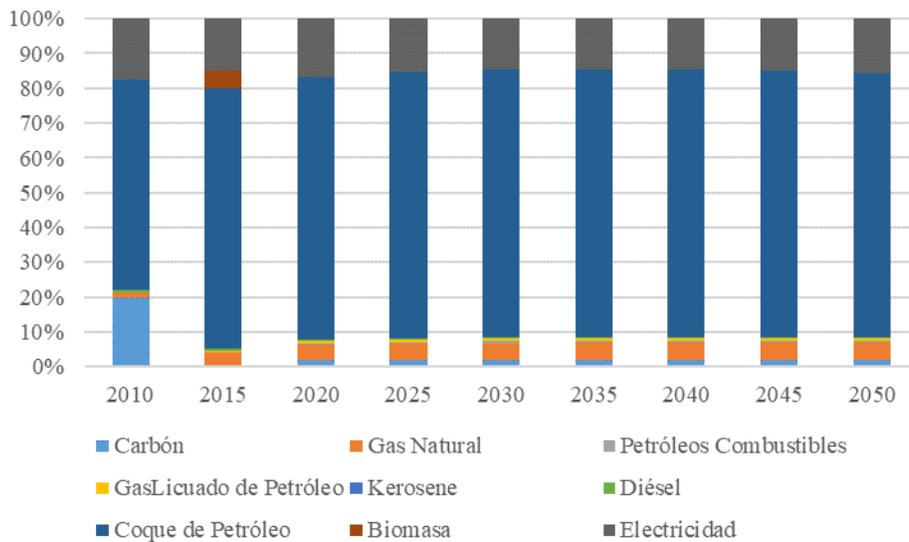


Figura 17 Evolución de los energéticos para el subsector cemento en el escenario carbono neutralidad.

Observando las figuras anteriores se puede ver que la subcategoría cemento no presentan mayores cambios en la participación de energéticos en un escenario con respecto al otro. Por otro lado, se presenta una tabla resumen de los datos obtenidos del BNE para la reconstrucción del periodo 2010 - 2015.

Tabla 7 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector cemento [Tcal/a].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Carbón</b>	536	10	31	1	1	7
<b>Coque de Petróleo</b>	1.636	1.741	1.960	2.381	1.984	2.019
<b>Electricidad</b>	470	446	480	493	384	405
<b>Gas Licuado</b>	-	15	26	0	5	12
<b>Gas Natural</b>	38	47	52	45	42	105
<b>Kerosene</b>	-	-	-	-	0	0
<b>Leña y Biomasa</b>	-	24	36	10	28	136
<b>Petróleo Diésel</b>	28	23	16	3	17	14
<b>Petróleos Combustibles</b>	-	130	223	63	35	-
<b>Total</b>	<b>2.708</b>	<b>2.437</b>	<b>2.824</b>	<b>2.997</b>	<b>2.496</b>	<b>2.698</b>

### iii. Industrias Varias

La subcategoría industrias varias es la que presenta mayores cambios entre un escenario y otro. A continuación, se presentan la evolución de los energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.

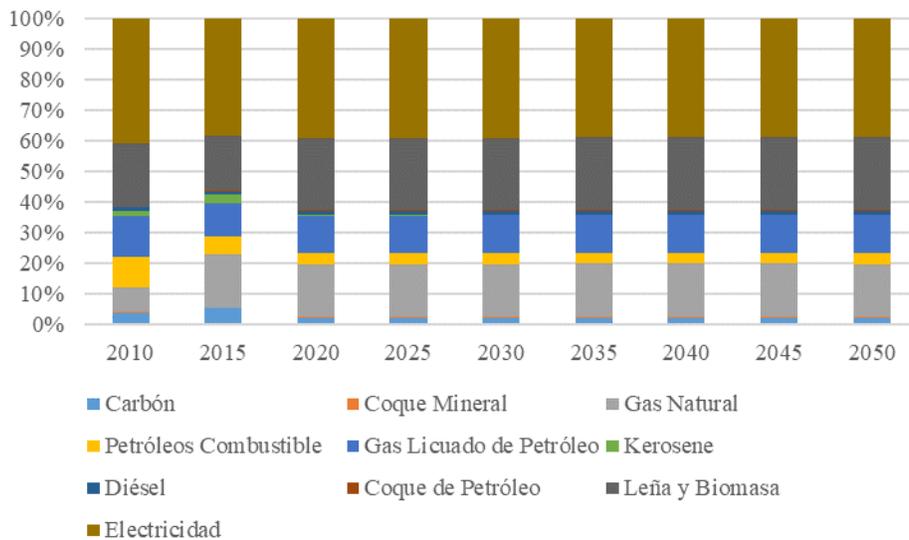


Figura 18 Evolución de los energéticos para el subsector industrias varias en el escenario políticas actuales.

Para el escenario políticas actuales se observa un amplio uso de electricidad (~40%) a lo largo de todo el periodo. Pero también hay una fuerte participación del uso de leña, cercano al 20%.

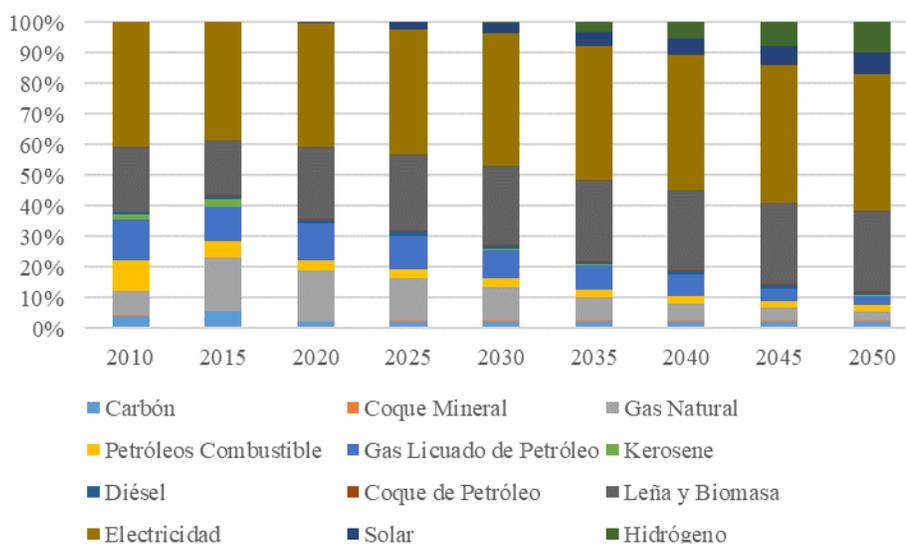


Figura 19 Evolución de los energéticos para el subsector industrias varias en el escenario de carbono neutralidad.

Por otro lado, la evolución de los energéticos para el escenario carbono neutralidad es similar al escenario anterior, sin embargo, se ve una baja sustancial en el consumo de gas natural, para el cual, su participación relativa se reemplaza con nuevos energéticos solar e hidrógeno.

Al igual que en las subcategorías anteriores, se presenta la tabla resumen de reconstrucción del periodo 2010 - 2015.

Tabla 8 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector industrias varias [Tcal/a].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Biogás</b>	-	-	-	-	19	-
<b>Carbón</b>	687	610	545	609	1.287	1.439
<b>Coque de Petróleo</b>	-	-	-	-	438	99
<b>Coque Mineral</b>	41	38	13	4	11	11
<b>Electricidad</b>	7.016	7.988	8.250	8.553	9.510	9.923
<b>Gas Licuado</b>	2.318	2.168	1.029	1.056	3.388	2.875
<b>Gas Natural</b>	1.384	693	2.483	3.486	3.428	4.471
<b>Kerosene</b>	297	186	166	267	549	678
<b>Leña y Biomasa</b>	3.604	3.820	3.509	7.148	5.956	4.551
<b>Petróleo Diésel</b>	156	228	230	323	324	286
<b>Petróleos Combustibles</b>	1.684	3.760	2.216	2.418	1.630	1.489
<b>Total</b>	<b>17.187</b>	<b>19.491</b>	<b>18.441</b>	<b>23.864</b>	<b>26.541</b>	<b>25.821</b>

#### iv. *Papel y Celulosa*

Para la subcategoría papel y celulosa se presenta la evolución de los energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.

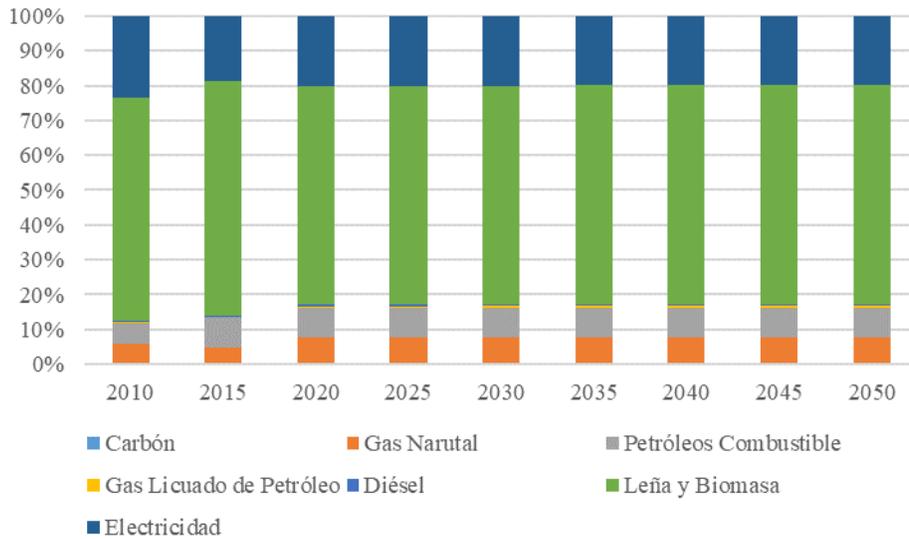


Figura 20 Evolución de los energéticos para el subsector papel y celulosa en el escenario políticas actuales.

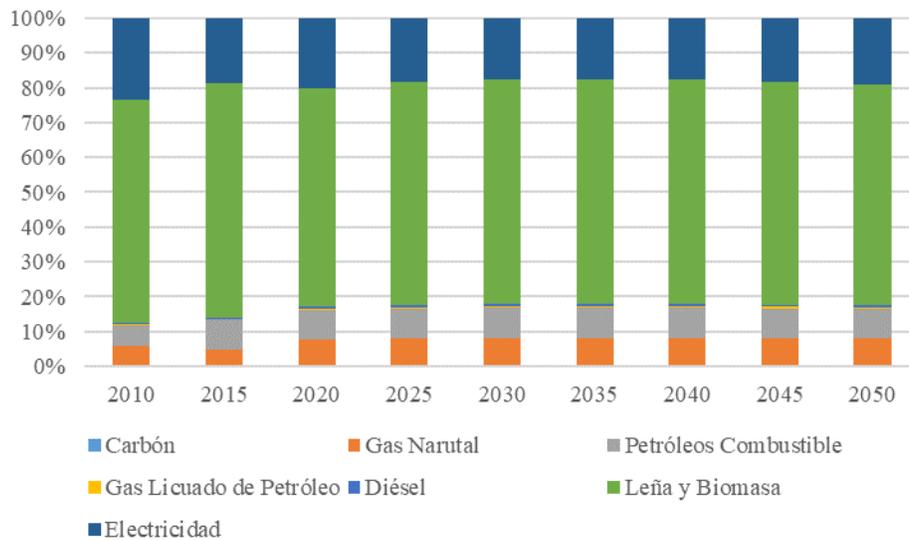


Figura 21 Evolución de los energéticos para el subsector papel y celulosa en el escenario carbono neutralidad.

Observando las figuras anteriores se desprende la ausencia de medidas en este sector. Por otro lado, es importante destacar la participación de leña dentro de los energéticos utilizados, ya que este es un gran contribuidor a las emisiones de BC. Para este estudio, se supuso que las industrias del papel y celulosa cuentan con sistemas de abatimiento, donde se supuso, también, un abatimiento de 90% de las partículas emitidas. Al igual que los casos anteriores, se presenta la tabla resumen para la reconstrucción del periodo 2010 - 2015.

Tabla 9 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector papel y celulosa [Tcal/a].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Carbón</b>	-	51	65	63	66	-
<b>Electricidad</b>	3.767	4.643	5.974	6.210	4.176	4.124
<b>Gas Licuado</b>	58	56	106	84	61	63
<b>Gas Natural</b>	976	873	1.662	676	791	1.018
<b>Kerosene</b>	0	0	0	0	12	0
<b>Leña y Biomasa</b>	10.398	12.817	13.263	13.798	15.846	14.733
<b>Petróleo Diésel</b>	76	11	41	7	22	11
<b>Petróleos Combustibles</b>	896	1.318	2.151	2.101	2.444	1.921
<b>Total</b>	<b>16.170</b>	<b>19.769</b>	<b>23.261</b>	<b>22.940</b>	<b>23.418</b>	<b>21.871</b>

#### v. Pesca

Para la subcategoría pesca se presentan las evoluciones de los energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.

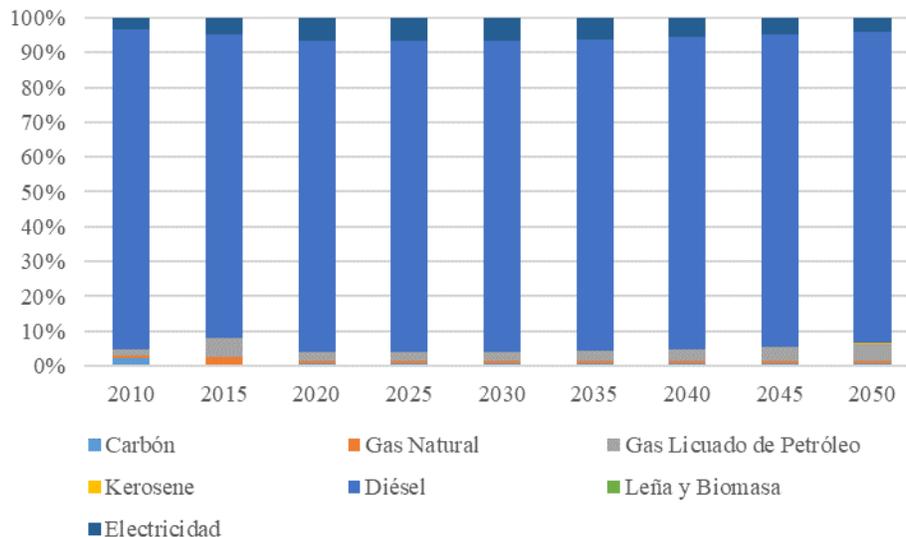


Figura 22 Evolución de los energéticos para el subsector pesca en el escenario políticas actuales.

De las figuras 22 y 23 se desprende el aumento del uso de electricidad, en menor medida, para el año 2050. Por otro lado, destaca el uso de diésel en este sector, a pesar de la resta por usos motrices. A continuación, se presenta la tabla de reconstrucción para el periodo 2010 – 2015.

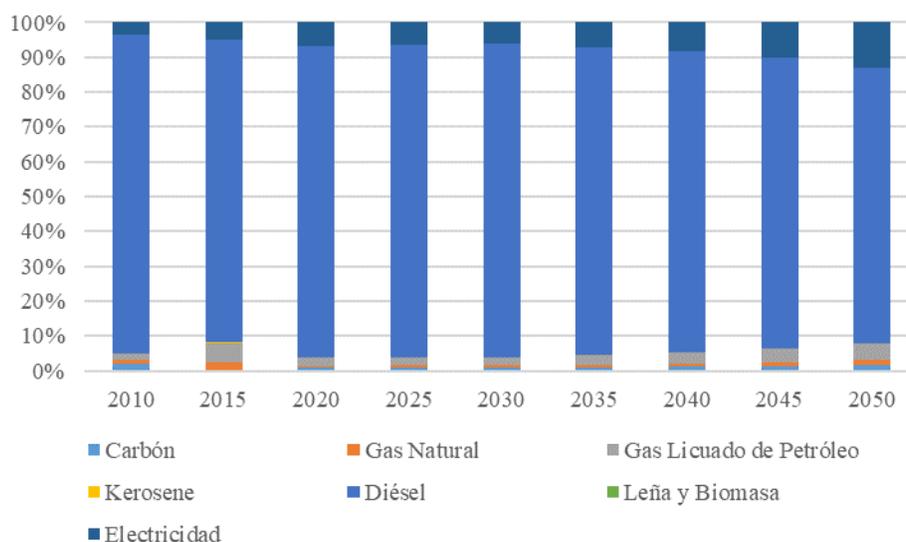


Figura 23 Evolución de los energéticos para el subsector pesca en el escenario carbono neutralidad.

Tabla 10 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector pesca [Tcal/a].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Carbón</b>	51	25	25	24	3	2
<b>Electricidad</b>	67	102	114	126	85	90
<b>Gas Licuado</b>	50	74	27	28	79	100
<b>Gas Natural</b>	23	1	1	1	0	44
<b>Kerosene</b>	-	-	-	-	-	0
<b>Leña y Biomasa</b>	-	-	-	-	15	-
<b>Petróleo Diésel</b>	2.309	3.180	1.825	1.618	1.413	1.572
<b>Total</b>	<b>2.500</b>	<b>3.383</b>	<b>1.992</b>	<b>1.798</b>	<b>1.595</b>	<b>1.808</b>

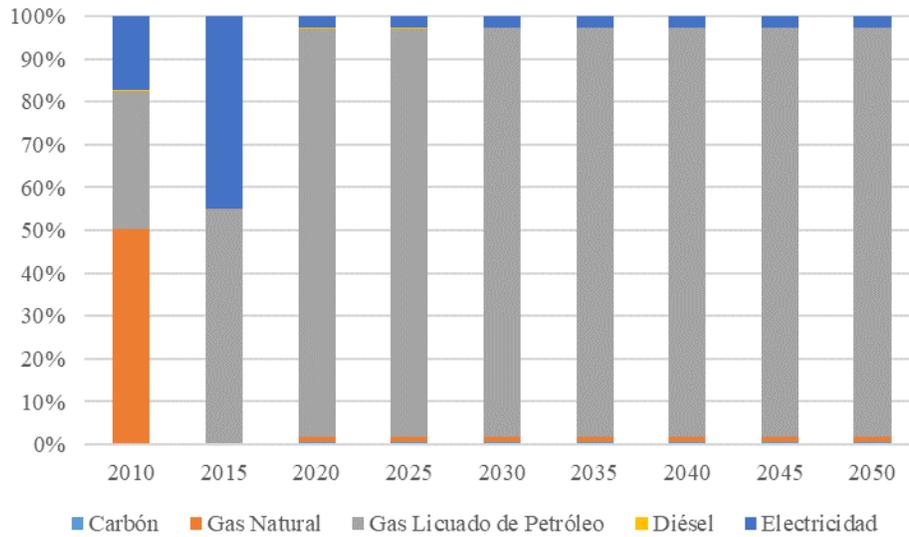
#### vi. Petroquímica

Para la subcategoría petroquímica se presentan las evoluciones de los energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.

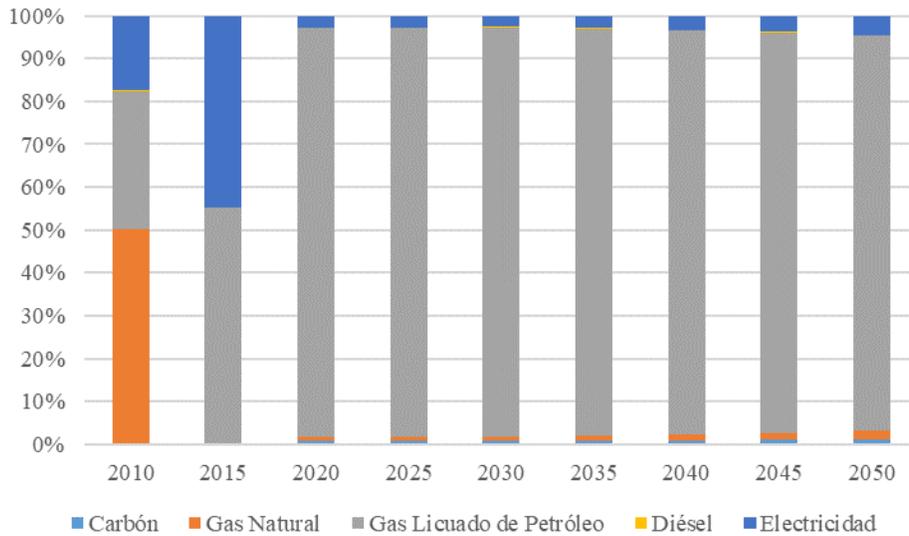
De las figuras se desprende que en esta subcategoría no se consideran medidas. Por otro lado, se presenta la tabla de reconstrucción del periodo 2010 – 2015.

Tabla 11 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector petroquímica [Tcal/a].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Carbón</b>	-	-	-	-	10	-
<b>Electricidad</b>	402	241	185	148	42	32
<b>Gas Licuado</b>	746	9	1.944	1.755	1.426	39
<b>Gas Natural</b>	1.171	1.425	1.440	1.527	17	-
<b>Petróleo Diésel</b>	4	1	0	0	2	-
<b>Petróleos Combustibles</b>	-	7	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>2.323</b>	<b>1.682</b>	<b>3.569</b>	<b>3.430</b>	<b>1.497</b>	<b>71</b>



*Figura 24 Evolución de los energéticos para el subsector petroquímica en el escenario políticas actuales.*



*Figura 25 Evolución de los energéticos para el subsector petroquímica en el escenario carbono neutralidad.*

**vii. Siderurgia**

Para la subcategoría siderurgia se presentan las evoluciones de los energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.

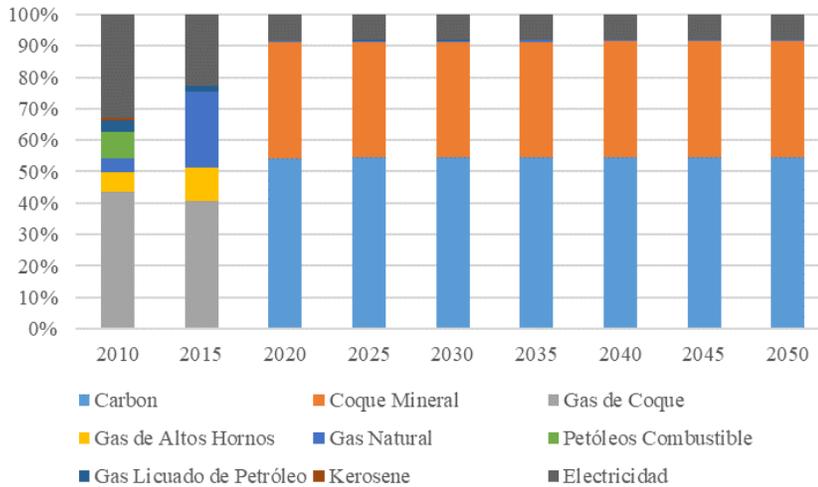


Figura 26 Evolución de los energéticos para el subsector siderurgia en el escenario políticas actuales.

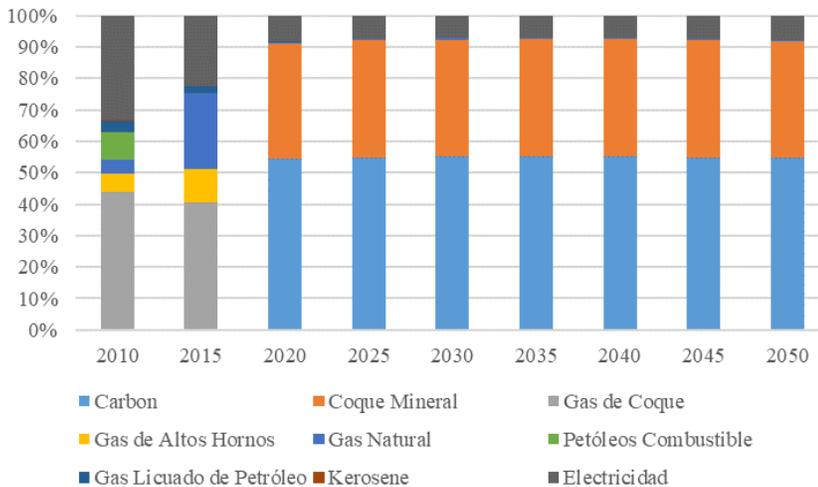


Figura 27 Evolución de los energéticos para el subsector siderurgia en el escenario carbono neutralidad.

De las figuras, al igual que el caso anterior, se desprende que en esta subcategoría no se consideran medidas. Por otro lado, se presenta la tabla de reconstrucción del periodo 2010 – 2015.

Tabla 12 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector siderurgia [Tcal/a].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Coque Mineral</b>	-	-	700	-	-	-
<b>Electricidad</b>	397	505	472	399	342	322
<b>Gas de Coque</b>	524	695	654	718	558	581
<b>Gas de Altos Hornos</b>	73	318	289	132	94	151
<b>Gas Licuado</b>	44	49	-	39	33	28
<b>Gas Natural</b>	52	2	-	-	364	346
<b>Kerosene</b>	5	-	-	-	-	-
<b>Petróleos Combustibles</b>	103	492	500	-	-	-
<b>Total</b>	<b>1.199</b>	<b>2.062</b>	<b>2.615</b>	<b>1.288</b>	<b>1.391</b>	<b>1.428</b>

Para cada de una de estas actividades industriales se descontó parte de las demandas energéticas de diésel para usos motrices. Al no contar, para el periodo 2010-2015, con una desagregación por tipo de uso (térmico o motriz) de los combustibles, se estimó un porcentaje del consumo total de diésel para usos motrices en base a las proyecciones entregadas por el Ministerio del Medio Ambiente De esta forma, el consumo de diésel para usos motrices, para cada subcategoría en el periodo 2010-2015, estará dado por la siguiente fórmula.

$$D_{M(j)} = \text{Mediana} \left( \frac{D_{M(i)}}{D_{M(i)} + D_{T(i)}} \right) * D_{Total(i,j)}$$

$D_{M(j)}$  = Diésel para usos motrices en la actividad (i) en el año (j).

$D_{M(i)}$  = Diésel para usos motrices en la actividad (i) para el periodo 2016 - 2050.

$D_{T(i)}$  = Diésel para usos térmicos en la actividad (i) para el periodo 2016 - 2050.

$D_{Total(i,j)}$  = Diésel total en el BNE para la actividad (i) en el año (j).

Luego de obtener el consumo de diésel para usos motrices en el periodo reconstruido, este se resta al consumo total de diésel reportado por el BNE. Este procedimiento se hizo para todas las actividades industriales. A continuación, se presenta una comparación de las demandas industriales entregadas y las recalculadas para estimar el sector maquinaria fuera de ruta. Los resultados se muestran para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad, se excluye del análisis el escenario carbono neutralidad + debido a que no presenta diferencia en los consumos con respecto al escenarios carbono neutralidad.

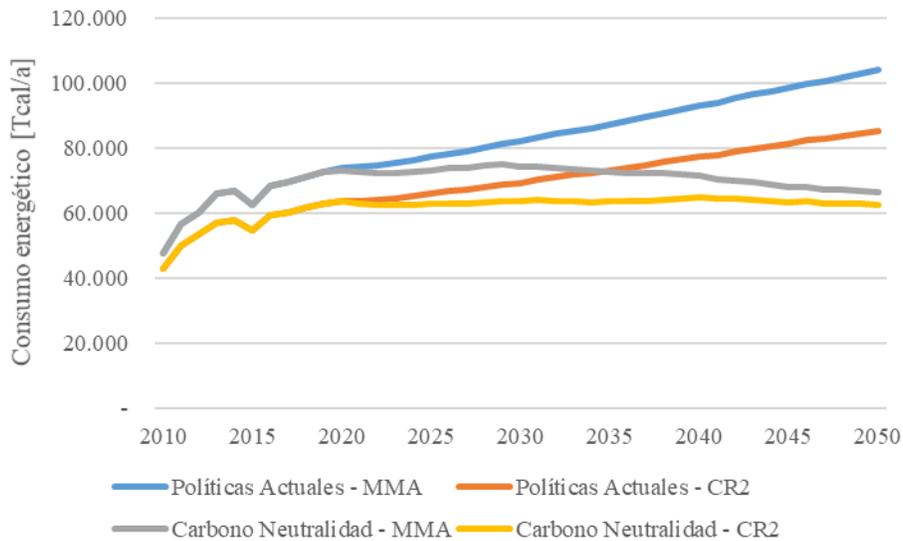


Figura 28 Comparación de los escenarios oficiales y reconstruidos para la estimación del sector maquinaria fuera de ruta.

Observando la figura 28 se ve que la disminución en los consumos energéticos es relativamente constante para el escenario políticas actuales. Por otro lado, los escenarios carbono neutralidad original y del CR2 muestran una convergencia al final del periodo; esto se debe a la inclusión hidrógeno en usos motrices en la subcategoría industrias varias. De esta forma, los usos motrices para el sector industrial en los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad presentan la siguiente tendencia.

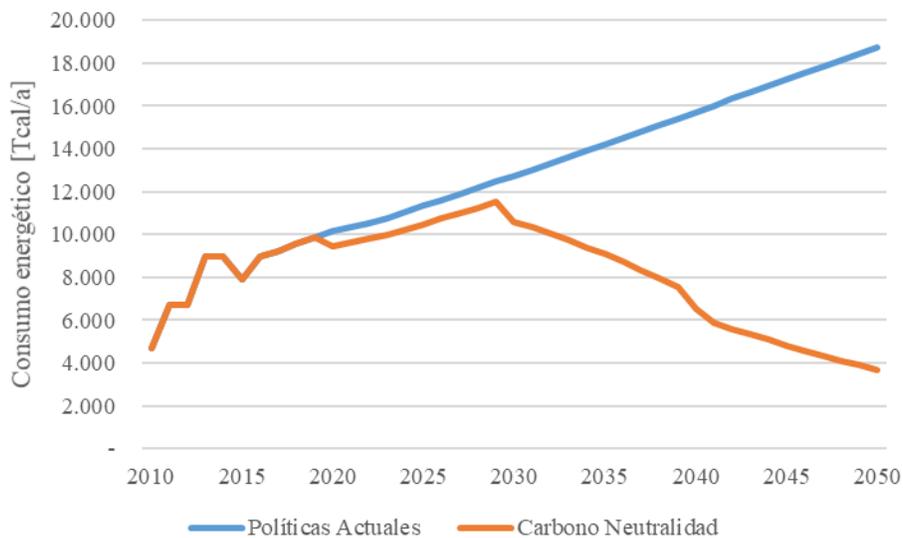


Figura 29 Consumos energéticos por usos motrices en base a diésel.

**e) Maquinaria Fuera de Ruta (MFR)**

En este sector se incluyen maquinarias móviles no destinadas al transporte de pasajeros o mercancías por carretera, aptos para desplazarse sobre el suelo, con o sin carretera (sin pavimentación) y que funcionan en base a motores de combustión interna, de encendido por compresión, con una potencia neta instalada, igual o superior a 19 kW e inferior a 560 kW. Se excluyen los motores destinados a la propulsión de automotores, locomotoras u otros elementos y equipos ferroviarios que se desplacen sobre rieles, barcos, aeronaves y vehículos de recreación. Esta definición de MFR se extrae de (GEASUR, 2014), la cual, a su vez, se basa en la definición adoptada en el Plan de Prevención y Descontaminación Atmosférica para la Región Metropolitana (<http://bcn.cl/1uwz8>) y de la definición Europea (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/ALL/?uri=CELEX%3A31997L0068>, Anexo I, Numeral 1).

Para la estimación de las emisiones del sector MFR se intentó replicar la metodología utilizada por GEASUR (2014). Sin embargo, para replicar la metodología propuesta en dicho estudio se necesita tener la codificación exacta de las maquinarias que pasan por las aduanas, la cual no se encontró en el informe GEASUR (2014) para todos los casos. Por otro lado, algunas maquinarias se repiten en la codificación de las aduanas, sin especificar la potencia específica del equipo. Esto último es crucial para determinar el nivel de actividad de la maquinaria, el cual sirve para estimar las emisiones. Dicho esto, considerando la falta de información, se optó por estimar las emisiones del sector MFR con las trayectorias de las emisiones estimadas por GEASUR (2014), complementándolo con la información de los escenarios entregados por el MMA.

Las emisiones de MFR se estiman en base a los consumos de diésel por usos motrices de los sectores industria y minería que se contemplan en los escenarios provistos. El sector de minería se divide en cuatro actividades de consumo energético: cobre, hierro, minas varias y salitre, en donde los consumos energéticos de las subcategorías se dividen en uso motriz y térmico, excepto en la subcategoría cobre, donde la separación de los consumos energéticos es más extensa. En dicha separación no se distingue el consumo energético por usos motrices, por lo que, para efectos de estimar las emisiones de este sector, solo se consideran los consumos energéticos de las subcategorías hierro, minas varias y salitre. El sector de la minería del cobre se incluye separadamente en la sección h a modo ilustrativo.

En el estudio realizado por la consultora GEASUR, se estiman las emisiones del sector MFR para el periodo 2013 – 2025 (GEASUR, 2014). Para obtener las trayectorias de las emisiones, se tomó el periodo 2014 – 2024 y se realizó una regresión para obtener las curvas que mejor se ajusten al periodo. A continuación, se muestran las trayectorias de las emisiones y sus respectivas curvas.

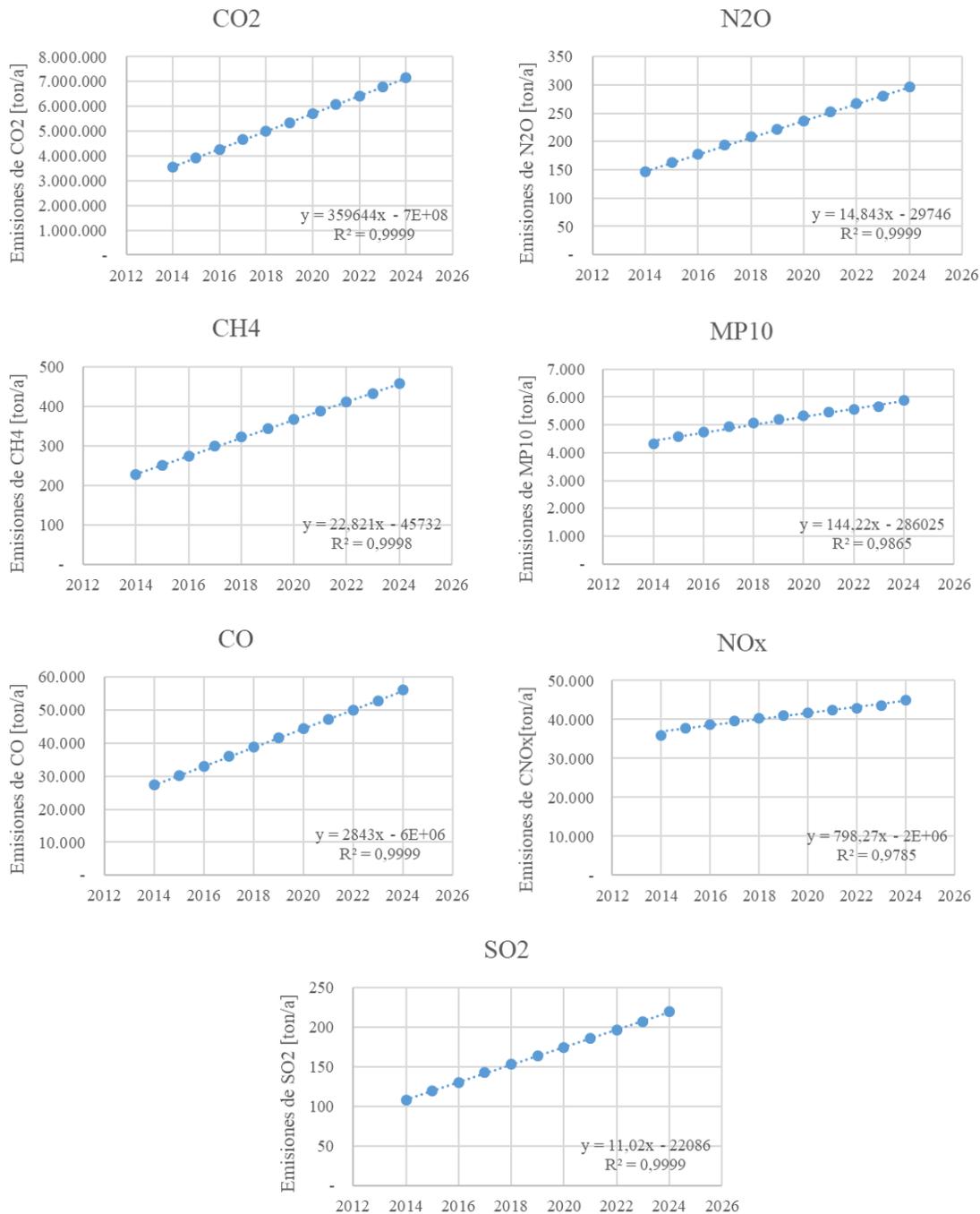


Figura 30 Emisiones estimadas por GEASUR (2014) y regresiones para cada traza.

Observando las figuras anteriores, se desprende que el mejor ajuste para todas las trayectorias corresponde a una regresión lineal. Con las regresiones realizadas, vale decir, las obtenidas en la figura anterior, se construyó el periodo 2026 – 2050. Después de obtener el periodo completo, se calcularon los crecimientos totales del periodo para cada traza. A continuación, se presenta una tabla resumen de los crecimientos totales (2050/2016) porcentuales de cada contaminante.

Tabla 13 Resumen de trayectorias de otras trazas.

Contaminantes	-Razón entre las emisiones de 2050 y 2016
CO <sub>2</sub>	3,9
N <sub>2</sub> O	3,8
CH <sub>4</sub>	3,8
MP <sub>10</sub>	2,0
CO	3,9
NO <sub>x</sub>	1,7
SO <sub>2</sub>	3,9

Observando la tabla anterior, se puede ver que los crecimientos de algunos contaminantes son similares, en particular parecidos al de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Estos crecimientos se condicen con la similitud en las curvas obtenidas en la regresión. Por otro lado, este indicador nos muestra que las emisiones de dichos contaminantes se relacionan directamente con el consumo de energía, por lo que una estimación de los demás contaminantes en base al consumo energéticos puede ser válida. Luego de esto, se calculó el crecimiento porcentual anual del consumo energético de diésel por usos motrices para estimar las emisiones totales anuales según el consumo de diésel obtenido de los sectores industria y minería. Para esto, se tomó como año base el 2016. A continuación, se presenta la ecuación utilizada para estimar las emisiones.

$$E_{i+1} = E_i * (C + 1)$$

$$C = (D_{i+1} - D_i) / D_i$$

Donde:

E<sub>i</sub>=Emisiones totales en el año i.

D=Crecimiento porcentual del consumo de diésel en los años “i” e “i+1”

De esta manera, las emisiones resultantes estarán dadas por el crecimiento porcentual en el uso de combustibles por las emisiones del año base y así sucesivamente para los demás años. Por otro lado, las emisiones de MP<sub>10</sub> y NO<sub>x</sub> se estimaron en base a la variación de estas según la cantidad de CO<sub>2</sub>. Cabe destacar que las emisiones de MP<sub>2,5</sub> se consideran que son un 97% de las emisiones de MP<sub>10</sub> (GEASUR, 2014) y que las emisiones de BC son un 60% de las emisiones de MP<sub>2,5</sub> (GreenlabUC, 2016). A continuación, se presenta la ecuación utilizada para estimar las emisiones de ambos contaminantes.

$$C_{MP10} = \frac{C_{MP} * C_{Mo}}{C_{CO2}}$$

Donde:

C<sub>MP10</sub>: Crecimiento porcentual anual final del MP<sub>10</sub>.

C<sub>MP</sub>: Crecimiento porcentual anual de la proyección de MP<sub>10</sub>.

C<sub>Mo</sub>: Crecimiento porcentual anual del consumo de diésel por usos motrices.

C<sub>CO2</sub>: Crecimiento porcentual anual de la proyección de CO<sub>2</sub>.

Para traducir las emisiones obtenidas al modelo LEAP-IBC se utilizó el número total de maquinarias obtenidas en MMA (2016) . En dicho documento se encuentran el total de maquinarias para el periodo 2013 – 2026, por lo que, el periodo 2027 – 2050 se obtuvo

mediante una regresión lineal. A continuación, se presentan la regresión realizada para el número de maquinarias totales en Chile.

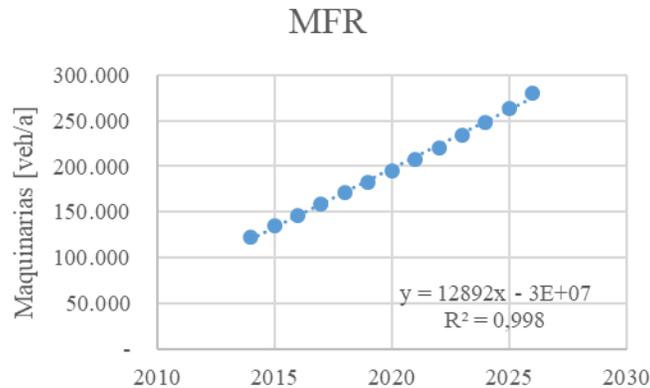


Figura 31 Maquinarias totales en Chile para el periodo 2013 – 2026 (MMA, 2016).

Para el caso de la maquinaria fuera de ruta total en Chile se observa que el mejor ajuste ocurre con una regresión lineal. Con dicha regresión, se construyó el periodo 2027 – 2050. Luego, para obtener un factor de emisión correspondiente a las emisiones obtenidas con la metodología descrita anteriormente, se divide el total de las emisiones por el número de maquinarias. De esta manera, los valores de entrada del modelo LEAP - IBC son: el número de maquinarias y el factor de emisión obtenido con la metodología descrita anteriormente. A continuación, se muestran una comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> obtenidas en este estudio y en GEASUR (2014).

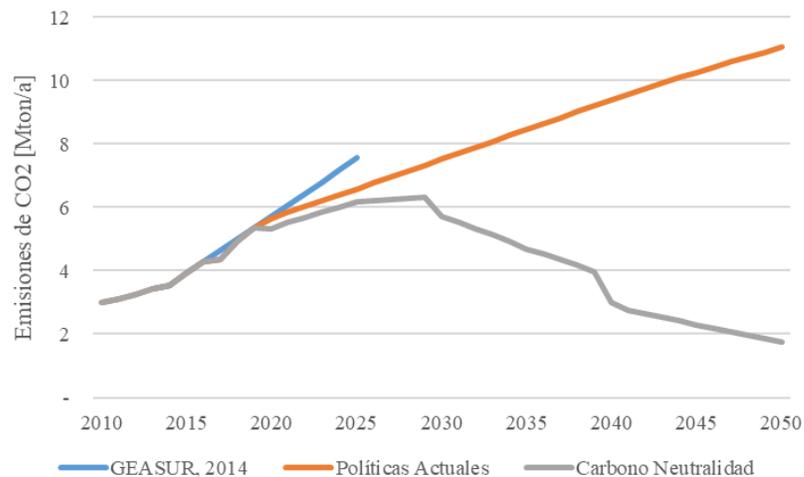


Figura 32 Comparación de las emisiones de CO<sub>2</sub> entre los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad y las estimaciones de GEASUR (2014).

De la figura se desprende que las estimaciones hechas anteriormente (GEASUR, 2014) proyectan un mayor crecimiento de la actividad del sector MFR, por otro lado, según las tendencias obtenidas en este estudio por medio de los consumos de diésel, se ve un crecimiento más conservador. Para el periodo 2013 – 2015 se utilizaron las emisiones de (MMA, 2016) y para el periodo 2010 – 2012, solo se reconstruyó el número de maquinarias,

dejando lo factores de emisión igual. Para el escenario Neutralidad + se utilizaron las trayectorias estimadas por (MMA, 2016), considerando la misma reducción. Cabe hacer notar, entonces, que la aproximación adoptada aquí es consistente con la proyección de emisiones de gases de efecto invernadero, pero eso no asegura que sea la proyección más adecuada. Tampoco, como se ha señalado, incluye a la maquinaria fuera de ruta de la gran minería del cobre, la cual se aborda separadamente en la sección h).

**f) Marítimo**

El sector marítimo se compone de los consumos de combustible provenientes de la actividad comercial marítima, en otras palabras, provenientes del cabotaje. Las demandas energéticas de este sector son cubiertas mayoritariamente con petróleo combustible. Por otro lado, al igual que en el sector aéreo, las emisiones de este sector son apartadas de los resultados generales de este estudio. No obstante, el sector marítimo es relevante tanto en el contexto de la mitigación climática como de calidad de aire (Johansson et al., 2017; Sofiev et al., 2018). Ello es de particular importancia para Chile dada la relevancia del sector exportador de nuestra economía y nuestra dependencia de importaciones (Marín et al., 2017; Martínez-López y Chica, 2020). La Organización Marítima Internacional (OMI, <http://www.imo.org>) acordó en 2017 el establecimiento de un sistema de MRV con el objetivo de que los buques informen anualmente su consumo de combustible, la carga transportada y la distancia recorrida; además, se decidió bajar a partir de Enero de 2020 el contenido de azufre del combustible (*fuel oil*) desde 3,5 a 0,5 % en masa, lo que se estima será favorable para educir el impacto por partículas. En Chile, la entidad responsable del seguimiento de esta normativa internacional es la Dirección General del Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR, <https://www.directemar.cl/>). Esta medida también ha sido relevada por la comunidad científica nacional (Farías et al., 2019).

A continuación, se presentan las demandas energéticas de este sector para los tres escenarios.

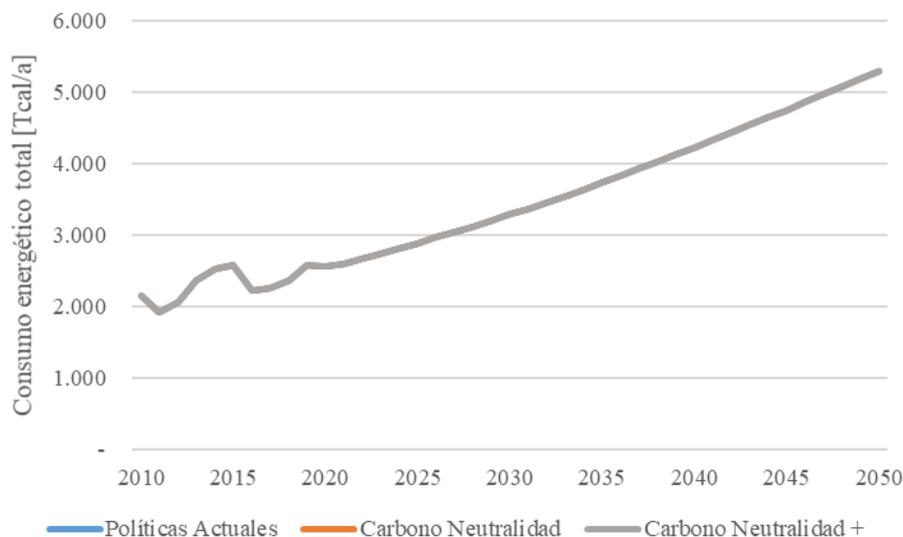


Figura 33 Consumo energético del sector marítimo para los tres escenarios.

Observando las demandas para los tres escenarios se identifica que no hay medidas específicas para la reducción del consumo en este sector, por lo que las trayectorias de las demandas son iguales para los tres escenarios. Por otro lado, debido a que la mayoría de la demanda proviene del petróleo combustible, se considera que un 100% de la demanda es petróleo combustible. La reconstrucción del periodo 2010-2015 se realizó con información de SECTRA (2014). Las emisiones de este sector se estimaron con una metodología *top-down*.

### **g) Minería**

El sector minería incluye los consumos energéticos producto de la actividad minera en el país, dentro de las cuales se encuentran las actividades de: cobre, salitre, hierro, entre otras. Estas categorías se desprenden de las utilizadas en los BNE. Los energéticos más consumidos en este sector son la electricidad y el diésel (BNE, 2017). A continuación, se presentan los consumos energéticos para los tres escenarios.

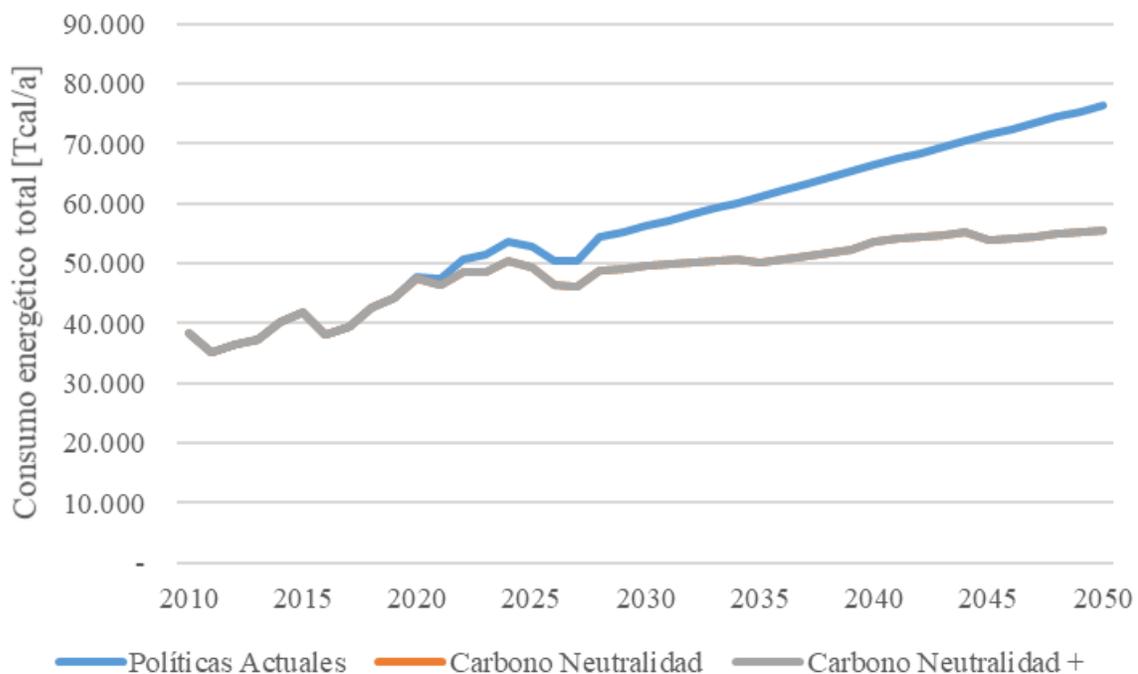


Figura 34 Consumo energético del sector minería para los tres escenarios.

Al igual que los sectores anteriores, las demandas del escenario carbono neutralidad + no cambian en comparación con el escenario carbono neutralidad. Por otro lado, el sector minería sirve como insumo para el sector MFR, donde los consumos de diésel por usos motrices se consideran para el sector MFR. A continuación, se presentan la evolución de los energéticos para cada actividad minera.

**i. Cobre**

Para la subcategoría cobre, se presentan las evoluciones de los energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.

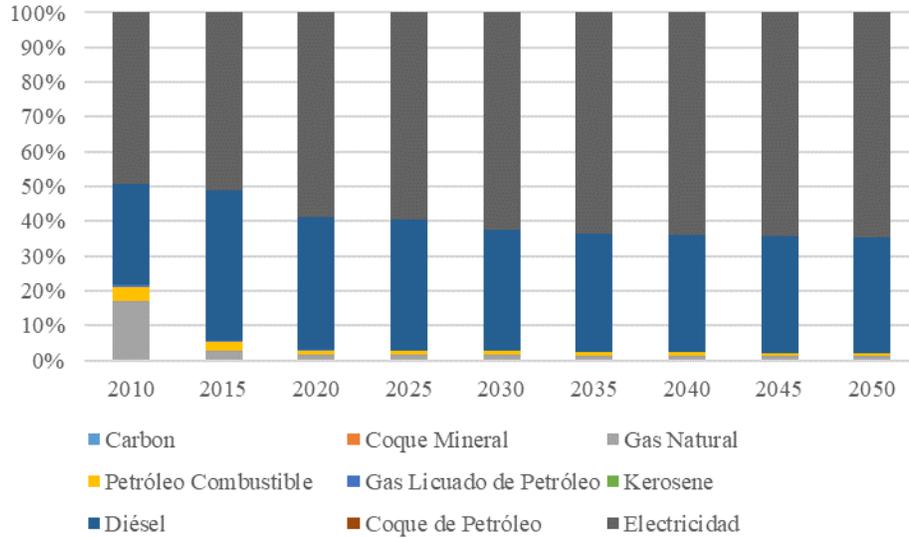


Figura 35 Evolución de los energéticos para el subsector cobre en el escenario políticas actuales.

En el escenario políticas actuales se un incremento en el uso de electricidad y una disminución en el uso de diésel, en donde ambos dominan durante todo el periodo, los demás consumos de energéticos son depreciables respecto de ellos.

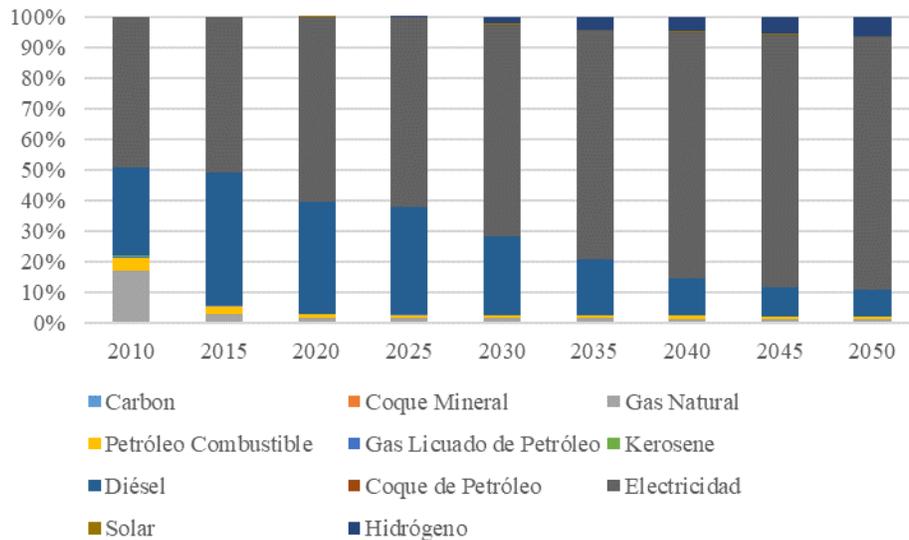


Figura 36 Evolución de los energéticos para el subsector cobre en el escenario carbono neutralidad.

Para el escenario carbono neutralidad se ve una disminución sustantiva en el uso de diésel junto con la inclusión de hidrógeno y un mayor aumento en la participación de electricidad. Cabe destacar que la subcategoría cobre no se incluyó en los consumos de

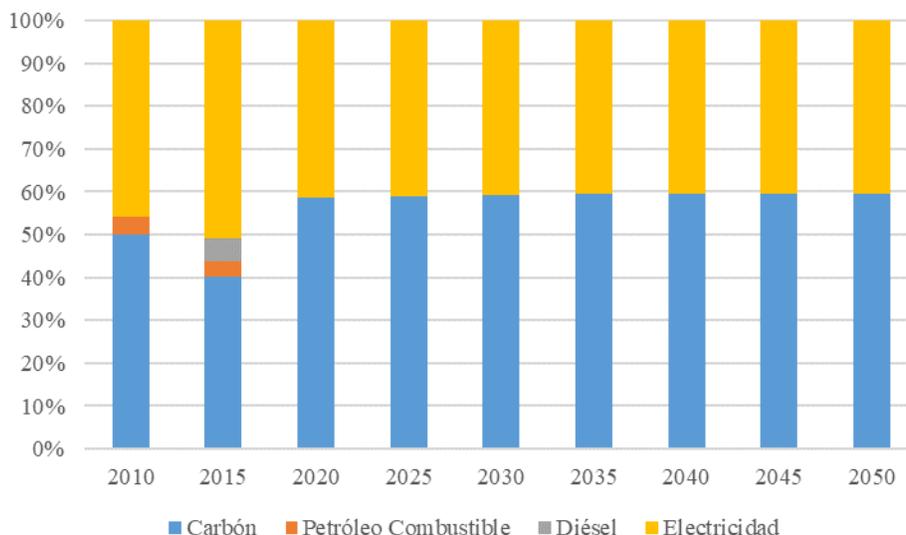
maquinaria fuera de ruta, debido a la falta del detalle del consumo por usos motrices. La Tabla 14 presenta un resumen de la reconstrucción del periodo entre 2010 y 2015.

*Tabla 14 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector cobre [Tcal/a].*

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Carbón</b>	49	-	-	-	-	0
<b>Coque Mineral</b>	103	69	91	148	23	37
<b>Gas Natural</b>	5.640	1.041	998	1.220	691	947
<b>Petróleo Combustible</b>	1.356	1.655	1.262	1.028	364	1.095
<b>Gas Licuado de Petróleo</b>	150	103	192	90	22	34
<b>Gasolina de Motor</b>	-	24	-	-	-	-
<b>Kerosene</b>	83	82	113	107	20	71
<b>Diésel</b>	9.640	11.591	12.519	13.439	15.803	16.361
<b>Nafta</b>	-	1	-	-	-	-
<b>Coque de Petróleo</b>	6	10	9	6	7	9
<b>Electricidad</b>	16.251	16.710	18.356	18.704	19.253	19.324
<b>Gas Corriente</b>	-	0	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>33.278</b>	<b>31.286</b>	<b>33.539</b>	<b>34.742</b>	<b>36.182</b>	<b>37.878</b>

## ii. Hierro

Para la subcategoría hierro se presentan la evolución de los energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad. Esta subcategoría fue incluida en el sector maquinaria fuera de ruta.



*Figura 37 Evolución de los energéticos para el subsector hierro en el escenario carbono neutralidad.*

Para el escenario políticas actuales se ve una repartición de la demanda energética entre electricidad y carbón para todo el periodo, donde este último domina la partición.

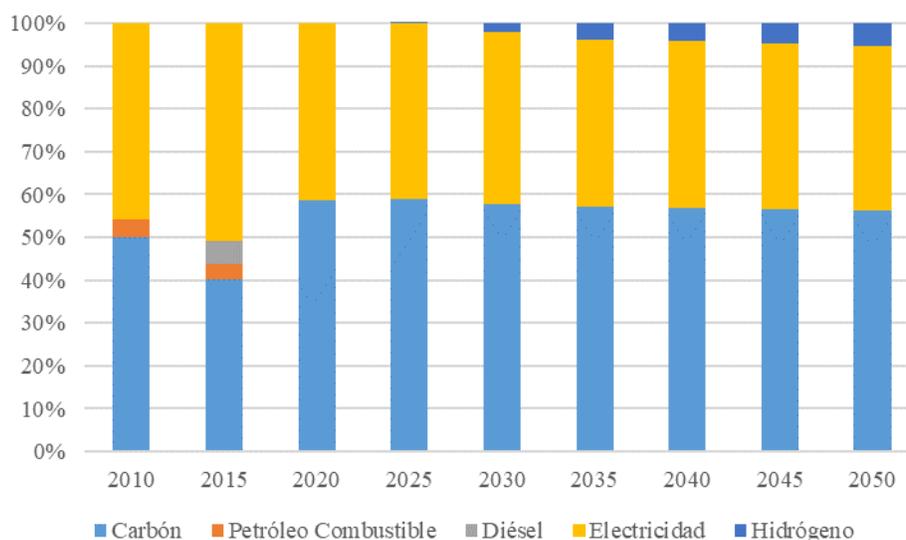


Figura 38 Evolución de los energéticos para el subsector hierro en el escenario carbono neutralidad.

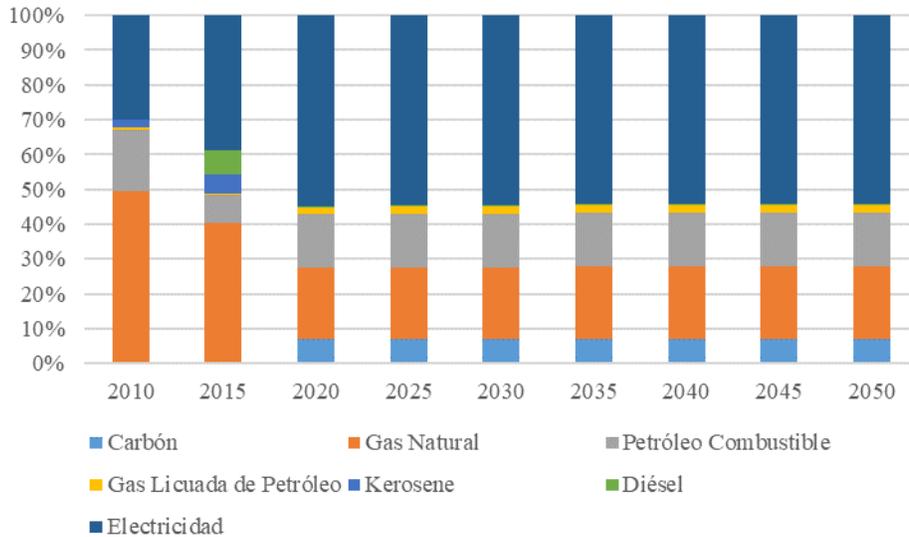
Para el escenario carbono neutralidad se ve una evolución similar a la del escenario políticas actuales salvo, una pequeña participación de hidrógeno al final del periodo. Por otro lado, se presenta una tabla resumen de la reconstrucción del periodo 2010 – 2015. Cabe mencionar que esta subcategoría fue incluida en el sector maquinaria fuera de ruta, por medio de la misma metodología descrita en la sección del sector industria.

Tabla 15 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector hierro [Tcal/a].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Carbón</b>	525	541	539	-	243	510
<b>Diésel</b>	-	-	160	62	77	65
<b>Petróleo Combustible</b>	44	47	78	44	24	45
<b>Gasolina de Motor</b>	-	1	-	-	-	-
<b>Gas Licuado de Petróleo</b>	2	-	0	-	-	-
<b>Electricidad</b>	477	461	417	453	538	646
<b>Total</b>	<b>1.048</b>	<b>1.050</b>	<b>1.193</b>	<b>559</b>	<b>882</b>	<b>1.266</b>

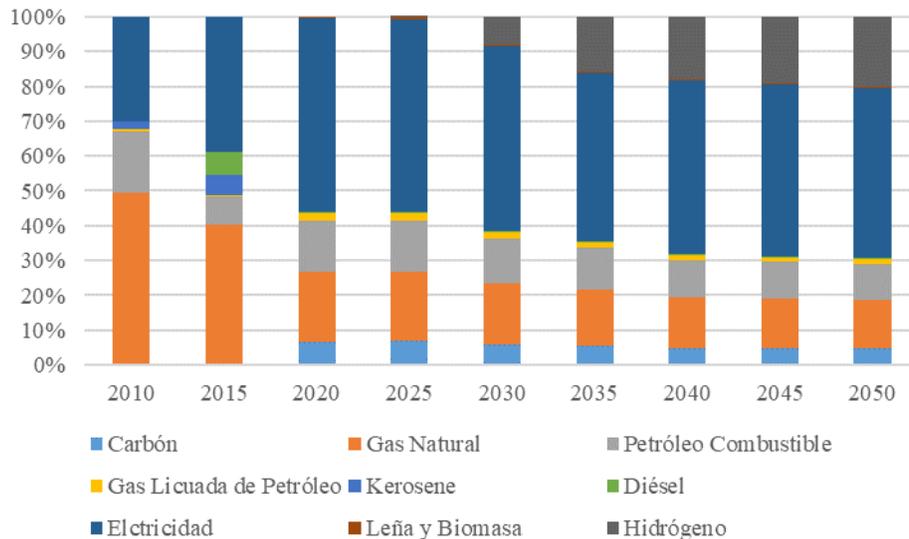
**iii. Minas varias**

Para la subcategoría minas varias se presentan las evoluciones de los energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad. Esta subcategoría también fue incluida en el sector maquinaria fuera de ruta.



*Figura 39 Evolución de los energéticos para el subsector minas varias en el escenario carbono neutralidad.*

Para el escenario políticas actuales se ve un aumento en la participación de electricidad, el cual se mantiene constante en el periodo de las proyecciones (2016 – 2050).



*Figura 40 Evolución de los energéticos para el subsector minas varias en el escenario carbono neutralidad.*

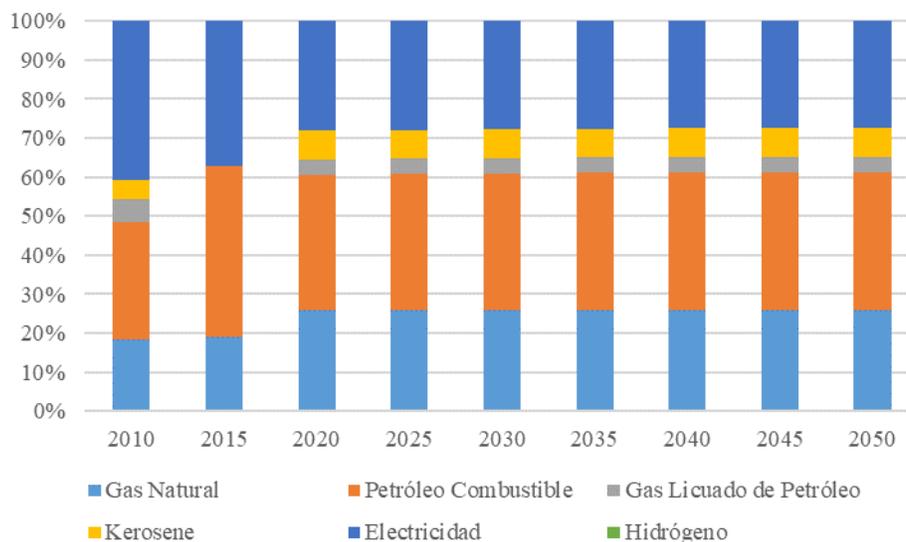
Para el escenario carbono neutralidad se observa una disminución en el uso de gas natural, el cual se compensa con la inclusión de hidrógeno como energético. Por otro lado, se presenta una tabla resumen de la reconstrucción del periodo 2010 – 2015.

*Tabla 16 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector minas varias [Tcal/a].*

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Gas Natural</b>	2.687	43	49	46	-	822
<b>Leña y Biomasa</b>	-	-	0	-	-	9
<b>Diésel</b>	-	36	-	-	-	135
<b>Petróleo Combustible</b>	959	387	110	287	710	163
<b>Kerosene</b>	53	-	-	-	-	12
<b>Gas Licuado de Petróleo</b>	32	43	27	39	136	11
<b>Kerosene de Aviación</b>	74	-	70	147	1.095	100
<b>Electricidad</b>	1.630	1.632	1.604	1.228	1.010	783
<b>Gas Corriente</b>	-	0	-	-	-	-
<b>Total</b>	<b>5.436</b>	<b>2.140</b>	<b>1.861</b>	<b>1.747</b>	<b>2.951</b>	<b>2.036</b>

#### iv. Salitre

Para la subcategoría se presentan la evolución de los energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad. Esta subcategoría, al igual que las categorías anteriores también fue incluida en el sector maquinaria fuera de ruta.



*Figura 41 Evolución de los energéticos para el subsector salitre en el escenario carbono neutralidad.*

Para el escenario políticas actuales se ve una participación constante de los energéticos, para el periodo 2016 – 2050, donde domina el uso de gas natural, petróleo combustible y electricidad.

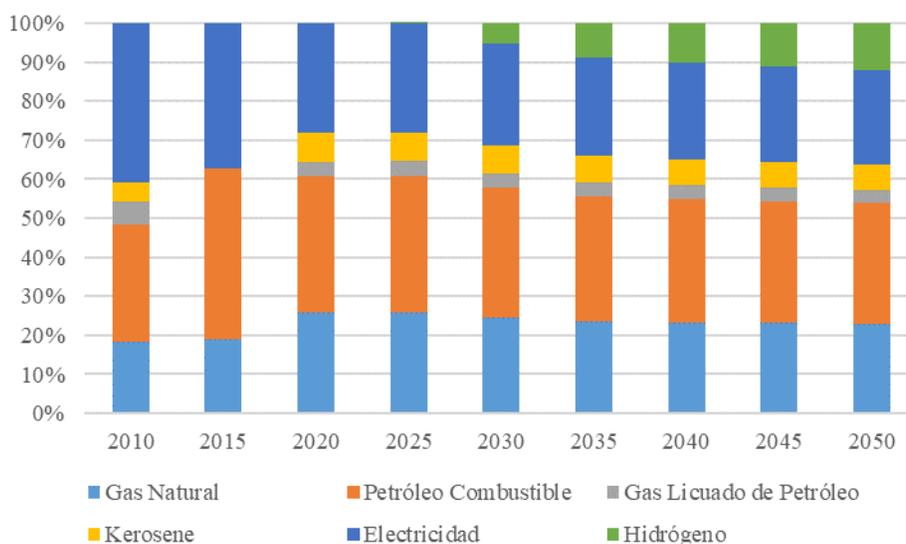


Figura 42 Evolución de los energéticos para el subsector salitre en el escenario carbono neutralidad.

Para el escenario carbono neutralidad, se observa una disminución en el uso de gas natural y petróleo de combustible, el cual se reemplaza por el uso de hidrógeno. Por otro lado, se presenta una tabla resumen con la reconstrucción del periodo 2010 – 2015.

Tabla 17 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el subsector salitre [Tcal/a].

	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Gas Natural</b>	173	71	255	437	441	163
<b>Petróleo Combustible</b>	245	409	244	234	235	375
<b>Gasolina de Motor</b>	-	0	-	-	-	-
<b>Kerosene</b>	46	51	65	-	-	-
<b>Gas Licuado de Petróleo</b>	57	111	4	5	0	-
<b>Electricidad</b>	423	367	499	460	761	320
<b>Total</b>	<b>945</b>	<b>1.010</b>	<b>1.068</b>	<b>1.137</b>	<b>1.436</b>	<b>858</b>

Finalmente, se presentan los resultados obtenidos de los consumos energéticos por usos motrices. En estos consumos energéticos se consideran las categorías hierro, minas varias y salitre, se excluye cobre por falta de información sobre usos motrices. A continuación, se presentan los resultados.

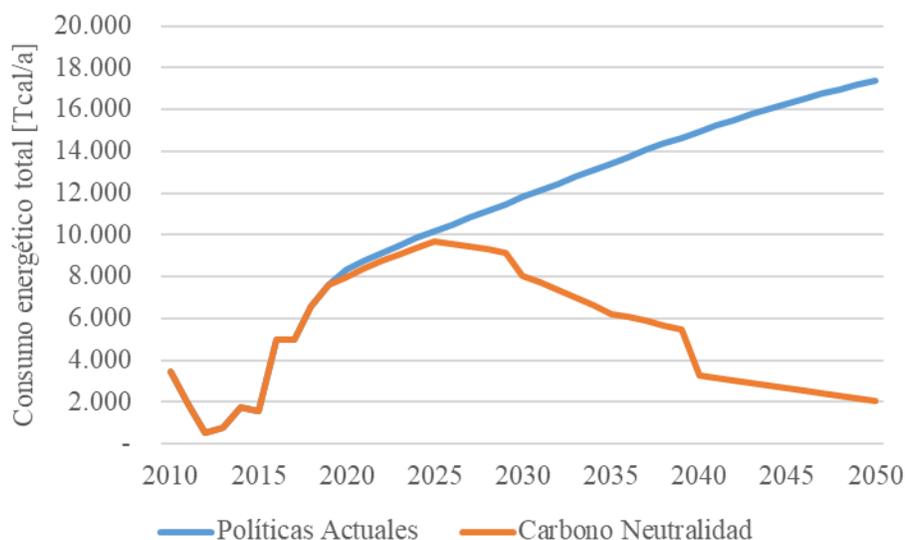


Figura 43 Consumo energético por usos motrices en el sector minería para los tres escenarios.

#### ***h) Consumos motrices de la gran minería***

Como ya se dijo, los consumos energéticos del sector minería se utilizaron como insumo para la estimación de las emisiones del sector MFR, considerando los consumos energéticos por usos motrices de las subcategorías hierro, minas varias y salitre, dejando fuera la subcategoría cobre. Los consumos energéticos de esta subcategoría, cobre, representan más de un 75% del consumo energético del sector minería, por lo que no considerar los consumos motrices de este sector podría llevar a una subestimación de emisiones, principalmente a la estimación de partículas emitidas. Sin embargo, el no considerar la actividad minera del cobre no es una decisión arbitraria: los consumos motrices obtenidos de los sectores industria y minería fueron obtenidos primero, en base a la información disponible en los escenarios oficiales y segundo, en base a las emisiones de CO<sub>2</sub> estimadas por GEASUR (2014). Por una parte, la información disponible para y provista por el Ministerio del Medio Ambiente no considera la separación por usos (motrices o térmicos) en la subcategoría cobre, lo que imposibilita la separación del uso de diésel para usos motrices de los demás usos o procesos. Según esto se convino considerar que el consumo energético de diésel de los procesos en minas de rajo abierta y minas subterráneas de la subcategoría cobre son 100% producto de usos motrices. Los usos motrices expuestos en las secciones anteriores fueron obtenidos en base a las emisiones de CO<sub>2</sub> informadas en GEASUR (2014), considerando la cantidad de consumo energético asociado con las emisiones estimadas en dicho estudio. En GEASUR (2014) se contempla una separación por rubro de la maquinaria, siendo estas: agrícola-forestal, construcción, industria y minería. La participación de minería solo alcanza el 24% del total de las emisiones del sector MFR para el año 2013 (GEASUR, 2014). En nuestro trabajo, la participación del sector minería dentro del sector MFR alcanza en el 2016 un 36%, lo cual es sustantivamente mayor, aún dejando fuera los consumos motrices de la subcategoría cobre.

Dejar fuera los consumos por usos motrices del sector cobre da lugar a una subestimación de las emisiones de MFR expuesto en e). Esto obedece principalmente a que

la definición MFR excluye las maquinarias de potencia superior a 560 kW, en otras palabras, las maquinarias pertenecientes a la actividad minera del cobre. No obstante, los consumos energéticos producto de la minería del cobre son considerablemente mayores a los demás consumos energéticos del sector minería. A continuación, se presentan los consumos energéticos motrices obtenidos del sector industria y el sector minería, según lo expuesto las secciones anteriores, en comparación con los consumos energéticos de diésel por usos motrices de la subcategoría cobre. La figura 44 ilustra que los consumos energéticos de diésel por usos motrices de la subcategoría cobre, son mayores al de los sectores industria y minería, lo que indica la importancia de estos en las emisiones por usos motrices. Se puede notar que las tendencias para los tres consumos son similares entre el escenario de políticas actuales y el de carbono neutralidad.

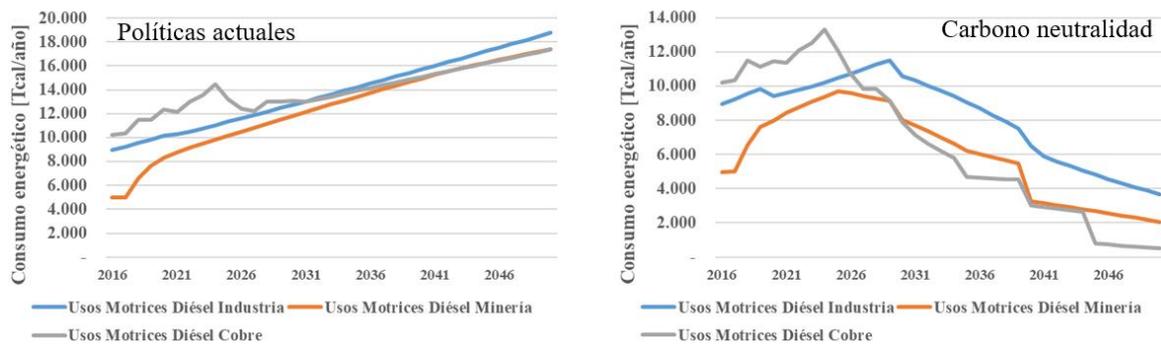


Figura 44 Consumos energéticos de diésel por usos motrices para los sectores industria, minería y cobre para los escenarios políticas actuales (izquierda) y carbono neutralidad (derecha).

Una estimación de las emisiones de BC para los consumos expuestos en la figura anterior se presenta a continuación, como se hizo en el caso de los consumos de otros sectores con MFR. Para el escenario políticas actuales se observa que las emisiones de BC producto de la MFR de la subcategoría cobre alcanzan una participación importante durante todo el periodo. Si bien las emisiones estimadas son menores a las del sector completo, estas son más de la mitad en todo el periodo. Cabe destacar que si bien los consumos energéticos de los procesos de extracción de material de mina a rajo abierto y mina subterránea son prácticamente en su totalidad usos motrices, para analizar con más precisión las emisiones del BC del sector, es importante contar con los consumos específicos de uso motriz por sobre los consumos de estos procesos. Especialmente para el análisis de emisiones de MFR.

Es importante hacer notar que para efectos de resultados generales de este estudio se presentarán el sector MFR como fue descrito en la sección Maquinaria Fuera de Ruta, dejando fuera los consumos por usos motrices de la subcategoría cobre. Sin embargo, se provee esta estimación para relevar las falencias metodológicas que existen a la hora de estimar las emisiones del sector MFR. Por otra parte, cabe destacar que la estimación de las emisiones de este sector necesita ser estudiada correctamente, ya que con una metodología débil podrían estar subestimándose las emisiones de este sector.

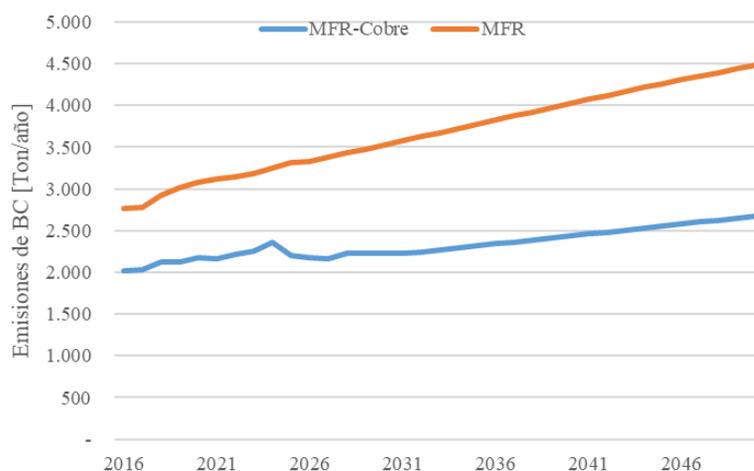


Figura 45 Emisiones de BC producto del sector MFR y la MFR de la subcategoría cobre para el escenario políticas actuales.

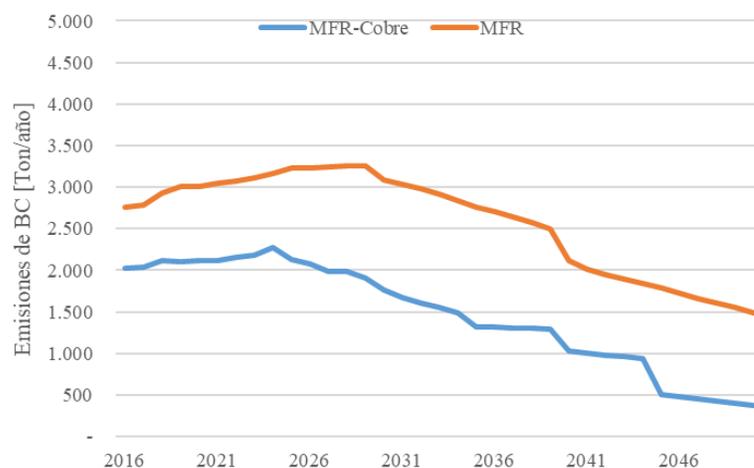


Figura 46 Emisiones de BC producto del sector MFR y la MFR de la subcategoría cobre para el escenario carbono neutralidad.

Finalmente, si bien la MFR de la minería del cobre tiene una participación relevante en las emisiones del sector (~50%), resultan menos importante a la hora de buscar un cobeneficio en cuanto a la salud de la población pues éstas suelen ocurrir en parajes cordilleranos, donde la actividad es altamente tecnologizada y los trabajadores cuentan con protección. No obstante, la MFR de la minería del cobre puede ser muy relevante en cuanto a su impacto sobre la criósfera andina (Molina et al., 2015; Rowe et al., 2019).

### i) Público

Este sector se conforma de los consumos energéticos de diferentes entidades públicas, entre los cuales se encuentran colegios, hospitales, universidades, entre otros. El consumo energético de este sector está ampliamente dominado por la electricidad (BNE, 2017). Este sector no representa un gran consumo de energía a nivel país, siendo este aproximadamente un 5% del consumo total de energía del sector CPR y éste, a su vez, un 1% del total de

consumo energético de Chile. A continuación, se presentan las trayectorias de consumo para los tres escenarios.

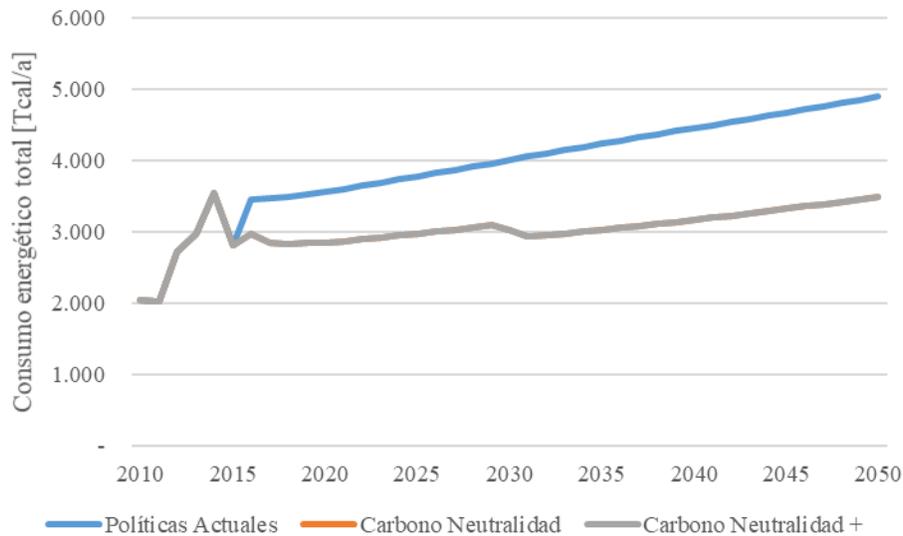


Figura 47 Consumo energético del sector público para los tres escenarios.

El sector público, al igual que los demás sectores, no presenta cambios en el escenario carbono neutralidad+ con respecto al escenario carbono neutralidad, ya que no se consideraron medidas en este sector. Por otro lado, las emisiones de este sector se estimaron con una metodología *top-down*. A continuación, se presentan la evolución de los energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.

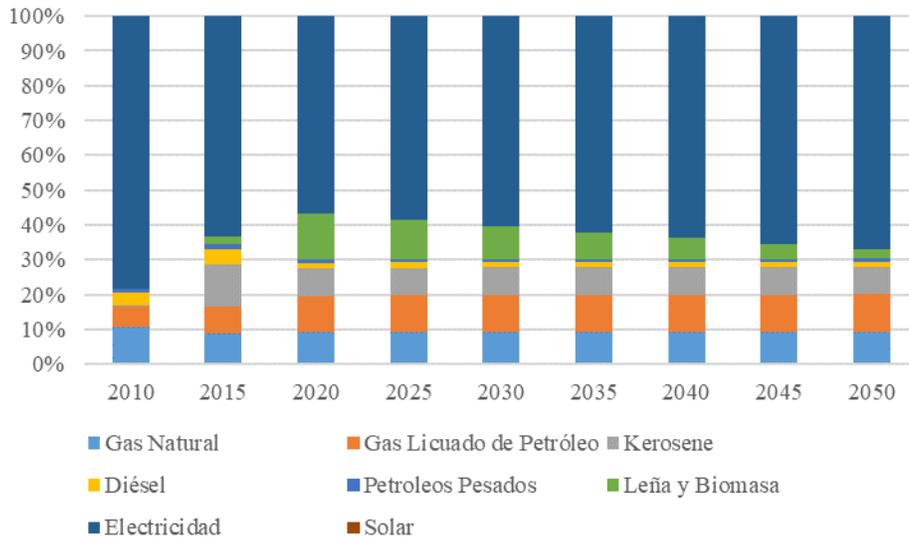


Figura 48 Evolución de los energéticos para el sector público en el escenario políticas actuales.

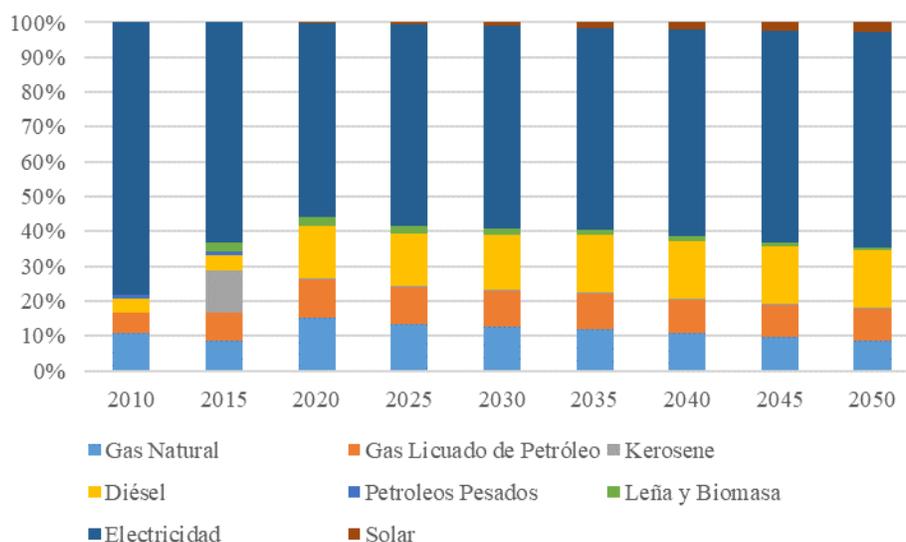


Figura 49 Evolución de los energéticos para el sector público en el escenario carbono neutralidad.

Para el escenario políticas actuales se mantiene el dominio del consumo energético por electricidad, donde en los últimos años del periodo aumenta 60% de participación. Para el caso del escenario carbono neutralidad se ve una tendencia similar para la participación de la electricidad. Sin embargo, destaca que hay un aumento en el consumo de diésel. Por otro lado, la reconstrucción del periodo 2010 - 2050 se realizó de la misma forma que en los sectores anteriores. A continuación, se presentan una tabla resumen de los datos obtenidos de los diferentes BNE.

Tabla 18 Consumos de energías de diferentes energéticos reportados por los BNE para el sector público [Tcal/a].

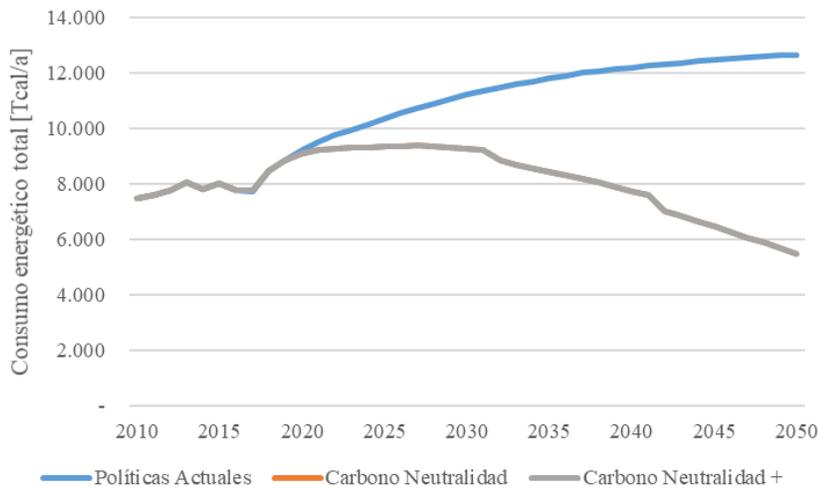
	2010	2011	2012	2013	2014	2015
<b>Gas Natural</b>	219	211	261	247	204	245
<b>Carbón</b>	-	-	-	-	0	31
<b>Biomasa y Leña</b>	-	0	0	0	711	67
<b>Diésel</b>	77	113	14	98	66	122
<b>Petróleo Combustible</b>	23	22	83	13	-	34
<b>Kerosene</b>	-	-	-	-	0	10
<b>Gas Licuado de Petróleo</b>	121	149	207	256	277	218
<b>Gasolina de Aviación</b>	-	3	14	15	6	-
<b>Kerosene de Aviación</b>	4	4	383	420	455	334
<b>Electricidad</b>	1.597	1.510	1.740	1.926	1.826	1.741
<b>Gas Corriente</b>	5	14	25	5	4	4
<b>Total</b>	<b>2.046</b>	<b>2.027</b>	<b>2.727</b>	<b>2.978</b>	<b>3.550</b>	<b>2.805</b>

En este caso los consumos de kerosene de aviación y gasolina de aviación pasan a ser consumos de kerosene, por simplicidad de los resultados. Por otro lado, los consumos de gas corriente pasan a ser consumos de electricidad. Este supuesto no afecta en mayor medida las emisiones estimadas.

**j) Residencial**

El sector residencial está compuesto por cuatro subcategorías: agua caliente sanitaria (ACS), artefactos domésticos, cocina y calefacción residencial. Este último representa casi la mitad del consumo energético total del sector, dominado principalmente por el uso de biomasa. Como se mencionó anteriormente, el sector residencial, se encuentra normalmente dentro del sector CPR. Para este sector se presentarán las demandas y evolución de los energéticos de las tres primeras subcategorías, las que fueron estimadas con una metodología *top-down*, para luego, detallar la metodología utilizada en la subcategoría calefacción, en la cual las emisiones se estimaron con una metodología *bottom-up*.

Debido al poco impacto de agua caliente sanitaria en las emisiones de BC, no se entrará en mayores detalles de las demandas energéticas. A continuación, se presentan las demandas energéticas para los tres escenarios.



*Figura 50 Consumo energético de la subcategoría ACS para los tres escenarios.*

Como se observa en la figura, las demandas no presentan diferencias entre los escenarios carbono neutralidad y carbono neutralidad +. A continuación, se presenta la evolución de los energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.

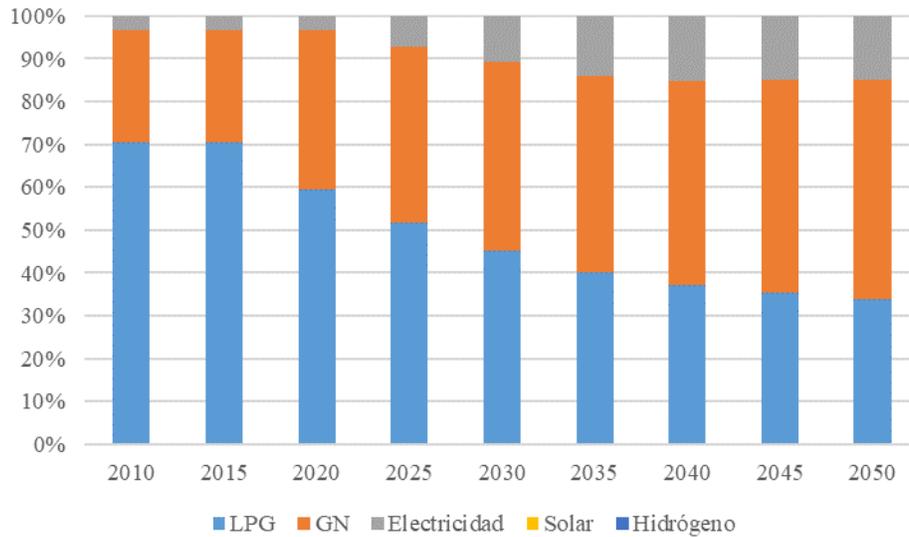


Figura 51 Evolución de los energéticos para la subcategoría ACS en el escenario políticas actuales.

En el caso de los energéticos utilizados para ACS, domina el uso de gas licuado de petróleo (LPG, por sus siglas en inglés) y luego el uso de gas natural (GN), donde este último aumenta considerablemente hacia el final del periodo.

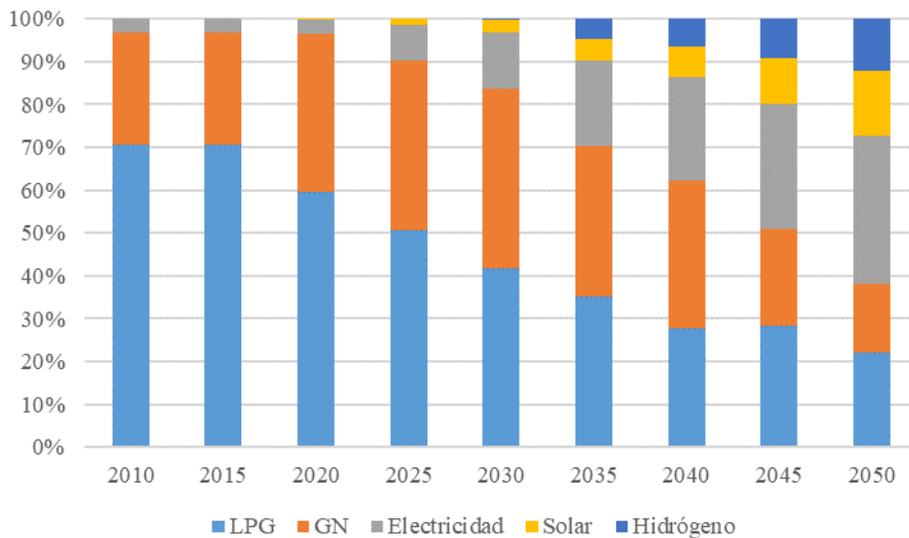
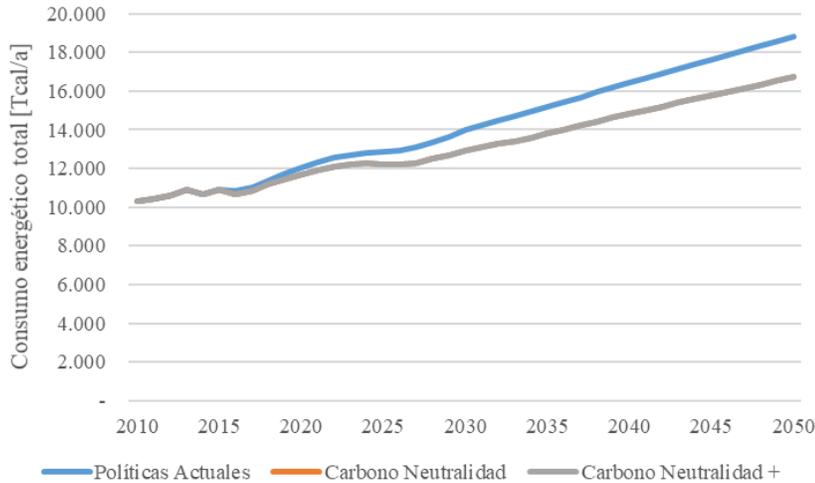


Figura 52 Evolución de los energéticos para la subcategoría ACS en el escenario carbono neutralidad.

Para el escenario carbono neutralidad destaca la inclusión de los energéticos solar e hidrógeno, desplazando el uso de gas natural y gas licuado de petróleo. Los dos nuevos energéticos alcanzan aproximadamente 30% del total de la demanda energética para el año 2050.

**i. Artefactos**

La subcategoría artefactos consiste solo en demanda energética de electricidad, por lo que solo se presentarán la trayectoria de las demandas para los tres escenarios. A continuación, se presentan las trayectorias.

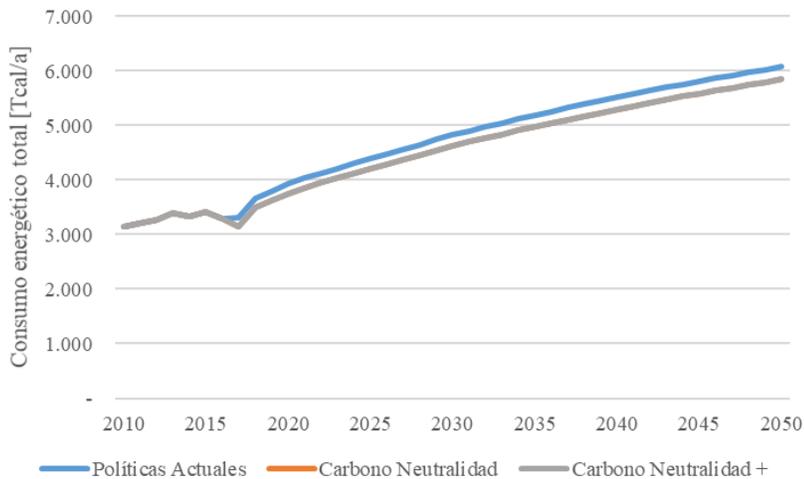


*Figura 53 Consumo energético de la subcategoría artefactos para los tres escenarios.*

En este caso solo hay diferencias entre los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.

**ii. Cocina**

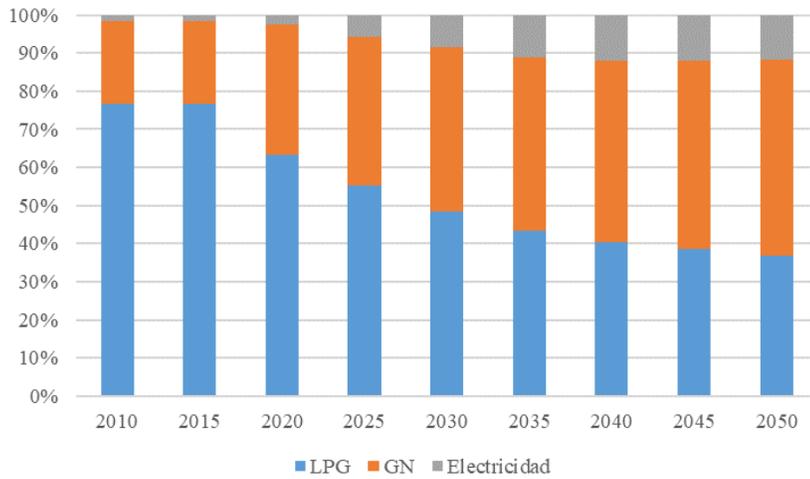
Para la subcategoría cocina se presentan los resultados de la misma manera que para la subcategoría ACS. A continuación, se presentan las trayectorias de los consumos energéticos.



*Figura 54 Consumo energético de la subcategoría cocina para los tres escenarios.*

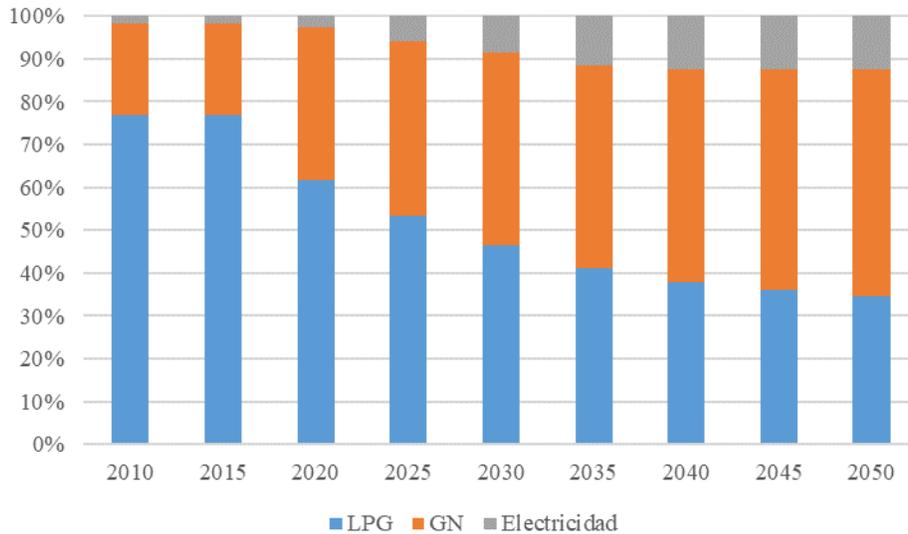
Observando los consumos, destaca una pequeña variación constante entre los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad, mientras que el escenario carbono

neutralidad + no presenta cambios. A continuación, se presentan las evoluciones de los energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.



*Figura 55 Evolución de los energéticos para la subcategoría cocina en el escenario políticas actuales.*

Para el escenario políticas actuales se ve una tendencia de crecimiento en el uso de GN y también en el uso de electricidad como energético para cocinar.



*Figura 56 Evolución de los energéticos para la subcategoría cocina en el escenario carbono neutralidad.*

Para el escenario carbono neutralidad se tiene un leve aumento en el uso de GN. Sin embargo, estos cambios no son relevantes para los resultados globales en la estimación de emisiones.

### iii. Calefacción

Las emisiones de la subcategoría calefacción fueron estimadas con una metodología *bottom-up*, debido a la importancia del sector residencial en las emisiones de BC. A continuación, se presenta una tabla resumen de los insumos utilizados para estimar las emisiones de la subcategoría calefacción.

Tabla 19 Base de datos utilizadas para estimar las emisiones de la subcategoría calefacción.

Base de datos	Detalle	Periodo	Origen
Número de viviendas	Número de viviendas por región, agrupados en casas y departamentos.	2014-2050	Ministerio del Medio Ambiente
Uso de calefacción	Porcentaje de viviendas que utilizan calefacción por región.	2014-2050	Ministerio del Medio Ambiente
Uso de energético	Número de viviendas por energético utilizados para calefaccionar, los energéticos considerados son: Leña, GLP, GN, Kerosene y Electricidad	2014-2050	Ministerio del Medio Ambiente
Consumo unitario	Demanda de energía por vivienda y por energético por región.	2014-2050	Ministerio de Energía
Eficiencia	Eficiencia de cada energético.	2014-2050	Ministerio del Medio Ambiente
Demanda energética	Demanda por calefacción.	2014-2050	Ministerio del Medio Ambiente

Para la reconstrucción del periodo 2010-2013 se realizaron regresiones lineales o cuadráticas (dependiendo del mejor ajuste). Luego de completar la base de datos para todo el periodo, se ponderan todos los insumos de manera nacional. Para el caso del consumo unitario de calefacción por vivienda nacional, ponderado por región, se calibra con los consumos finales provistos por el MMA, esto se detallará más adelante. A continuación, se presenta la base de datos calculada.

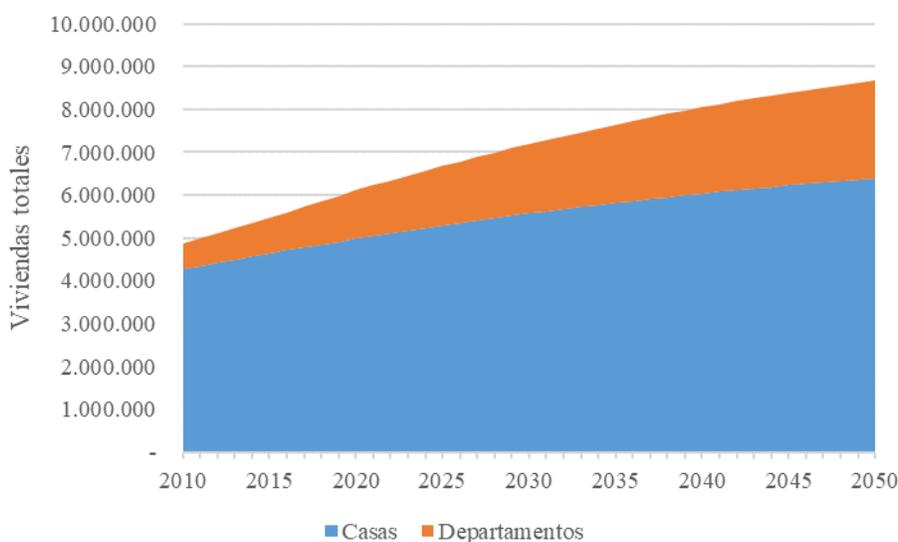


Figura 57 Número de viviendas separadas en casa y departamentos para los tres escenarios.

El número de viviendas, casas y departamentos se mantiene constante para los tres escenarios, en el cual se ve un aumento en la participación relativa de los departamentos, pasando de 13% en el 2010 a 26% al 2050. Por otro lado, se presentan la evolución del uso de calefacción, en otras palabras, cuanto porcentaje de viviendas se calefaccionan en Chile.

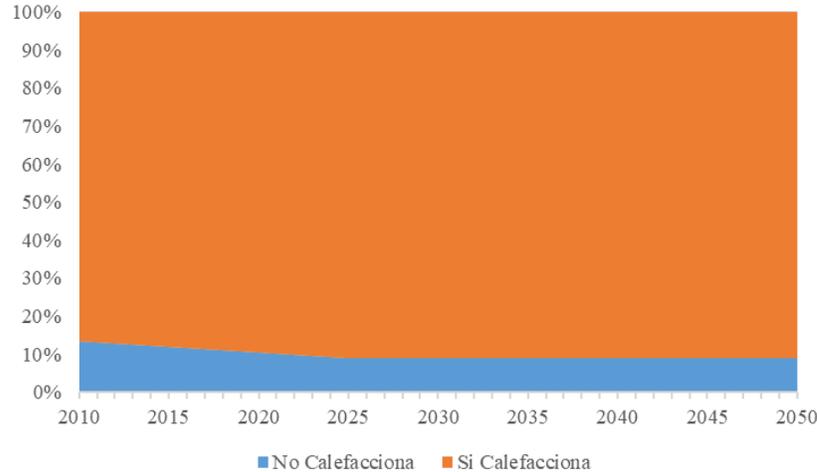


Figura 58 Uso de calefacción a nivel país para los tres escenarios.

Observando la figura anterior se ve un pequeño aumento en el porcentaje de viviendas que se calefaccionan, esta tendencia fue utilizada para los tres escenarios.

Para el caso del uso de energéticos se utilizó el mismo para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad, mientras que para el escenario carbono neutralidad + se calculó una nueva evolución de energéticos debido a la inclusión del sistema calefacción distrital. Cabe destacar que las proyecciones provistas por el MMA incorporaban demanda por calefacción distrital, pero en una cantidad marginal, por lo que fue despreciada en los escenarios oficiales del MMA. A continuación, se presenta la evolución de los energéticos a nivel nacional para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad +.

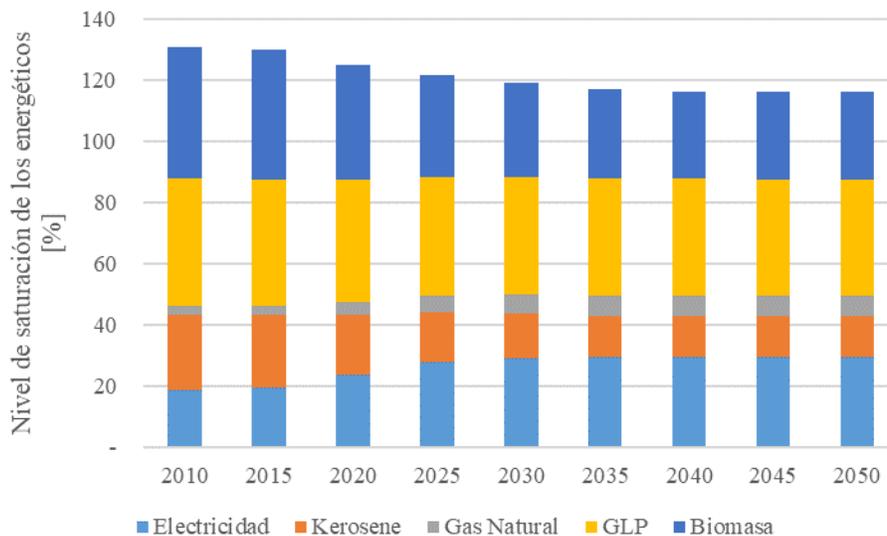


Figura 59 Saturación de los energéticos en viviendas tipo casa para el escenario políticas actuales.

La figura anterior muestra el nivel de saturación de cada energético en las viviendas de Chile, vale decir que, el porcentaje representa cuántas viviendas utilizan dicho energético. En ese caso se considera que las viviendas pueden usar más de un energético para calefaccionarse, por lo que los porcentajes pueden superar el 100%. Por otra parte, para el caso de las viviendas se ve una disminución en el porcentaje de viviendas que utilizan y un aumento en el porcentaje de viviendas que utilizan electricidad.

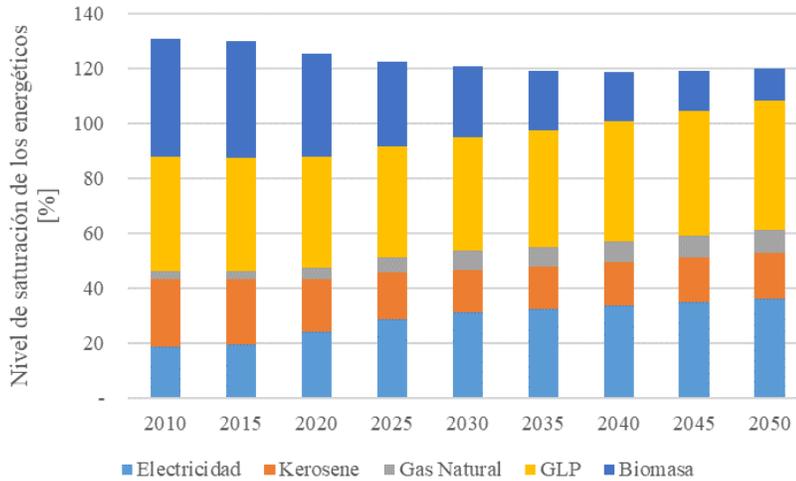


Figura 60 Saturación de los energéticos en viviendas tipo casa para el escenario carbono neutralidad +.

Para el escenario carbono neutralidad +, como se mencionó antes, se propone una medida de calefacción distrital, la que trae como supuesto la eliminación del consumo de leña en las regiones de mayor consumo. Debido a esto, la evolución de los energéticos varía entre un escenario y otro. Por otra parte, al observar las evoluciones de los energéticos se ve una clara disminución en el consumo de leña debido a la medida implementada.

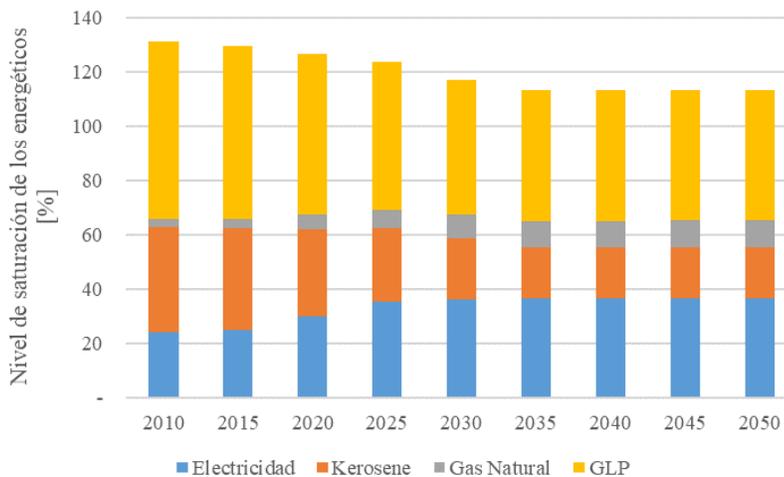
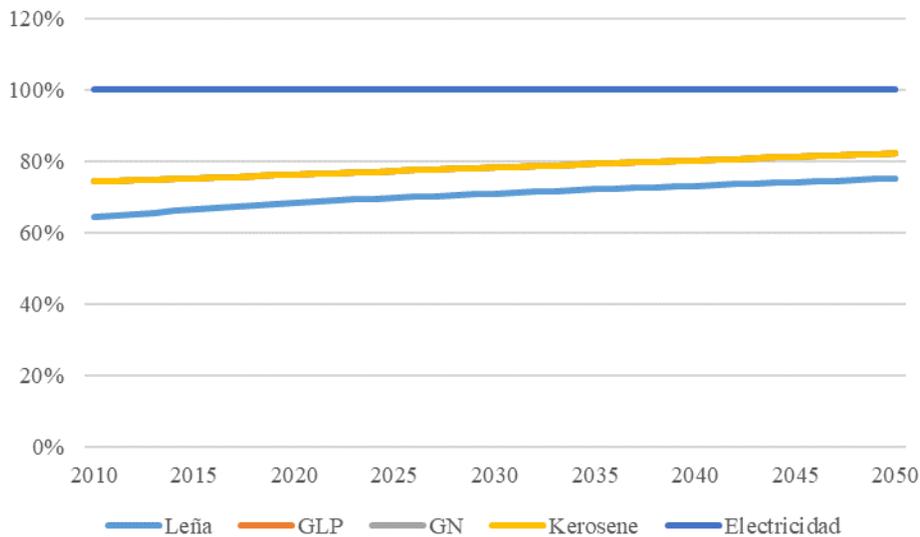


Figura 61 Saturación de los energéticos (electricidad, kerosene, gas natural y gas licuado de petróleo) en viviendas tipo departamentos para los tres escenarios.

En el caso de las viviendas, las evoluciones de los energéticos no cambian entre escenarios, debido a que no se consideraron medidas extras en dichas viviendas. Cabe mencionar que para el caso de los departamentos no se considera el uso de leña como método de calefacción y también que el consumo energético por calefacción en los departamentos representa menos del 90% de la demanda energética de la subcategoría calefacción. A continuación, se presentan las eficiencias por energéticos utilizadas.



*Figura 62 Eficiencia según energético para los tres escenarios.*

Para el caso de las eficiencias se utiliza la misma para los tres escenarios. En la figura se observa que la eficiencia de los energéticos GLP, GN y kerosene, mientras que para leña y electricidad son diferentes.

Por otro lado, se presentan los consumos unitarios ponderados regionalmente. Estos consumos son los que determinan las emisiones de todos los contaminantes en esta subcategoría. A continuación, se presentan los consumos energéticos para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad, excluyendo el consumo de leña, el cual será presentado por separado.

Para el caso de las viviendas tipo casa en el escenario políticas actuales destaca un alto consumo unitario de GN por sobre los demás energéticos. Como se mencionó anteriormente, los consumos unitarios expuestos en la figura anterior provienen de una ponderación nacional de los consumos unitarios por vivienda para cada energético y por cada región. El motivo la trayectoria de los consumos energéticos de GN se debe a la baja participación de este energético en la calefacción, donde la mayoría del consumo se concentra en la Región XII, una de las regiones con mayor demanda energética por el uso de calefacción. Esto implica que, al concentrarse el consumo en una sola región, el número de viviendas (saturación del energético) es mucho menor a la de los demás energéticos. Por otro lado, se ve un alza permanente en los consumos unitarios de los demás energéticos.

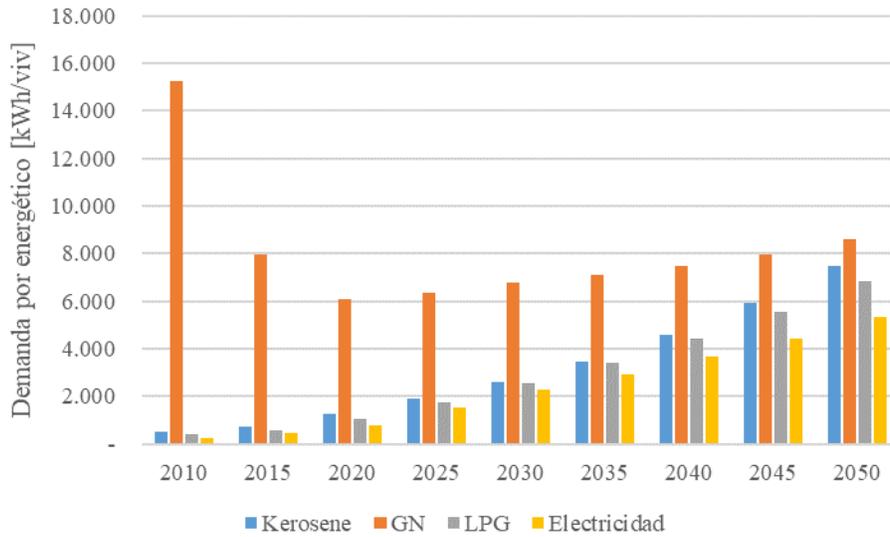


Figura 63 Demanda energética unitaria ponderada de las viviendas tipo casa en el escenario políticas actuales.

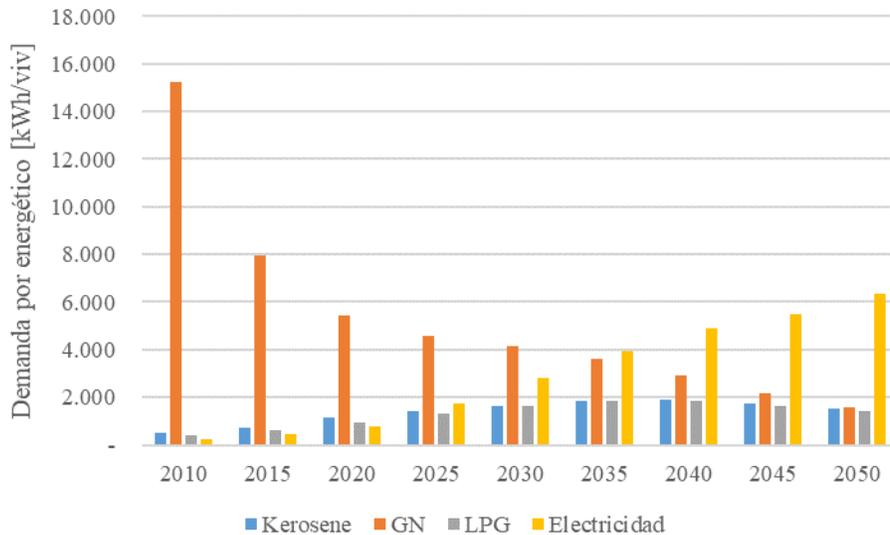


Figura 64 Demanda energética unitaria ponderada de las viviendas tipo casa en el escenario carbono neutralidad.

Para las viviendas tipo casa en el escenario carbono neutralidad se tiene una disminución en las demandas energéticas en todos los combustibles en comparación al escenario políticas actuales, por otro lado, la demanda de electricidad presenta un leve aumento en comparación al escenario anterior. Estas trayectorias son marcadas principalmente por las medidas implementadas en el sector residencial.

Para el caso del consumo leña se presentan cuatro barras diferentes, de las cuales tres representan los consumos de leña para cada escenario y la cuarta el consumo de leña por

vivienda a través de un sistema de calefacción distrital. Cabe mencionar que la calefacción distrital solo se considera en el escenario carbono neutralidad +. Observando los consumos para el escenario políticas actuales y carbono neutralidad, se ve una diferencia sustancial entre ambos consumos, por otra parte, el consumo de leña disminuye aún más en el escenario carbono neutralidad +, debido a la implementación de la medida de calefacción distrital. Hay que destacar que los consumos finales, debido a esta medida, no se ven mayormente influenciado, esto se puede ver en que la suma de los consumos de leña en el escenario carbono neutralidad + y calefacción distrital, es similar a los consumos de leña en el escenario carbono neutralidad.

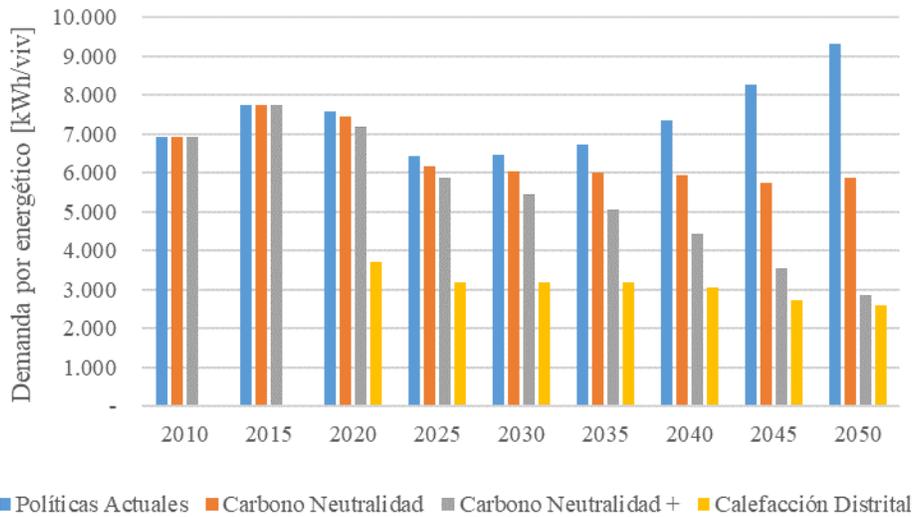


Figura 65 Demanda energética unitaria de leña de las viviendas tipo casa para los tres escenarios.

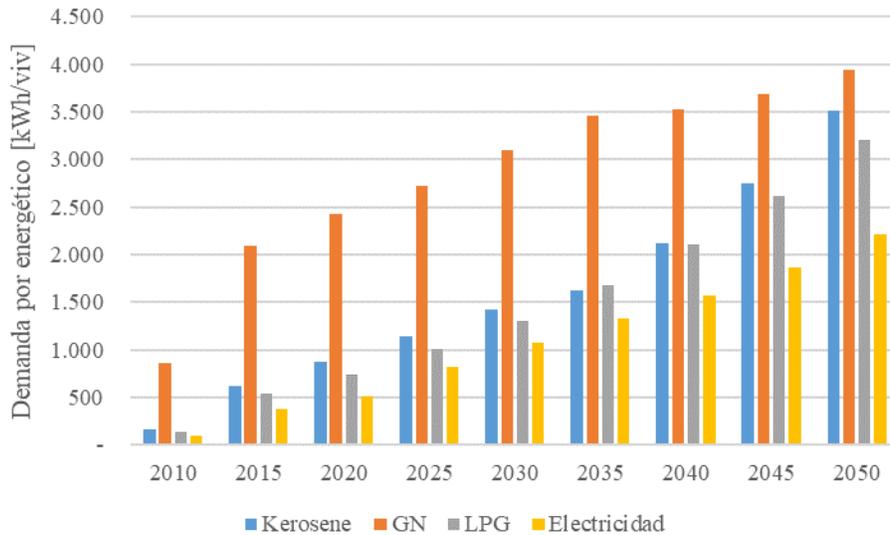
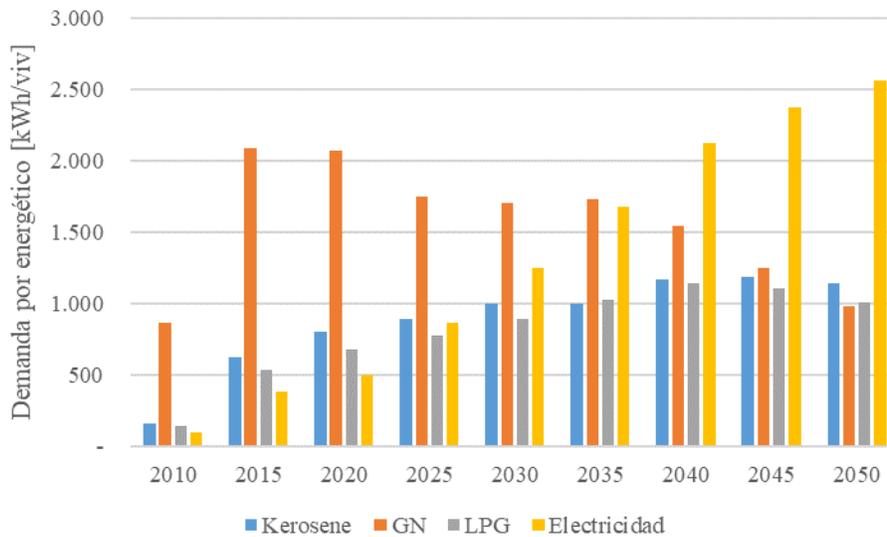


Figura 66 Demanda energética unitaria ponderada de las viviendas tipo departamento en el escenario políticas actuales.



*Figura 67 Demanda energética unitaria ponderada de las viviendas tipo departamento en el escenario carbono neutralidad.*

Para el caso de las viviendas tipo departamento se tiene un aumento constante los consumos unitarios de todos los energéticos, en el escenario políticas actuales. Por otro lado, de la figura anterior se desprende que los consumos energéticos por calefacción de los departamentos son considerablemente menores que el de las viviendas tipo casa.

Por su parte, en el escenario carbono neutralidad, se ve una disminución en los consumos energéticos de los combustibles en comparación con el escenario políticas actuales, sin embargo, se ve un crecimiento en el consumo energético de electricidad.

Finalmente, las emisiones contaminantes de esta subcategoría se estiman considerando todos los parámetros mencionados a lo largo de esta subsección. Los resultados obtenidos, con respecto a las emisiones, no se verán mayormente influenciados por las variables consideradas en esta metodología, debido a la calibración final de los consumos unitarios con las demandas proyectadas en los escenarios oficiales. Sin embargo, al considerar todas estas variables, es posible evaluar diferentes medidas, como se hizo con calefacción distrital.

A modo de resumen, se presentan las trayectorias de los consumos energéticos totales para la subcategoría calefacción.

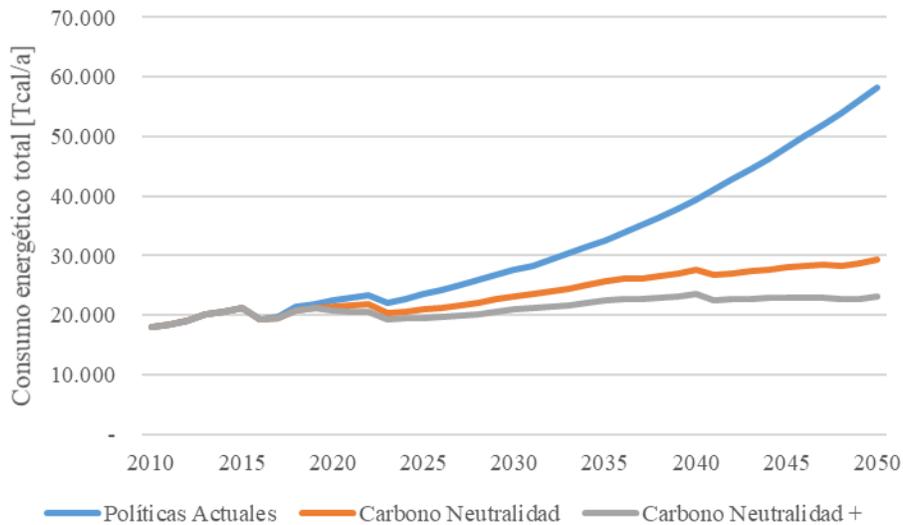


Figura 68 Consumo energético total por calefacción para los tres escenarios.

### k) Transporte

El sector transporte terrestre considera la movilidad vial y ferroviaria de pasajeros. La cuantificación se hace en términos de los pasajeros transportados en un cierto modo de transporte sobre un kilómetro recorrido (PKM) y las toneladas transportadas por un modo de transporte sobre un kilómetro recorrido (TKM). Bajo la actividad caracterizada por PKM se encuentran todas las demandas de transporte relacionadas con movimiento de personas. Por otro lado, bajo la actividad de TKM se encuentran los movimientos de mercancías a través del transporte terrestre. El detalle de esta metodología se encuentra en SECTRA (2014). A continuación, se presentan las demandas utilizadas en este estudio.

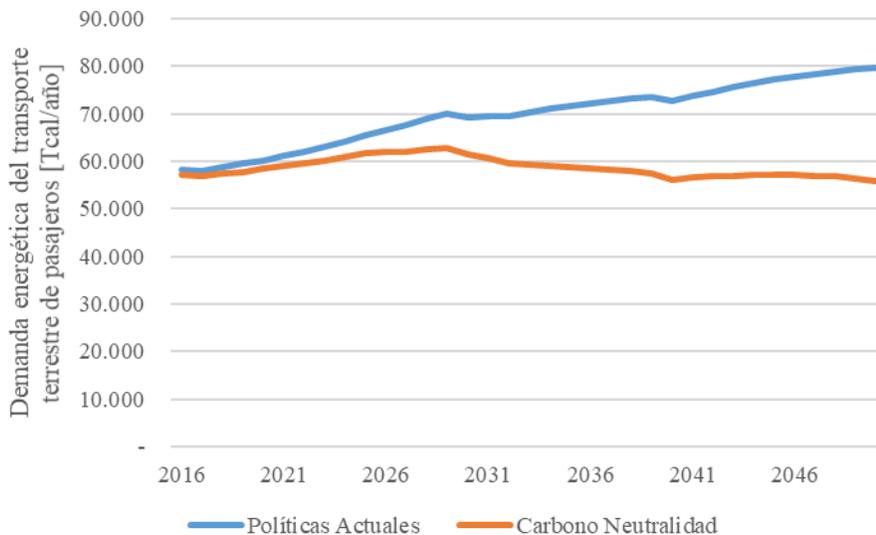
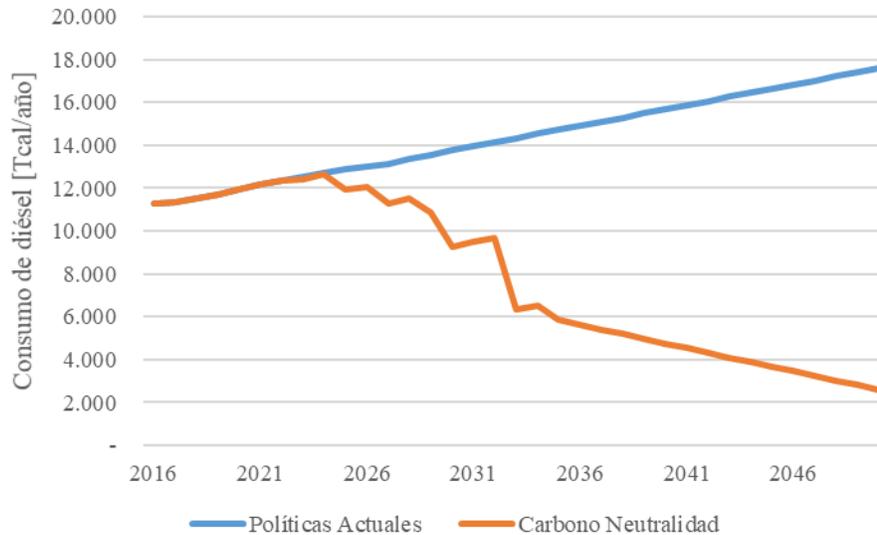


Figura 69 Demanda energética del transporte terrestre de pasajeros para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.

Para el caso de la demanda energética producto del transporte terrestre de pasajeros se observa una tendencia similar en ambos casos, con un crecimiento menos acelerado en el caso del escenario carbono neutralidad. Esto se debe principalmente a la implementación de medidas de eficiencia energética en los vehículos y un aumento en el transporte eléctrico.



*Figura 70. Demanda de diésel producto del transporte terrestre de carga para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.*

Para el caso del transporte terrestre de carga se graficaron las demandas de diésel proyectadas en ambos escenarios. Estas demandas fueron traducidas en actividad de mercancías, TKM. Ambos escenarios presentan diferencias sustanciales, donde se observa una baja en el consumo de diésel en el escenario carbono neutralidad. Esta demanda es sustituida por el uso de hidrógeno en camiones de carga. En este estudio, el hidrógeno no se tradujo en TKM, solo se consideró como emisiones cero.

### ***l) Generación de Electricidad (GE)***

Este sector se denomina Transformación, en el cual se estiman las emisiones producto de la demanda eléctrica de los demás sectores de demanda energética. En este sector se divide la matriz energética por actividad de combustibles, es decir, se tiene el porcentaje de participación de cada combustible en la generación de electricidad producto de la demanda eléctrica de los demás sectores. Para este sector se utilizó la energía esperada que será generada por la matriz energética utilizada. Para este caso se contó con la generación esperada desde el 2019 hasta el 2050 para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad, para el escenario carbono neutralidad + se utilizó la misma matriz que en el escenario carbono neutralidad. A continuación, se presentan la energía generada para los escenarios políticas actuales y carbono neutralidad.

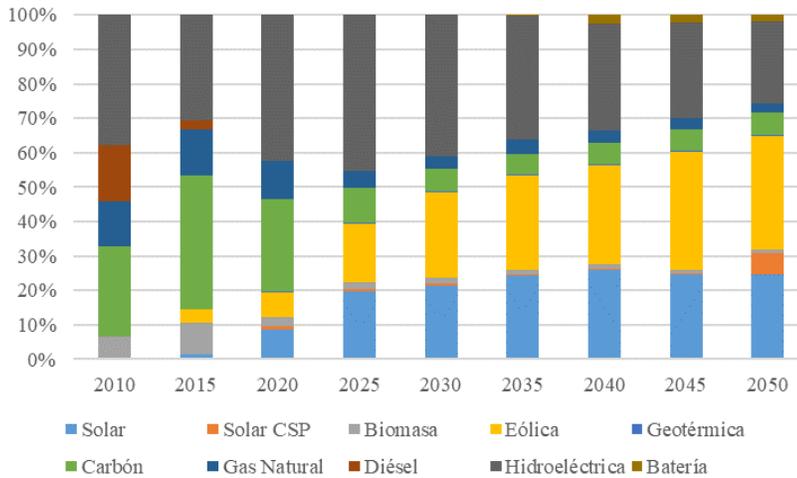


Figura 71 Evolución de la matriz energética para el escenario políticas actuales.

Para el escenario políticas actuales se tiene una tendencia al alza de las energías renovables no convencionales (ERNC), sin embargo, la matriz energética aun cuenta con aproximadamente 10% de energía generada en base a carbón.

Para el escenario carbono neutralidad, la principal diferencia es la salida de las centrales a carbón al 2040, donde su participación después del 2040 es menor al 1% en la matriz energética. Por otro lado, las trayectorias de las ERNC son similares en ambos escenarios. Cabe destacar que las emisiones de este sector, para el BC, son marginales en comparación a los sectores de consumo energético. Vale mencionar que, el periodo 2010-2016 reconstruido con información de (MMA, 2018) y el periodo 2017-2018 con una interpolación lineal entre 2016 y 2019.

Considerando lo expuesto anteriormente, las emisiones de este sector se estiman en base a la demanda de electricidad, la que se reparte entre los diferentes energéticos dependiendo del año.

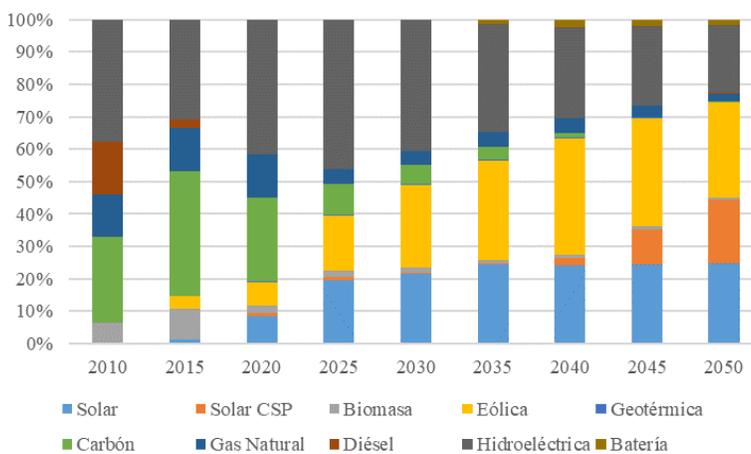


Figura 72 Evolución de la matriz energética para el escenario carbono neutralidad.

#### 4) Cálculo de emisiones y factores de emisión

En este trabajo, para estimar las emisiones se considera, general una aproximación *top-down*. Aquí se detallan los sectores que consideran una aproximación *bottom-up*, esto es, transporte y quema de leña para calefacción residencial.

##### a) *Transporte*

Para el sector transporte se utilizó la metodología *bottom-up*, utilizada por (SECTRA, 2014). Así, se estimaron las demandas de pasajero y carga del transporte en Chile a través de las variables Pasajero-Kilometro (PKM) y Tonelada-Kilometro (TKM). Estas demandas expresan la cantidad de kilómetros que recorre un vehículo, dependiendo de su tasa de ocupación o carga (Nivel de uso de un modo de transporte expresado en [pasajero/vehículo] o [tonelada/vehículo]). La metodología consiste en estimar estas demandas (PKM y TKM) por distintos subsectores del sector transporte, buscando emular la metodología utilizada en el inventario de carbono negro (GreenlabUC, 2016), incluyendo modos (metro, bicicleta o peatones). La clasificación preliminar del sector transporte es la indicada la Tabla 20.

El cálculo de emisiones se realizará mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Emisiones [masa]} = \frac{\text{PKM [Pasajero - Kilometro]}}{\text{Tasa de Ocupación } \left[ \frac{\text{Pasajero}}{\text{Vehículo}} \right]} \times \text{Factor de emisión } \frac{[\text{masa}]}{[\text{kilometro}]}$$

##### b) *Leña Residencial*

Para el sector leña residencial se propone estimar las emisiones diferenciando consumos energéticos por vivienda según la Región de Chile en la que esta se encuentre. El consumo energético por vivienda en Chile varía de norte a sur, mientras que en lugares costeros del norte el clima hace que la calefacción no sea necesaria, en el sur es indispensable para el hogar (MINVU, 2009). Sumado a esto, los hogares del sur de Chile se calefaccionan mayoritariamente con leña, lo que hace relevante el análisis por Región Política de Chile. Por lo tanto, se propone evaluar los consumos por tipología de vivienda, reglamentación térmica, tipo de combustible, condición del combustible y medio de uso. A continuación, se detalla la metodología propuesta para el cálculo de emisiones del sector leña residencial:

$$\text{Emisiones [masa]} = \frac{\text{Consumo}_{i,j,k} [\text{energía}]}{\text{tipo de artefacto} [\%]} \times \text{factor de emisión}_{l,m} \left[ \frac{\text{masa}}{\text{energía}} \right]$$

i: Tipología de vivienda.

j: Reglamentación térmica.

k: Región de Chile.

l: Tipo de combustible (tipo de leña).

m: Condición del combustible (% humedad).

Tabla 20. Clasificación del sector transporte

	Categorías	Resumen
Tipo de Demanda	<ul style="list-style-type: none"> <li>- PKM</li> <li>- TKM</li> </ul>	La ventaja de estas variables es la posibilidad de evaluar un eventual cambio modal en el transporte.
Ámbito	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Urbano</li> <li>- Interurbano</li> </ul>	La desagregación por ámbito es relevante para evaluar distintos usos de los vehículos, es decir, evaluar los niveles de uso de los vehículos en distintos ámbitos.
Categoría vehicular	<b>PKM</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Buses Articulados</li> <li>- Buses Rígidos</li> <li>- Buses Interprovinciales</li> <li>- Vehículo Liviano Comercial</li> <li>- Vehículo Liviano Pasajero</li> <li>- Taxis</li> <li>- Aéreo</li> <li>- Ferroviario</li> <li>- No Motorizados</li> </ul>	
	<b>TKM</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Camión Liviano</li> <li>- Camión Mediano</li> <li>- Camión Pesado</li> <li>- Ferroviario</li> <li>- Marítimo</li> </ul>	
Motorización	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Diésel</li> <li>- Gasolina</li> <li>- Eléctrico</li> <li>- Petróleo crudo</li> </ul>	El combustible utilizado tiene un impacto directo en las emisiones (SECTRA, 2014).
Tecnología	Normas de emisiones vehiculares	Se evaluará la entrada de nuevas normas de emisiones.

**c) Generación Eléctrica**

Para el análisis del sector generación eléctrica, se evaluó el consumo energético de cada planta de generación eléctrica del país. Esto permitirá estimar las emisiones de cada planta y el beneficio de las diferentes políticas dentro de este sector. Se buscó utilizar la metodología de (GreenlabUC, 2016) en conjunto con información del Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes (RETC, <https://retc.mma.gob.cl/>). A continuación, se detalla la metodología propuesta para el cálculo de emisiones del sector generación eléctrica:

$$\text{Emisiones [masa]} = \text{Consumo}_i[\text{energía}] \times \text{FE}\left[\frac{\text{masa}}{\text{energía}}\right] \times (1 - \text{Abatimiento [\%]})$$

i: Tipo de combustible.

**d) Factores de emisión**

Como ya se dijo, se realizó una exhaustiva búsqueda de factores de emisión para BC. Por lo general las emisiones de BC se derivan de las emisiones de MP<sub>2,5</sub>, suponiendo que una fracción del MP<sub>2,5</sub> es BC, por lo que para esto se realizó, también una búsqueda de factores de emisión de MP<sub>2,5</sub>. Los resultados de esta búsqueda se muestran en detalla de modo digital pues cada factor de emisión y referencia correspondiente se detalla en la configuración de LEAP. Aquí sólo se muestra la diversidad de factores de emisión en el caso de quema de biomasa, particularmente al comparar los factores de emisión usados en diversos planes de descontaminación.

Observando la figura se ve la variabilidad de factores de emisión, en particular, para el uso de diferentes estufas a leña o pellet. Destaca que los factores más pequeños y los más grandes (Planes de Descontaminación Atmosférica) poseen casi dos órdenes de magnitud de diferencia. Por nuestra parte, para la estimación de emisiones del sector residencial, en particular calefacción, se utilizó el factor de emisión señalado en la figura, el cual corresponde al utilizado en (MMA, 2018). La decisión de utilizar dicho factor de emisión fue para mantener consistencia con lo comunicado por el MMA (MMA, 2018), vale decir, se adoptó el factor indicado en Akagi et al. (2011). En el caso de los planes, no siempre se encuentra una referencia en estudios sujetos a revisión por pares.

Por otra parte, cabe señalar que esta variabilidad de los factores de emisión levanta una necesidad de mejor caracterización y medición de estos y la mantención de los inventarios de emisión de Chile. Lo anterior es particularmente relevante para forzantes climáticos de vida media corta y sus precursores ya que sus emisiones dependen de diferentes variables cuyas características dependen, por ejemplo, de condiciones de operación de una estufa o de cómo se mide (Kindbom et al., 2017; Padilla-Barrera et al., 2019).

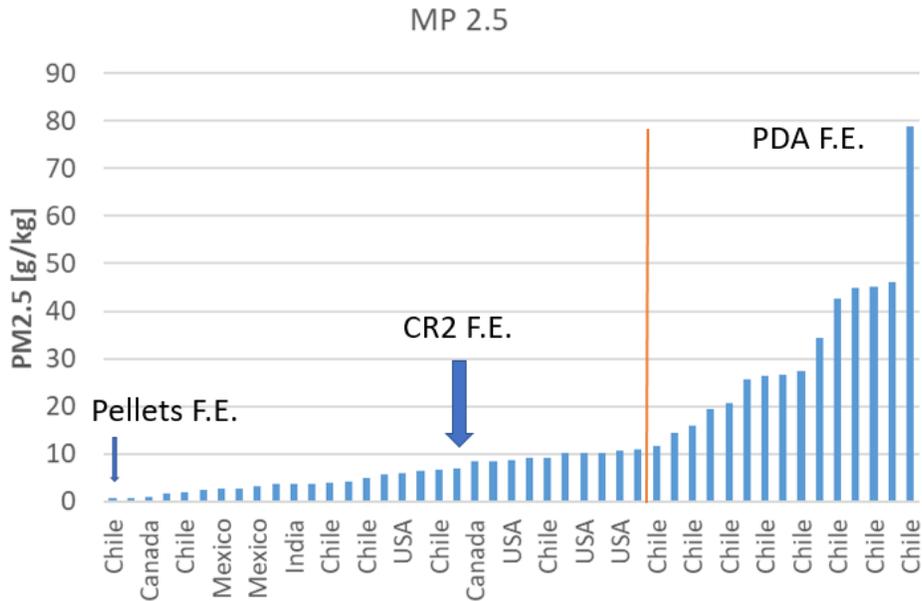


Figura 73 Variabilidad de factores de emisión (F.E) para  $MP_{2.5}$ . A la derecha de la línea naranja se muestra el rango de factores de emisión considerados en distintos planes de descontaminación atmosférica.

## 5) Proyecciones de emisiones de carbono negro

### a) Escenario de políticas actuales

El primer escenario, como se menciona en la sección anterior, compila las medias de mitigación actualmente en vigencia y en plan de implementación del Gobierno de Chile. A continuación, se presentan los resultados de las emisiones de  $CO_{2eq}$  y de las emisiones de BC para el escenario políticas actuales.

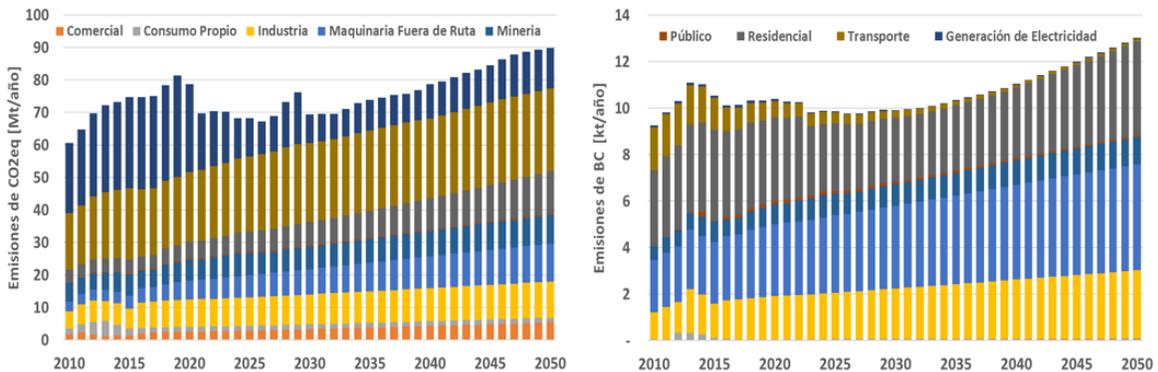


Figura 74. Emisiones de  $CO_{2eq}$  (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) bajo el escenario de políticas actuales para el sector energía, excluyendo los sectores: aéreo, marítimo y de MFR con potencia superior a 560 kW.

Al observar las emisiones de GEI y de BC, se puede notar que en el escenario políticas actuales, los dos contaminantes alcanzan una disminución de emisiones en el periodo 2010-2050, además, no cambian su tendencia de crecimiento en el total del periodo. Sin embargo, en algunos tramos del periodo, las emisiones muestran una tendencia a la baja. Para el caso de los GEI se ve que las emisiones logran tener una tendencia de decrecimiento en el periodo 2019 al 2026, según el escenario, para luego aumentar de manera casi lineal hasta el 2050 (salvo por el máximo relativo en el año 2029). Por otro lado, las emisiones de BC también disminuyen durante un periodo, para luego aumentar. Las emisiones de BC disminuyen durante el periodo 2020 al 2026 y luego aumentan constantemente al 2050. Cabe mencionar que, a pesar de que ambas trayectorias muestran un aumento en las emisiones en todo el periodo, las emisiones de GEI no son un *proxy* de las emisiones de BC, notándose claramente la diferencia en la contribución de cada sector a la totalidad de las emisiones. Por ejemplo, en las emisiones de GEI, el Sector Generación de Electricidad es relevante en casi todo el periodo, mientras que para las emisiones de BC, no lo es. Esto es claramente un indicador que un abatimiento fuerte de GEI (como la descarbonización de la matriz energética) no impacta necesariamente en las emisiones de BC.

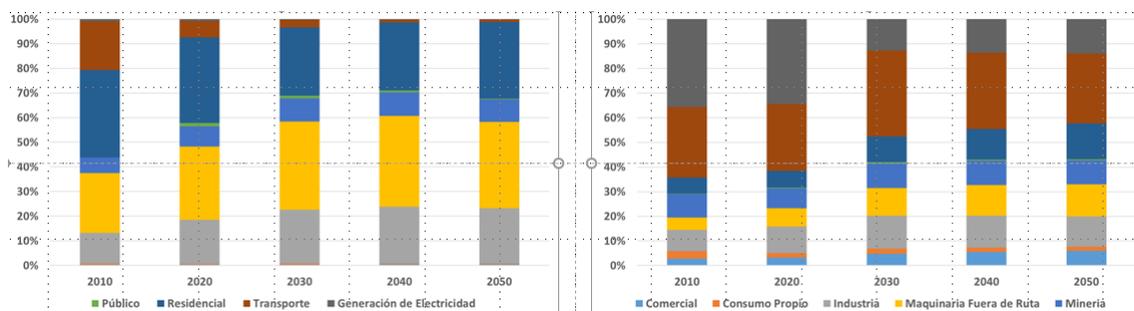


Figura 75 Evolución porcentual de las emisiones de CO<sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) para el Sector Energía (excluye Aéreo y Marítimo). Escenario políticas actuales.

Como ya se indicó, la contribución de cada sector a las emisiones contaminantes varía según el contaminante que se está observando. A continuación, se presenta la evolución de cada sector en las emisiones de GEI y BC a lo largo de todo el periodo.

Al observar la contribución de los diferentes sectores a las emisiones de GEI y de BC destaca la diferencia entre la participación de cada sector. Por un lado, las emisiones de GEI están dominadas por los Sectores Transporte y Generación de Electricidad durante todo el periodo. Por otro lado, las emisiones de BC de estos dos sectores no son relevantes (solo transporte en el 2010). Los valores de estos porcentajes se presentan a continuación.

Tabla 21 Emisiones de CO<sub>2eq</sub> (Mt/año) para el Sector Energía (excluye Aéreo y Marítimo). Escenario políticas actuales.

	2010	2020	2030	2040	2050
<b>Comercial</b>	1,7	2,5	3,3	4,3	5,4
<b>Consumo Propio</b>	1,9	1,5	1,5	1,5	1,5
<b>Industria</b>	5,2	8,5	9,2	10	11
<b>MFR</b>	3,0	5,8	7,8	9,8	12
<b>Minería</b>	5,8	6,3	6,9	7,8	8,8
<b>Público</b>	0,1	0,3	0,3	0,4	0,4
<b>Residencial</b>	4,0	5,3	7,3	9,7	13
<b>Transporte</b>	17	21	24	24	26
<b>GE</b>	22	27	8,8	11	13
<b>Total</b>	<b>61</b>	<b>79</b>	<b>69</b>	<b>79</b>	<b>90</b>

Observando la Tabla 21 se puede ver que las emisiones de todos los sectores aumentan, salvo, las emisiones del Sector GE. El mayor de los aumentos se da en el Sector Residencial, con 9,2 Mt de CO<sub>2eq</sub>, seguido por los Sectores MFR y Transporte, con 8,6 y 8,2 Mt de CO<sub>2eq</sub> respectivamente. Para el caso del Sector GE, las emisiones se reducen 9,0 Mt de CO<sub>2eq</sub>. Cabe mencionar, que estas diferencias son obtenidas entre el año base y el año final., es decir, todo el periodo de simulación.

Tabla 22 Emisiones de BC (kton/a) para el Sector Energía (excluye Aéreo y Marítimo). Escenario políticas actuales.

Sector	2010	2020	2030	2040	2050
<b>Comercial</b>	3x10 <sup>-2</sup>	3x10 <sup>-2</sup>	4x10 <sup>-2</sup>	5x10 <sup>-2</sup>	6x10 <sup>-2</sup>
<b>Consumo Propio</b>	4x10 <sup>-2</sup>				
<b>Industria</b>	1,2	1,7	2,2	2,6	2,9
<b>MFR</b>	2,2	3,1	3,6	4,1	4,6
<b>Minería</b>	0,6	0,9	0,9	1,0	1,2
<b>Público</b>	1x10 <sup>-3</sup>	0,1	0,1	0,1	0,1
<b>Residencial</b>	3,3	3,6	2,8	3,0	4,0
<b>Transporte</b>	1,8	0,7	0,3	0,1	0,1
<b>Generación Eléctrica</b>	0,9	0,1	3x10 <sup>-2</sup>	4x10 <sup>-2</sup>	4x10 <sup>-2</sup>
<b>Total</b>	<b>9,3</b>	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>13</b>

Con respecto a las emisiones de BC, se nota una disminución sustancial en las emisiones del Sector Transporte, reduciéndose a valores de un orden de magnitud menor, lo que se traduce en una reducción de 1,7 kton de BC. No obstante, lo demás sectores comienzan a aumentar sus emisiones de BC, donde el Sector MFR y el Sector Industria aumentan en 2,4 y 1,7 kton de BC, respectivamente.

Por otra parte, se presentan las emisiones de los Sectores Aéreo y Marítimo por separado. Esto consecuencia de que las emisiones de estos sectores son de carácter internacional y las emisiones de BC son de carácter local. A continuación, se presentan los resultados.

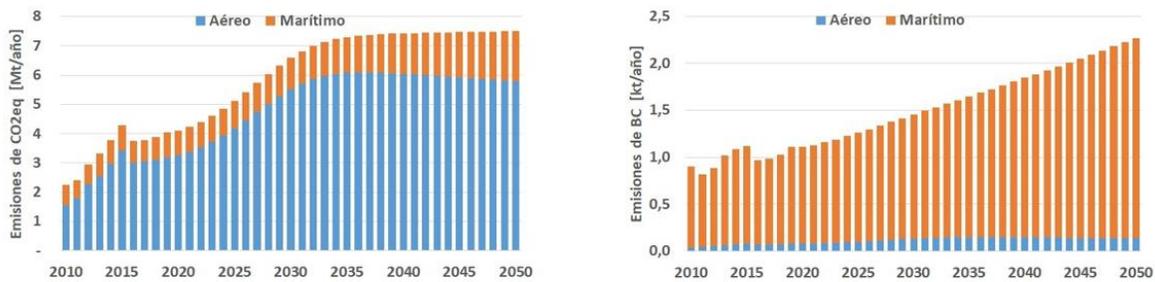


Figura 76 Emisiones de CO<sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) para los Sectores Aéreo y Marítimo. Escenario políticas actuales.

Con respecto a las emisiones de GEI de los Sectores Aéreo y Marítimo, se puede observar que estas no presentan mucha importancia en la totalidad de emisiones del país, sumando entre ambos 8 Mt de CO<sub>2eq</sub> al final del periodo. Sin embargo, las emisiones del sector aéreo aumentan en aproximadamente 3 veces su magnitud durante el periodo, lo que podría indicar su creciente importancia relevancia en los próximos años. Por otra parte, se puede notar el desacople entre las emisiones de BC y GEI: mientras que en las emisiones de GEI domina el sector aéreo, el sector marítimo domina en las emisiones de BC, las cuales 2,1 kton de BC al año 2050, lo que representa un 16% de las emisiones totales de Chile para dicho año.

En general, para el escenario políticas actuales, se desprende que las emisiones BC, aumentan en 4,0 kton desde el año 2010 al 2050, lo que corresponde a un aumento porcentual de 42% en todo el periodo. Por otro lado, las emisiones de CO<sub>2eq</sub> aumentan 31 Mton desde el 2010 al 2050, que se traduce en un aumento porcentual de 51%. Estas cifras muestran ver que, tanto para las emisiones de BC como para las emisiones de CO<sub>2eq</sub>, las medidas actualmente en implementación o en agenda del Gobierno, no son suficientes para tener una reducción o cambio en las trayectorias de las emisiones del Sector Energía.

**a) Escenario de carbono neutralidad**

El segundo escenario corresponde al carbono neutralidad, el cual incluyen una serie de medidas para alcanzar la neutralidad carbónica en Chile, tal como se expone en la sección anterior. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para CO<sub>2eq</sub> y BC.

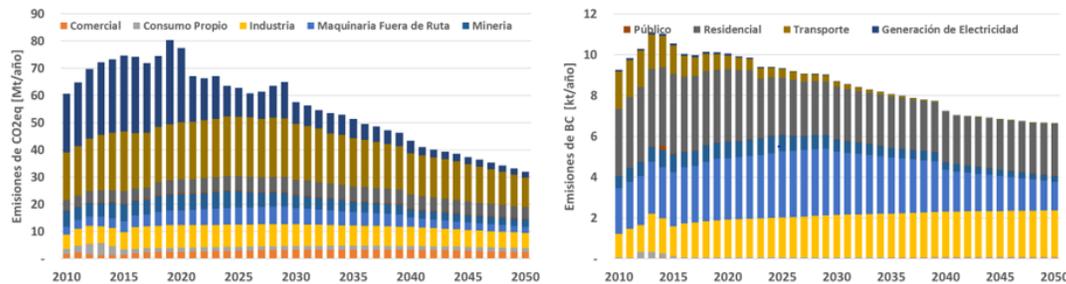


Figura 77 Emisiones de CO<sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) para el sector energía (excluye aéreo, marítimo y de maquinaria fuera de ruta con potencia superior a 560kW). Escenario carbono neutralidad.

Para el caso de las emisiones de CO<sub>2eq</sub> se puede ver una rápida reducción de las emisiones durante todo el periodo (salvo el *peak* en el 2029). Las emisiones de la mayoría de los sectores comienzan a reducirse desde los primeros años de proyección, debido a la fuerte entrada de energéticos más limpios o de “cero emisiones”. Por otro lado, las emisiones de BC, también poseen una disminución en el periodo, sin embargo, esta no es tan sustancial como en el caso de las emisiones de GEI. La disminución de GEI, deja en claro el desacople entre las emisiones de CO<sub>2eq</sub> y BC, donde una disminución sustancial en las emisiones de GEI, no se traduce en una reducción tan importante en las emisiones de BC. Por otro lado, este escenario muestra la relevancia de otros sectores que no aparecen en las emisiones de GEI, la participación de los sectores residencial, MFR e industria pasa a ser cada vez más relevante en las emisiones de BC. A continuación, se muestra la evolución de ambas trazas a lo largo de todo el periodo.

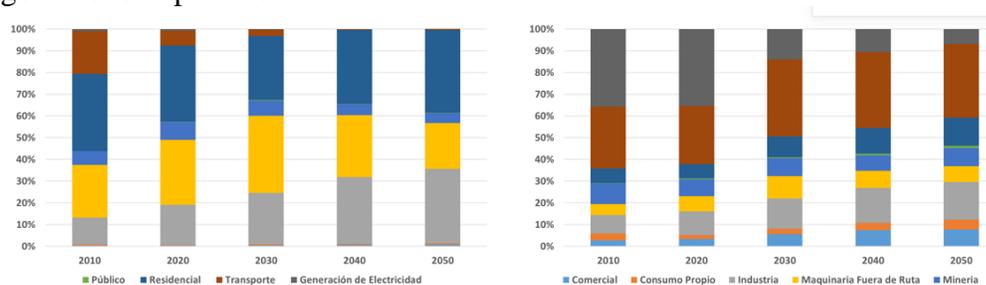


Figura 78. Evolución porcentual de las emisiones de CO<sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) para el sector energía (excluye sectores: aéreo, marítimo y MFR de más de 560 kW). Escenario carbono neutralidad.

Para el caso de las emisiones de GEI se mantiene el Sector Transporte como uno de los que contribuyen más a las emisiones en Chile, seguido por el Sector Industria. En este caso, se puede notar la eficacia de las medidas para la mitigación de GEI, reduciendo sustancialmente las emisiones de todos los sectores energéticos. Por otro lado, la evolución de las emisiones de BC muestran una similitud en la participación de sectores en los escenarios carbono neutralidad y políticas actuales, manteniendo los Sectores Residencial, MFR e Industria como los mayores contribuidores a las emisiones de BC en el país. Las emisiones que corresponden a estos porcentajes se presentan a continuación.

Tabla 23 Emisiones de CO<sub>2eq</sub> (Mt/año) para el sector energía (excluye sectores: aéreo, marítimo y MFR de más de 560 kW). Escenario carbono neutralidad.

Sector	2010	2020	2030	2040	2050
<b>Comercial</b>	1,7	2,5	3,2	3,2	2,5
<b>Consumo Propio</b>	1,9	1,5	1,5	1,5	1,5
<b>Industria</b>	5,2	8,4	8,0	7,0	5,6
<b>MFR</b>	3,0	5,4	5,9	3,4	2,3
<b>Minería</b>	5,8	6,0	4,7	3,1	2,7
<b>Público</b>	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3
<b>Residencial</b>	4,0	5,1	5,5	5,1	4,1
<b>Transporte</b>	17	21	20	15	11
<b>Generación Eléctrica</b>	22	27	8,0	4,6	2,2
<b>Total</b>	<b>61</b>	<b>77</b>	<b>58</b>	<b>43</b>	<b>32</b>

Al observar las emisiones de GEI se puede ver que el sector que posee una mayor reducción en sus emisiones es el de GE, con 19 Mt de CO<sub>2eq</sub>, seguido por los sectores Transporte y Minería, con 6,0 y 3,1 Mt de CO<sub>2eq</sub> respectivamente. Es notable la reducción del sector transporte la cual se atribuye a las medidas de electromovilidad intensiva, hidrógeno en camiones y eficiencia en vehículos.

Tabla 24 Emisiones de BC (kton/a) para el Sector Energía (excluye sectores: aéreo, marítimo y MFR de más de 560 kW)). Escenario carbono neutralidad.

	2010	2020	2030	2040	2050
<b>Comercial</b>	3x10 <sup>-2</sup>	3x10 <sup>-2</sup>	3x10 <sup>-2</sup>	4x10 <sup>-2</sup>	5x10 <sup>-2</sup>
<b>Consumo Propio</b>	4x10 <sup>-2</sup>				
<b>Industria</b>	1,2	1,9	2,1	2,2	2,3
<b>MFR</b>	2,2	3,0	3,1	2,1	1,4
<b>Minería</b>	0,6	0,8	0,6	0,4	0,3
<b>Público</b>	1x10 <sup>-3</sup>	2x10 <sup>-2</sup>	2x10 <sup>-2</sup>	1x10 <sup>-2</sup>	1x10 <sup>-2</sup>
<b>Residencial</b>	3,3	3,5	2,6	2,5	2,5
<b>Transporte</b>	1,8	0,7	0,3	3x10 <sup>-2</sup>	2x10 <sup>-2</sup>
<b>Generación eléctrica</b>	0,1	0,1	3x10 <sup>-2</sup>	1x10 <sup>-2</sup>	1x10 <sup>-2</sup>
<b>Total</b>	<b>9,3</b>	<b>10</b>	<b>8,7</b>	<b>7,2</b>	<b>6,6</b>

Como se puede ver, las emisiones de BC, se puede ver claramente los sectores relevantes: por un lado, están las emisiones del sector Residencial que, si bien disminuyen con el tiempo, estas aún son casi la mitad de las emisiones totales del país al año 2050; y, por otro lado, tenemos las emisiones de los sectores Industria y MFR que cubren la mayor parte del resto de las emisiones al 2050, con 2,3 y 1,4 kton de BC respectivamente.

Al igual que en el escenario anterior, se separan las emisiones de los sectores: aéreo, marítimo, y de MFR con potencia superior a 560 kW. A continuación, se presentan los resultados.

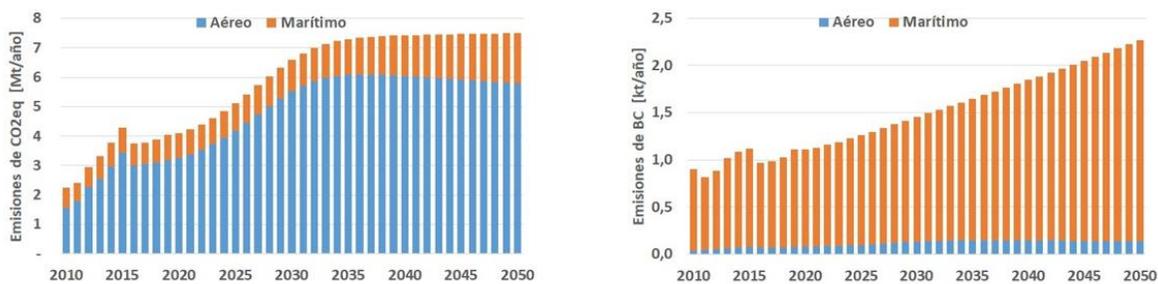


Figura 79 Emisiones de CO<sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) para los sectores aéreo y marítimo bajo el escenario de carbono neutralidad. En azul se muestra el sector aéreo y en naranja el sector marítimo.

La evolución de los sectores aéreo y marítimo mostrados en la figura 79 evidencian la diferencia que existe entre ambas en cuanto a sus contribuciones a dióxido de carbono equivalente (dominado por el sector aéreo) y carbono negro (dominado por el sector marítimo). Además, ambos sectores van aumentando su contribución relativa a las emisiones

totales de Chile, tanto en dióxido de carbono equivalente como de carbono negro. Esto subraya la necesidad de controlar y normar estos sectores en el contexto de los objetivos de desarrollo sostenible y del Acuerdo de París.

En una primera conclusión observando la totalidad del escenario carbono neutralidad, se puede ver una clara disminución de GEI y BC al 2050, las que se traducen en 19 Mt de CO<sub>2eq</sub> y 2,7 kton de BC. Estas reducciones se deben mayormente a la implementación de medidas tecnológicas, es decir, cambio de una tecnología antigua a una más limpia, dejando de lado cambios estructurales o culturales que podrían ser necesarios para reducir aún más las emisiones contaminantes del país. Particularmente si se quiere tener un beneficio en términos de la salud de la población. En efecto, se puede ver que en el escenario carbono neutralidad, también se traduce en una reducción de BC, aún si su distribución espacial probablemente no redunde en la mejoría de la calidad del aire en centro y sur del país.

**b) Escenario de carbono neutralidad +**

El tercer escenario corresponde a un aporte del equipo CR2 a este estudio, donde se evalúan dos medidas extras a las ya incluidas en los escenarios previamente presentados. El motivo de la evaluación de este escenario es el de cuantificar la reducción de medidas específicas para BC que aplican para CO<sub>2eq</sub>, como el caso de calefacción distrital y que tienen un carácter eminentemente urbano y están colocalizados con la población expuesta a contaminación atmosférica y pobreza energética en Chile. A diferencia de los escenarios anteriores, en este apartado, solo se presentarán las emisiones de CO<sub>2eq</sub> y BC para el sector energía, sin los sectores aéreo, marítimo y de MFR con potencia superior a 560 kW, para luego mostrar una tabla con las emisiones finales de BC este escenario. A continuación, se presentan los resultados obtenidos.

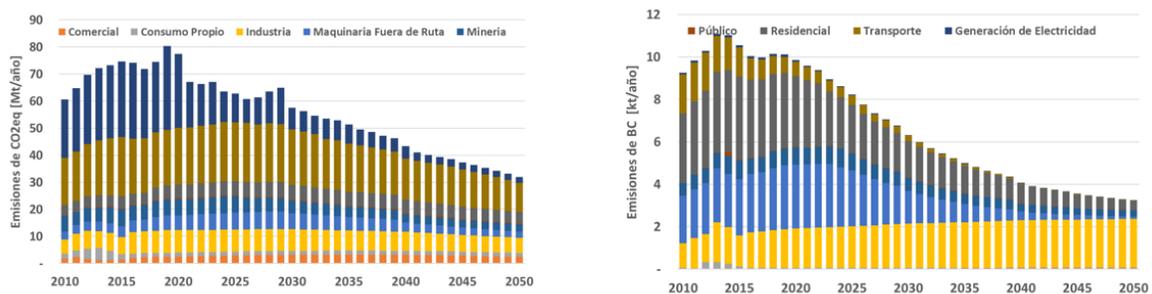


Figura 80. Emisiones de CO<sub>2eq</sub> (panel izquierdo) y de BC (panel derecho) para el sector energía (excluyendo los escenarios: aéreo, marítimo y de MFR para maquinaria de potencia superior a 560 kW bajo el escenario de neutralidad +).

Con respecto a las emisiones de GEI, estas presentan una pequeña diferencia, que es marginal en comparación a la totalidad de las emisiones. Por lo tanto, las medidas evaluadas en este escenario, considerando los supuestos utilizados, no tendrían un impacto real en las emisiones de GEI. En cambio, las emisiones de BC, presentan una gran disminución manteniendo una tendencia a la baja dentro de toda la proyección. Por otra parte, se presentan los valores alcanzados de las emisiones.

Tabla 25 Emisiones de BC (kton/a) para el Sector Energía (excluye Aéreo y Marítimo). Escenario Neutralidad +.

Sector	2010	2020	2030	2040	2050
<b>Comercial</b>	$3 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-2}$	$4 \times 10^{-2}$	$5 \times 10^{-2}$
<b>Consumo Propio</b>	$4 \times 10^{-2}$				
<b>Industria</b>	1,2	1,9	2,1	2,2	2,3
<b>MFR</b>	2,2	3,0	1,6	0,4	0,1
<b>Minería</b>	0,6	0,8	0,6	0,4	0,3
<b>Público</b>	$1 \times 10^{-3}$	$2 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$
<b>Residencial</b>	3,3	3,3	1,7	0,9	0,4
<b>Transporte</b>	1,8	0,7	0,3	$3 \times 10^{-2}$	$2 \times 10^{-2}$
<b>Generación eléctrica</b>	0,1	0,1	$3 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-2}$
Total	9,3	10	6,3	4,1	3,2

La Tabla 25 indica claramente la reducción de las emisiones de los sectores impactados por las medidas. Para el caso del sector MFR, la nueva normativa implicaría una reducción de 2,1 kton de BC, 0,7 kton más de BC que en el escenario anterior. Para el caso de las emisiones del sector residencial, la reducción alcanza las 2,9 kton de BC, 1,9 kton más que en el escenario anterior.

Los resultados de este escenario muestran el espacio para más ambición que dejan los escenarios actualmente planteados, donde, por una parte, las medidas del sector MFR es una regulación que actualmente se encuentra en discusión en el MMA, que traería consigo una reducción importante de las emisiones de BC. Por otra parte, la medida de calefacción distrital que, siendo una medida tecnológica, ella conlleva considera un cambio estructural de cómo los ciudadanos perciben la calefacción y el confort térmico. Ello, a su vez, hace requiere enfatizar a los aspectos tecnológicos, y con igual fuerza los aspectos sociales (Amigo-Jorquera, 2019). Esta medida requiere, además, de una fuerte inversión, pero logra una disminución sustantiva de las emisiones de BC, la que acarrea beneficios tanto para la salud como para el clima regional y así también de ahorros para el sistema público de salud.

A modo de resumen, se presenta una tabla con las reducciones de BC para cada escenario, estas emisiones consideran todas las emisiones del sector energía (excluyendo los sectores Aéreo y Marítimo).

Tabla 26 Reducciones esperadas de BC para los escenarios de políticas actuales, carbono neutralidad y carbono neutralidad +.

Escenarios	2020	2030	2040	2050
<b>Políticas Actuales</b>	10	9,9	11	13
<b>Carbono neutralidad</b>	10	8,7	7,2	6,6
<b>Carbono neutralidad +</b>	10	6,3	4,1	3,2
<b>Reducciones con respecto al escenario políticas actuales [%]</b>				
<b>Carbono neutralidad</b>	-	12	35	49
<b>Carbono neutralidad +</b>	-	36	63	75

## 6) Proyecciones de emisiones de trazas coemitidas

La mitigación de gases de efecto invernadero también conlleva a la reducción de otras trazas contaminantes, no sólo carbono negro. Una estimación de dichas reducciones se ilustra

en siguiente figura. Esta estimación se hace usando la misma herramienta (LEAP-IBC) y considerando los mismos escenarios antes descritos.

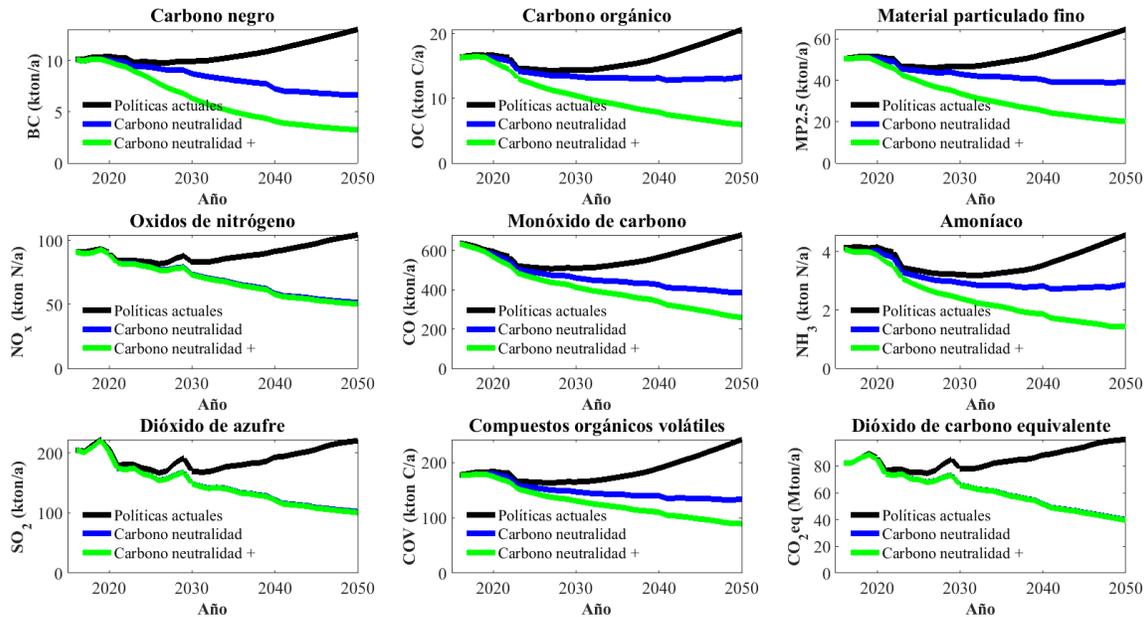


Figura 81. Trayectorias de emisiones de trazas contaminantes y gases de efecto invernadero entre 2016 y 2050, considerando políticas actuales (línea negra), carbono neutralidad (línea azul) y carbono neutralidad + (línea verde). Estas trayectorias no contemplan a los sectores aéreo y marítimo.

El material particulado completamente respirable (fino), como es de esperar, coevoluciona con el carbono negro y el carbono orgánico, pues estos últimos son fracciones del primero. El monóxido de carbono y los compuestos orgánicos volátiles siguen trayectorias similares entre sí y con el material particulado, pues todos se asocian a la quema incompleta de combustibles. La quema de leña constituye para estos contaminantes una fuente relevante y, por lo tanto, el escenario de carbono neutralidad + se expresa en mayor mitigación que el escenario de carbono neutralidad. Las emisiones de óxidos de nitrógeno disminuyen con la “carbono neutralidad” en tanto disminuyen las contribuciones del sector transporte y de las termoeléctricas. Pero llama la atención que no se observe una mayor disminución con la medida de calefacción distrital, pues la quema de leña sí se asocia con emisiones de óxidos de nitrógeno, e.g., (Padilla-Barrera et al., 2019). Las proyecciones para dióxido de azufre siguen las de gases de efecto invernadero y se asocian al consumo de combustibles fósil en la industria. El sector transporte no pesa significativamente pues, en general, ese combustible tiene bajas tasas de azufre. Cabe señalar que los escenarios no contemplan reducciones de las emisiones asociadas a la fundición de metales, cobre en particular, sector que constituye la principal fuente de azufre oxidado en Chile.

Globalmente, el amoníaco se asocia al sector agropecuario, incluyendo uso de fertilizantes y excreta animal, y al sector industrial, incluyendo la producción de fertilizantes (Van Damme et al., 2018). La quema de biomasa y fuentes como tránsito vehicular, plantas de tratamiento de agua y basura son de importancia en las zonas urbanas (Sun et al., 2017; Toro et al., 2014). En este estudio se hizo una estimación de las emisiones de amoníaco

asociadas al sector residencial (leña), industria y minería, y producción de energía, pero se excluyó transporte y actividades agropecuarias, siendo la leña el sector dominante (cerca de un 93 %) entre ellos. Por ello, la introducción de calefacción distrital resulta tan relevante en esta estimación. Hay que tener presente que el NH<sub>3</sub> es un precursor de material particulado, el cual, a su vez, tiene impactos tanto sobre la salud como sobre el clima a escala regional y, por ende, debiera ser mejor caracterizado.

Observando la figura anterior, se desprende una fuerte participación del sector CPR en la mayoría de las trazas coemitidas, sin embargo, este sector participa poco las emisiones de SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y CO<sub>2eq</sub>. Por otra parte, el sector industria participa mayormente de las emisiones de SO<sub>2</sub>, el sector MFR por su parte, contribuye mayormente a las emisiones de BC, el sector minería tiene una participación relativamente pequeña en todas las trazas, por otro lado, la participación del sector transporte se da mayormente en las emisiones de NO<sub>x</sub>, CO y CO<sub>2eq</sub>, el sector generación de electricidad, es el mayor emisor de SO<sub>2</sub> y CO<sub>2eq</sub>, y también participa considerablemente en las emisiones de NO<sub>x</sub>. Cabe destacar que estas trazas fueron obtenidas a través de una metodología *top-down* (*bottom-up* para el caso de calefacción, transporte terrestre y MFR), por lo que, tanto su participación como trayectorias, podrían variar en un análisis más profundo de los sectores. Por otro lado, se muestran en una tabla las emisiones de las trazas coemitidas.

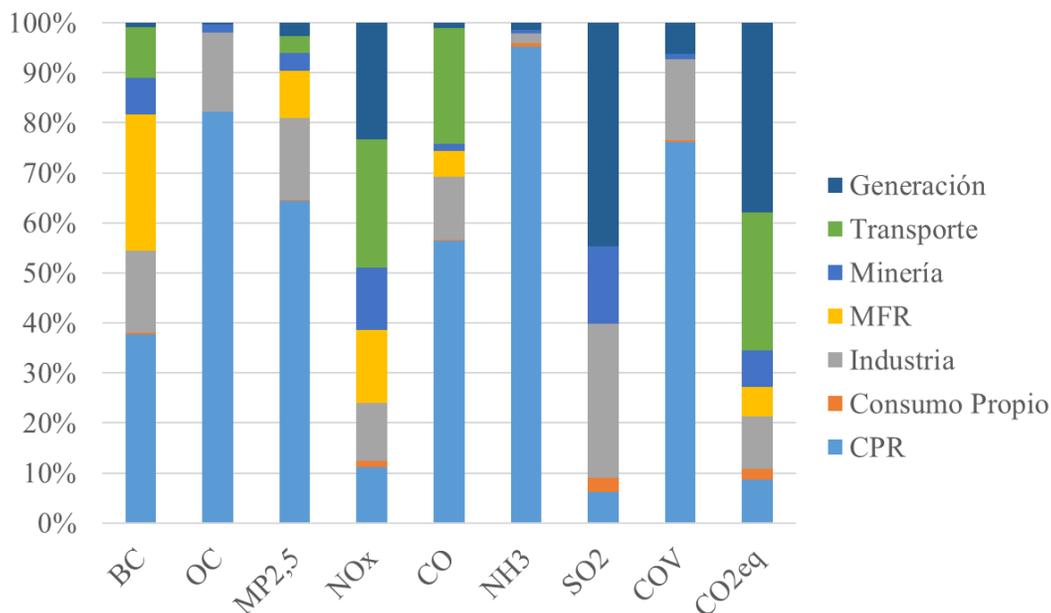


Figura 82 Participación relativa de los distintos sectores en la emisión de las trazas coemitidas para el año 2016. Se excluye el sector aéreo y marítimo, y se agrupan los sectores: comercial, público y residencial en el sector CPR, debido a la baja contribución de los dos primeros sectores mencionados.

Tabla 27 Emisiones de trazas coemitidas para el año 2016 [kton/a]

Sector	BC	OC	MP <sub>2,5</sub>	NO <sub>x</sub>	CO	NH <sub>3</sub>	SO <sub>2</sub>	COV	CO <sub>2eq</sub>
<b>CPR</b>	3,8	13	31	11	356	3,9	12	135	6,5
<b>Consumo Propio</b>	5x10 <sup>-2</sup>	2x10 <sup>-2</sup>	0,1	1,2	0,7	3x10 <sup>-2</sup>	5,6	0,4	1,6
<b>Industria</b>	1,7	2,6	8,0	12	79	0,1	62	29	7,9
<b>MFR</b>	2,8	-	4,6	14	33	-	0,1	-	4,3
<b>Minería</b>	0,7	0,3	1,7	13	8,3	3x10 <sup>-2</sup>	31	2,0	5,4
<b>Transporte</b>	1,0	-	1,6	26	147	-	-	-	21
<b>Generación</b>	0,1	0,1	1,3	23	6,5	0,1	90	11	28

### 7) Sobre impactos en mortalidad

Como ya se dijo, las relaciones entre dosis y respuesta o entre exposición y respuesta considerados no son necesariamente representativos, entre otros, por los niveles de concentración para los cuales fueron desarrollados y los confundentes asociados a la salud de cada población (Anenberg et al., 2016; Hasenkopf, 2016). Adicionalmente a los problemas derivados de la determinación de la relación entre dosis y respuesta, en el caso de Chile continental, dada su topografía compleja, resulta particularmente difícil estimar los niveles de material particulado a los que está expuesta la población basándose en modelos globales como los que subyacen a la herramienta en uso (Henze et al., 2007). Estudios recientes usan resultados de modelos globales que simulan la calidad del aire, pero que se han “corregido” con inferencias satelitales de la distribución de material particulado e.g., (Alvarado et al., 2019; Anenberg et al., 2019; van Donkelaar et al., 2010; Shaddick et al., 2018). Esta nueva aproximación resulta prometedora, pero la misma no está disponible al momento de escribir este informe. Con todo, la estimación de impactos sobre la mortalidad por carbono negro en uso no cuenta con una contextualización nacional ni una distribución espacial suficiente para realizar una proyección confiable. No obstante, como ya se indicó, es amplia la evidencia del impacto nocivo del material particulado completamente respirable en la salud de la población. En suma, para los fines de este estudio no se considera cuantitativamente la aplicación de IBC. La misma se encuentra documentada no obstante en el Anexo 3.

#### **IV. MEDICIÓN, REPORTE Y VERIFICACIÓN (MRV)**

El seguimiento de los compromisos de mitigación corresponde a una acción clave para garantizar que las emisiones se reduzcan efectivamente. Para ello se debe realizar un procedimiento de medición, reporte y verificación (MRV). Esto sirve para identificar fuentes, caracterizar trayectorias de emisiones, diseñar estrategias de mitigación, y, ciertamente, para dar transparencia y credibilidad a los procesos, permitiendo corregir el curso en el caso de ser necesario (WRI, 2016). Las iniciativas de MRV pueden referirse al seguimiento de emisiones, acción climática o de financiamiento. Bajo la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, Chile debe comunicar a la Conferencia de las Partes (COP) información relevante para la implementación de los acuerdos, en particular los compromisos de mitigación. En nuestra opinión es recomendable utilizar la misma aproximación, incorporando ahora un MRV para carbono negro y, posiblemente otros forzantes de vida media corta y sus precursores. Esto se vuelve imprescindible al momento que Chile está comprometiendo una meta de carbono negro, la cual debe ser medible, reportable y verificable en su Contribución Nacionalmente Determinada. En suma, la medición, reporte y verificación (MRV) tiene dos claras dimensiones: 1) la dimensión internacional, la que corresponde a medir, reportar y verificar los compromisos del y; 2) la dimensión nacional, donde se realizan los MRV por medida de mitigación de los diferentes sectores. En la presente sección se realiza una exposición general de ambos aspectos.

En lo que respecta a gases de efecto invernadero, el Artículo 12 de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, obliga a todas las partes, de conformidad con el Artículo 4, párrafo 4, a comunicar a la Conferencia de las Partes (COP) información relevante para la implementación de la Convención, incluso en relación con las emisiones y absorciones. Esto tiene por objetivo que la Convención tenga información confiable, transparente e integral sobre emisiones, acciones y apoyo, formando así una base esencial para comprender los niveles actuales de emisiones y la ambición de los esfuerzos existentes, así como el progreso a escala nacional e internacional. Las medidas para mejorar significativamente la transparencia de la acción y el apoyo en virtud de la Convención se adoptaron como parte del Plan de Acción de Bali en la COP 13 y se elaboraron en las decisiones adoptadas en las Conferencias de las Partes posteriores.

En el caso del desarrollo del MRV es necesario considerar todas las decisiones adoptadas en las negociaciones internacionales sobre disposiciones de medición, presentación de informes y verificación (MRV) para los países en desarrollo en virtud de la Convención, incluida la medición y presentación de informes a través de comunicaciones nacionales e informes bienales de actualización (BUR); procedimientos para consultas y análisis internacionales (ICA); y pautas para los marcos nacionales de MRV, incluidos aquellos para acciones de mitigación apropiadas para el país (NAMA) y actividades relacionadas con la reducción de las emisiones de la deforestación y la degradación forestal, y el papel de la conservación, la gestión sostenible de los bosques y la mejora del forestal existencias en países en desarrollo (REDD-plus).

En el caso del carbono negro es recomendable utilizar la misma metodología incorporando este contaminante a las cuantificaciones, informes, validaciones, etc. Que permitan responder a lo establecido en el Artículo 12, es aún más relevante considerando que Chile se está comprometiendo con una meta de carbono negro la cuál debe ser medible, reportable y verificable. Así, como Chile ya ha desarrollado varias iniciativas que permitirían

realizar un seguimiento específico a las medidas de mitigación de gases de efecto invernadero, nos parece que estas iniciativas debieran extenderse a carbono negro. Las iniciativas y modificaciones sugeridas se muestran en la Tabla 28.

*Tabla 28. Iniciativas MRV ya adoptadas por Chile. Se indica brevemente cómo se aplicaría o extendería al caso de carbono negro*

<b>Iniciativa</b>	<b>Institución responsable</b>	<b>Cómo abordaría BC</b>
Programa de fomento de capacidades en desarrollo bajo en emisiones ( <i>Low Emission Capacity Building</i> , LECB) (UNDP-MMA, 2016)	Ministerio del Medio Ambiente, MMA	Inclusión de carbono negro en el Sistema Nacional de Inventarios ( <a href="http://snichile.mma.gob.cl/">http://snichile.mma.gob.cl/</a> )  Incorporar reglas de contabilidad de emisiones de carbono negro.  Inclusión de MRV para BC en la plataforma centralizada que contempla la iniciativa.
Impuesto al dióxido de carbono, material particulado, óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre y dióxido de carbono (Impuesto verde) ( <a href="http://bcn.cl/1zh10">http://bcn.cl/1zh10</a> )	Superintendencia del Medio Ambiente, SMA  Ministerio de Hacienda	La ley debiera modificarse para incorporar carbono negro.
Acciones de mitigación del sector energía (Precio al carbono, <a href="http://www.precioalcarbonochile.cl/">http://www.precioalcarbonochile.cl/</a> )	Ministerio de Energía	Existen estudios para la implementación de un sistema MRV para la mitigación de gases de efecto invernadero para los sectores generación de electricidad, industrial y de la minería, y comercial, público y residencial. Dicho MRV debiera ser ampliado a carbono negro.
Comuna energética	Ministerio de Energía	Este programa busca apoyar a los municipios a elaborar estrategias energéticas locales con planes de acción ideados desde la comunidad, otorgando el Sello Comuna Energética. El mismo considera un MRV para gases de efecto invernadero, el que debiera extenderse a aerosoles, carbono negro en particular, en conexión con el sector residencial.
Proyectos de reacondicionamiento de viviendas existentes en el marco del proyecto <a href="https://www.worldbank.org/en/programs/ndc-support-facility">https://www.worldbank.org/en/programs/ndc-support-facility</a>  <a href="https://www.esmap.org/57d2486f-30ec-49b0-a8e9-5e025dbadea3">https://www.esmap.org/57d2486f-30ec-49b0-a8e9-5e025dbadea3</a>	Ministerio de Energía	En este marco se está desarrollando un sistema MRV que permita monitorear ahorros de consumo energético y cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero reducidas debido a la implementación de medidas de eficiencia energética aplicadas a través de reacondicionamiento de

		viviendas. El mismo debiera ampliarse a carbono negro.
<p>Certificado de Ahorro de Proyectos Energéticos (CAPE)</p> <p><a href="https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp">https://evo-world.org/en/products-services-mainmenu-en/protocols/ipmvp</a></p>	<p>Agencia de Sostenibilidad Energética</p>	<p>La iniciativa contempla un protocolo internacional para facilitar los informes de resultados energéticos y de mitigación de gases de efecto invernadero para proyecto energéticos. La certificación está diseñada para que empresas, instituciones, organismos o similares, que cuenten con proyectos energéticos en sus instalaciones, puedan validar las reducciones de consumo reales como consecuencia de su implementación. Esto debiese ser extendido a carbono negro.</p>

### 1) Elementos clave de marco MRV a nivel internacional

Actualmente, existe un marco establecido para MRV bajo la Convención para países en desarrollo, el cual consta de varios elementos que se han implementado gradualmente a través de un conjunto de decisiones de la COP. Principalmente, se reconocen los niveles de MRV Internacional, MRV Doméstico y MRV por REDD-plus.

#### a) *Medición*

Para los países no incluidos en el Anexo I se aplica tanto a los esfuerzos para abordar el cambio climático como a los impactos de estos esfuerzos, incluido el nivel de emisiones de gases de efecto invernadero por fuentes y sumideros, reducciones de emisiones y otros beneficios colaterales. Dicha medición ocurre a nivel nacional. Inicialmente, se refería a la medición de las emisiones de GEI a través de los inventarios nacionales de GEI, que se informan en las comunicaciones nacionales. Con base en las decisiones adoptadas en las COP 16 y 17, las partes no incluidas en el Anexo I ahora necesitan medir los efectos específicos de las acciones nacionales de mitigación, así como el apoyo necesario y recibido, y proporcionar esta información, incluido un informe de inventario nacional, como parte de sus informes de actualización bienales (*Biennial Update Reports*, BURs). Las metodologías para la medición no están definidas por la Convención; por lo tanto, al realizar mediciones, las Partes confían en metodologías desarrolladas externamente, incluido el Panel Intergubernamental sobre el cambio climático (IPCC) y otras organizaciones. Sin embargo, cuando sea posible, la COP identifica y respalda las metodologías que las partes deberían utilizar, como mínimo.

#### b) *Reporte*

Para los Países no incluidos en el Anexo I se implementa a través de las comunicaciones nacionales e informes de actualización bienales (BURs). Las Partes deben informar sobre sus acciones para abordar el cambio climático en sus comunicaciones nacionales, que incluyen información sobre los inventarios de GEI, adaptación, mitigación, acciones de igualación y sus efectos, limitaciones y brechas, apoyo necesario y recibido, y otra información considerada relevante para el logro del objetivo de la Convención. Las

comunicaciones nacionales deben presentarse cada cuatro años y prepararse siguiendo la orientación contenida en las directrices revisadas para la preparación de las comunicaciones nacionales de los países no incluidos en el Anexo I que figuran en el anexo de la decisión. Se presentará cada dos años, proporcionando una actualización de la información presentada en las comunicaciones nacionales, en particular sobre inventarios nacionales de GEI, acciones de mitigación, limitaciones y lagunas, incluido el apoyo necesario y recibido.

### **c) Verificación**

Se aborda a nivel internacional a través de ICA (*International Consultation and Analysis*) del BUR, que es un proceso para aumentar la transparencia de las acciones de mitigación y sus efectos, y el apoyo necesario y recibido. Las comunicaciones nacionales no están sujetas a ICA. A nivel nacional, la verificación se implementa a través de mecanismos nacionales de MRV que serán establecidos por los países no incluidos en el Anexo I, cuyas pautas generales se adoptaron en la COP 19 en 2013. Disposiciones para la verificación a nivel nacional que forman parte del MRV nacional. El marco debe informarse en los BUR.

### **2) Elementos clave de los arreglos domésticos institucionales de MRV**

Según la experiencia hasta la fecha, los arreglos institucionales sostenibles para MRV incluyen los siguientes elementos clave:

- a. Establecer arreglos legales / formales nacionales;
- b. Elegir y mantener un cuerpo de coordinación adecuada;
- c. Generación de capacidad institucional y técnica en el país.
- d. Mecanismo para la participación de los interesados.

Tales arreglos institucionales deberían garantizar la representación y la participación efectiva de todos los sectores clave y partes interesadas.

### **3) Aplicación de MRV en Chile**

Los países que suscriben una meta de reducción deben reportar el avance de las medidas, en Chile en particular se han desarrollado diversos estudios que incluyen el diseño e implementación de sistemas MRV para diferentes sectores. Sin embargo, no existe una plataforma común donde el avance este reportado.

En el informe Bienal de actualización de Chile sobre el cambio climático 2018 se establece que: “*Las Partes necesitan información confiable sobre emisiones, acciones y apoyo tanto a nivel internacional como nacional (Partnership on Transparency in the Paris Agreement, 2018). En este sentido, las Partes de la CMNUCC están obligadas a comunicar a la Conferencia de las Partes (COP), a través de la Secretaría de la CMNUCC, información sobre las acciones climáticas que han tomado o prevén adoptar para implementar la Convención. Esto les permite informarse mutuamente sobre sus acciones a nivel nacional y sirve de base para que la COP evalúe la implementación de la Convención por las Partes (CMNUCC, 2015)*”. Por lo tanto, el desafío que plantea la mitigación de GEI en Chile no solo tiene que ver con la reducción misma de emisiones o el incremento de las absorciones, sino también con la transparencia y coherencia con que se reporten estos compromisos. Por esto, es relevante definir un marco unificado de sistema de MRV para los diferentes sectores en los cuales se aplicarán medidas de mitigación.

Las iniciativas identificadas en Chile se resumieron en la Tabla 28. Sin embargo, más allá de su existencia, no está claro el avance de estas. En particular el estudio LECB, finalizado el 31 de diciembre del año 2018 que tiene dentro de sus productos el Fortalecimiento nacional y de sistemas MRV para la implementación de los NDC. Esta iniciativa puede ser la herramienta que se deba utilizar para realizar el MRV de carbono negro.

#### 4) **Medidas adicionales de seguimiento**

Adicionalmente, se recomienda incluir otras medidas atinentes al carbono negro. En particular, sistemas MRV específicos para los sectores de transporte y maquinaria fuera de ruta. Dichos sistemas debieran dar cuenta de las estimaciones nacionales y regionales, pues, como se ha ilustrado, para las emisiones de carbono negro es importante considerar la distribución espacial. También resulta relevante incorporar el desarrollo de inventarios para carbono negro con la granularidad espacial necesaria, así como, posiblemente, actualizar los instrumentos de gestión ambiental de modo de dar coherencia a los instrumentos de gestión y las políticas y convenciones adoptadas por Chile.

##### *a) MRV para el sector transporte*

En la actualidad no existe un sistema definido para realizar MRV en el sector transporte en Chile. Se recomienda utilizar alguna herramienta de carácter internacional que permita el correcto reporte de reducciones. Por ejemplo, la agencia de cooperación alemana ha desarrollado la herramienta *Transport Inventory and Greenhouse Gas Emission Reporting* (TrIGGER) (<https://www.changing-transport.org/tool/trigger/>). Esta herramienta no cuenta con la capacidad de estimar emisiones de carbono negro, sin embargo, considera la metodología del IPCC por lo cual se debería trabajar en incluir este contaminante en el futuro.

##### *b) MRV para maquinaria fuera de ruta*

No existe una metodología específica para maquinaria fuera de ruta, en ese aspecto se sugiere definir una metodología similar a la especificada para el transporte, esta metodología deberá incluir la aplicación según el IPCC considerando la inclusión de carbono negro.

##### *c) Inventarios de emisiones de alta resolución*

La heterogeneidad espacial y temporal que caracteriza a trazas como el carbono negro y precursores de forzantes climáticos de vida media corta hace necesario, en nuestra opinión experta, abordar el desarrollo de inventarios de emisiones de alta resolución (ca. 1 km<sup>2</sup>), coherentes con los inventarios nacionales y cuya puesta al día sea consistente en el tiempo. Esto es crucial y estratégico en un escenario de crecientes emisiones de gases de efecto invernadero en urbes, muchas de las cuales coemiten forzantes climáticos de vida media corta (Lamb et al., 2019; Nangini et al., 2019; Pichler et al., 2017).

##### *d) Mediciones de carbono negro y trazas afines*

También, para los fines de verificar las medidas y hacer un seguimiento, se requiere ampliar el alcance de las mediciones de las concentraciones, propiedades ópticas y flujos de emisión de estas trazas (Anenberg et al., 2019; Hutyla et al., 2014; Mitchell et al., 2018;

Nangini et al., 2019). Por lo tanto, adicionalmente al seguimiento de actos administrativos, construcción y mantenimiento de inventarios de emisiones y revisión regular de listados de medidas, se hace necesario aumentar la medición de las trazas de interés, estén o no normadas. En el caso de las zonas urbanas de Chile, debiera contarse, al menos, con monitores ópticos de carbono negro, tales como aetalómetros o espectrómetros de absorción multiángulo en, al menos, una estación de cada red de monitoreo urbana. Ello sería complementario a la caracterización de composición e.g., (Barraza et al., 2017), ojalá segregada por tamaño de aerosoles completamente respirables, e.g., (Tagle et al., 2018). Un uso apropiado de los instrumentos permitiría estimar parámetros relevantes para identificar la contribución relativa de fuentes y su impacto radiativo (Resquin et al., 2018; Wang et al., 2016).

*e) Seguimiento integral de medidas y políticas*

El mecanismo de MRV de las acciones de mitigación para carbono negro en el contexto del Acuerdo de Paris, deben incluir el impacto y los beneficios de éstas sobre los objetivos de desarrollo sostenible (WRI, 2016) y el progreso en la implementación de las medidas de mitigación.

En el caso del carbono negro y otros forzantes de vida media corta y sus precursores, se requiere de una coordinación estrecha con las autoridades responsables de los planes de prevención y descontaminación de la calidad del aire, de desarrollo urbano (vivienda, transporte, etc.), de energía y, ciertamente, de quienes hacen el seguimiento de los ODS, así como de los responsables de la acción climática. Así, se hará necesario contar con planes de descontaminación que consideren en su concepción cobeneficios climáticos, y planes de mitigación y adaptación climática que den cuenta de sus impactos sobre la calidad del aire. Es posible que esto requiera de modificaciones legales en tanto los planes de descontaminación se aplican a determinadas zonas según se constate la excedencia de normas de calidad y, la adopción Acuerdo de Paris en Chile no define los mecanismos para conseguir las metas y aplicar medidas de mitigación específicas. La discusión de la Ley de Cambio Climático puede abrir una oportunidad para abordar esta materia.

## V. INTERACCIÓN ENTRE LAS PARTES

A lo largo del proyecto se han desarrollado múltiples reuniones presenciales y virtuales con la contraparte del Ministerio del Medio Ambiente, así como intercambios por correo electrónico, reuniones virtuales y presenciales con representantes de la Coalición por el Clima y el Aire Limpio (CCAC, <https://www.ccacoalition.org/>). También se han realizado seminarios abiertos y semi abiertos. De entre todas estas actividades destacamos tres: la visita de la experta Luisa T. Molina (*Molina Center for Energy and the Environment*); la visita de Elsa Lefèvre (Naciones Unidas, CCAC) y Chris Malley (*Stockholm Environmental Institute, University of York*) y el seminario final de presentación de resultados en enero 2020.

### 1) Visita de Luisa T. Molina

La profesora Molina visitó Santiago entre el 25 y el 29 marzo de 2019, sosteniendo sendas reuniones de trabajo con el equipo del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) y técnicos del Ministerio del Medio Ambiente. En dichas reuniones se discutió extensamente su experiencia en el caso de la formulación de la Contribución Nacionalmente Determinada de México y, en general la ciencia relevante para caracterizar las emisiones de carbono negro. Ella también ofreció un seminario en dependencias de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Charla  
Emissions, Characterization  
and Mitigation of Short-Lived  
Climate Pollutants in Mexico

Expone  
**Luisa Tan Molina**  
President of the Molina Center for Energy and the Environment (MCE2) and principal research scientist at the Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences at the Massachusetts Institute of Technology (MIT).

**27 marzo**  
14:30 hrs  
SALA B01

Beauchef 851, Santiago  
Facultad de Ciencias Físicas  
y Matemáticas U. de Chile

**(CR)<sup>2</sup>** Center for Climate and Resilience Research www.CCR2.cl **dgf**

ACTIVIDAD GRATUITA

Figura 83. Invitación al seminario de Luisa T. Molina en marzo de 2019.

### 2) Visita de Elsa Lefèvre y Chris Malley

En Julio de 2019 visitaron Chile E. Lefèvre y Chris Malley. Sostuvimos dos reuniones con ellos: una referente a la iniciativa SNAP y sus avances y, otra, relativa a potenciales actividades conjuntas en torno a la vigésimo quinta Conferencia de la Partes de la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (COP25) que

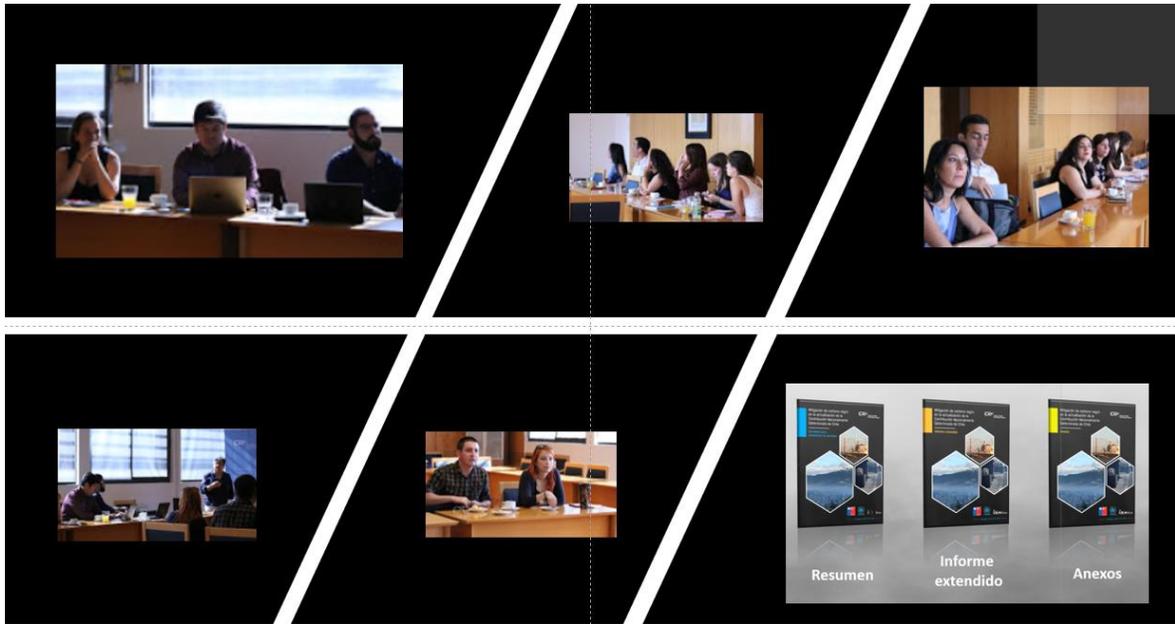
supuestamente se realizaría en Chile en diciembre del mismo año. Estas reuniones nos permitieron mejor contextualizar el estudio. Desafortunadamente, la explosión social experimentada por Chile llevó a trasladar la sede de la COP25 a Madrid.

### 3) Seminario de presentación de resultados

Los resultados expuestos en este informe fueron presentados a funcionarios del Ministerio del Medio Ambiente, tanto de la Oficina de Cambio Climático como de la División de Calidad del Aire (Ver Tabla 29). El seminario se llevó a cabo el 31 de enero de 2020 en dependencias del Decanato de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. En dicho seminario se expuso de manera general los resultados más relevantes del estudio incluyendo la meta cuantificada de reducción de BC, metodología utilizada para la cuantificación de la meta de reducción y la propuesta de MRV, incluida en el presente informe. Esta reunión fue muy fructífera en tanto permitió ligar las acciones planteadas en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada de Chile y las acciones en el marco del manejo de la calidad del aire, relevando las ventajas de acciones conjuntas, así como la necesidad de adoptar medidas estructurales que consigan la necesaria transformación ante la crisis climática global y el costoso problema de contaminación atmosférica que aún afecta a Chile.

*Tabla 29 Participantes en el seminario de presentación de resultados*

Participante	Institución	Ocupación
Laura Gallardo	CR2/UCH	Directora de Proyecto
Sebastián Tolvett	CR2/UTEM	Director Alterno
Kevin Basoa	CR2/UCH/UTEM	Investigador
Mauricio Osses	CR2/UTFSM	Investigador
Susana Bustos	CR2	Gestión de Proyectos
Jenny Mager	MMA	Encargada de Mitigación e Inventarios
Bruno Campos	MMA	Profesional de Mitigación e Inventarios
Carol Arenas	MMA	Profesional de Calidad del Aire
Nancy Manriquez	MMA	Profesional de Calidad del Aire
Soledad Palma	MMA	Profesional de Cambio Climático
Ana Guerrero	MMA	Profesional de Cambio Climático
Jonás Muñoz	MMA	Profesional de Calidad del Aire
Emmanuel Mesías	MMA	Profesional de Calidad del Aire
Camila Labarra	MMA	Profesional de Calidad del Aire



*Figura 84. Imágenes del seminario de presentación de resultados realizado el 31 de enero de 2020.*

## VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Este trabajo ha abordado el diseño, evaluación y justificación de una meta de reducción cuantificada de carbono negro, integrable y consistente con la meta de reducción de gases de efecto invernadero contemplada en la actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) de Chile ante el Acuerdo de París. Para ello, se ha revisado la literatura científica y técnica internacional y documentos de política pública chilena para identificar medidas atingentes a la mitigación de carbono negro. También se ha implementado una herramienta (LEAP-IBC) para la construcción de escenarios de emisiones y su proyección en el contexto de iniciativas de acción y planificación nacional (*Supporting National Action and Planning on Short-Lived Climate Pollutants*, SNAP) que promueve la Coalición de Aire Limpio y Clima (CCAC) de la cual Chile forma parte.

Sobre la base de la información provista por el Ministerio del Medio Ambiente, referida a los escenarios de mitigación de gases de efecto invernadero incluidas en la actualización de la NDC y de otras medidas relevantes para carbono negro, se han definido tres escenarios para el período entre 2016 y 2050, a saber y según la denominación adoptada en este trabajo: políticas actuales, carbono neutralidad y carbono neutralidad +. El primer escenario se considera de referencia y supone la implementación exitosa de medidas de políticas públicas que ya se encuentran en ejecución o que probablemente lo estarán. El segundo escenario, de carbono neutralidad, permite estimar el impacto de las medidas de mitigación para gases de efecto invernadero contempladas en la actualización de la NDC de Chile sobre la evolución de las emisiones de carbono negro a escala del territorio continental nacional. El tercer escenario considera dos medidas adicionales: calefacción distrital en las regiones políticas con mayor consumo de leña y normativas más estrictas para la maquinaria fuera de ruta. Estas últimas medidas enfatizan la heterogeneidad espacial y temporal de las emisiones de carbono negro y de sus impactos, y permiten abordar la pobreza energética y la inequidad ambiental. También llaman a la necesaria coordinación e integración de las políticas climáticas y de calidad de aire.

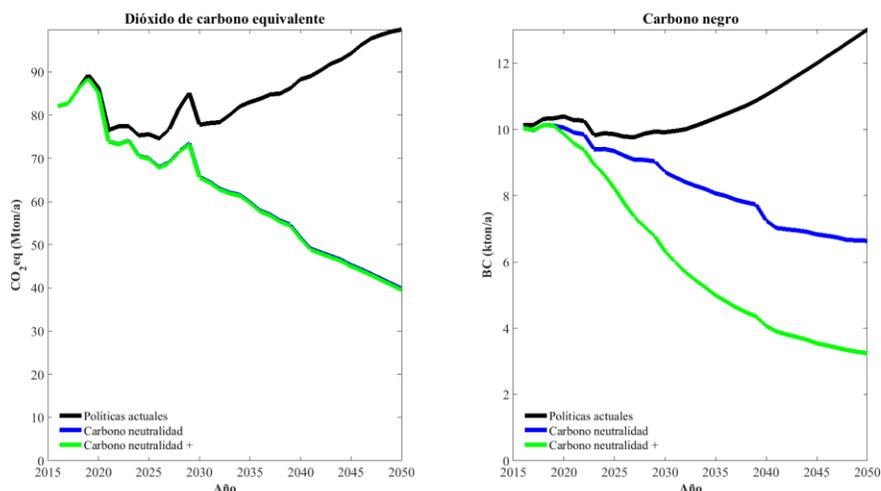


Figura 85. Trayectorias de emisiones de CO<sub>2</sub>eq y BC entre 2016 y 2050, considerando políticas actuales (línea negra), carbono neutralidad (línea azul) y carbono neutralidad + (línea verde). Estas trayectorias no contemplan a los sectores aéreo, marítimo, ni a la maquinaria fuera de ruta con potencia superior a 560 kW de la gran minería del cobre.

Tabla 30. Emisiones anuales de carbono negro en kton/a para los escenarios definidos en este trabajo. Entre paréntesis, y con números en azul (verde) según la nomenclatura de la figura anterior, se muestran los porcentajes de reducción respecto del escenario de políticas actuales (del año 2016).

Escenario	Año		
	2016	2030	2050
Políticas actuales	10	9,9 (-1%)	13 (30%)
Carbono neutralidad	10	8,7 (-12%) (-13%)	6,6(-49%) (-34%)
Carbono neutralidad +	10	6,3 (-36%) (-37%)	3,2 (-75%) (-68%)

La tabla y figura anteriores resumen el resultado de considerar los escenarios antes definidos. En suma, el escenario de carbono neutralidad diseñado para mitigar gases de efecto invernadero resulta en una disminución sustantiva de carbono negro, además de otros agentes coemitidos. En efecto, en este trabajo se ha extendido el impacto de los escenarios de mitigación a otras trazas incluyendo material particulado completamente respirable –y sus fracciones de carbono orgánico y de carbono negro– y gases precursores de su formación como óxidos de nitrógeno, amoníaco, compuestos orgánicos volátiles y dióxido de azufre. Sin embargo, por sí sólo no asegura mejoras en la mala calidad de aire experimentada por la población del centro y sur de Chile, donde se estima que al menos un millón de hogares sufren pobreza energética e inequidad ambiental. El escenario de carbono neutralidad tampoco asegura evitar potenciales impactos climáticos regionales. Por ello se propone el escenario de carbono neutralidad +.

La inequidad ambiental y la pobreza energética se expresan en Chile de manera grave en torno al uso de leña para la calefacción en Chile central y sur. El sector residencial alcanza casi el 40% de las emisiones de carbono negro para el año base (2016) y su importancia relativa crece en el tiempo en el escenario de carbono neutralidad. Las emisiones de material particulado y sus precursores, asociados con la quema de leña, conllevan impactos adversos sobre la salud cuyos costos, recaen mayoritariamente sobre el sistema público de salud. Por lo tanto, como se ha reconocido por el Ministerio del Medio Ambiente a través de sendos planes de descontaminación en la zona centro y sur de Chile, es imperioso abordar este grave problema con premura. En este estudio, las medidas de mitigación presentes en los planes se contemplan hasta 2030 y su supresión resulta en un aumento de las emisiones residenciales, las cuales son parcialmente compensadas por medidas de eficiencia energética en el escenario de carbono neutralidad. No obstante, el crecimiento poblacional contribuye a compensar el efecto de las reducciones de consumo energético por mejores viviendas y estufas, resultando en emisiones de carbono negro de 2,6 y 2,5 kton en 2030 y 2050 respectivamente y, posiblemente en mayor exposición en ciudades más densas. Emisiones de 2,6 kton/a son alrededor de un 70% de las 3,7 kton emitidas en 2016 lo cual probablemente redundaría en un decrecimiento de la exposición, pero todavía un riesgo significativo para la población, especialmente de la más vulnerable a sus impactos. Esto llama a revisar con detalle la eficacia de las medidas ya implementadas y, posiblemente, aumentar la intensidad de estas y considerar alternativas.

Como se dijo, la reducción de emisiones derivada de la mitigación de gases de efecto invernadero, particularmente la del escenario de carbono neutralidad, puede ser significativa en cuanto a los números nacionales de carbono negro y otros contaminantes asociados. Sin embargo, como los sectores residencial y maquinaria fuera de ruta (MFR) son predominantes para las emisiones de carbono negro y éstas ocurren mayormente en zonas diferentes a las fuentes predominantes de gases de efecto invernadero, la carbono neutralidad puede alcanzar

un impacto limitado sobre la salud humana y el clima regional. Esto es consecuencia de las distintas escalas espaciales y temporales para los gases de efecto invernadero y forzantes asociados al material particulado y sus precursores. Por lo tanto, es fundamental considerar también medidas con foco en las urbes donde la exposición humana a contaminantes es mayor. El escenario de carbono neutralidad + aquí propuesto –contemplando calefacción distrital y normas estrictas para MFR– ilustra este punto y resulta eficaz en cuanto a las emisiones de material particulado, incluyendo carbono negro y gases precursores, y deseable en un contexto de inequidad ambiental y pobreza energética. Reconocemos que la calefacción distrital es una medida transformacional que requerirá de audacia política e inversión sustantiva. Sin embargo, es ese el tipo de medidas necesarias para enfrentar el enorme costo de la contaminación atmosférica y los desafíos de la inequidad. Por otro lado, la calefacción distrital, siendo una medida tecnológica, implica considerar un cambio estructural de cómo los ciudadanos perciben la calefacción y el confort térmico. Ello, a su vez, hace necesario prestar atención no sólo a los aspectos tecnológicos, sino que a los sociales como parte fundamental de los proyectos de desarrollo e implementación.

Para evaluar los impactos sobre la salud de la población, se requiere entre otros, en nuestra opinión, de un inventario nacional de alta resolución (~1 km<sup>2</sup>), la realización y publicación de mediciones *in situ* y remotas, el uso herramientas de modelación de la dispersión de material particulado, incluyendo carbono negro y precursores, así como estudios epidemiológicos que permitan contextualizar los supuestos de las herramientas de evaluación de impactos. La combinación de estas herramientas permitirá un seguimiento más acucioso de la eficacia y eficiencia de las medidas de mitigación, así como ponderar mejor los escenarios y estrategias. En este contexto, resulta crucial caracterizar mejor, en general, los factores de emisión y, en particular, para la quema de leña en condiciones de operación real en Chile. Los factores de emisión de material particulado completamente respirable por quema de leña varían en dos órdenes de magnitud entre los documentos que sustentan instrumentos de gestión ambiental y políticas públicas, no siendo todos refrendados en estudios con revisión por pares. En este trabajo se adoptó un valor extraído de la literatura científica consistente con los inventarios previos informados por Chile ante la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático.

Este trabajo ha permitido actualizar inventarios previos de carbono negro y se ha ilustrado su distribución espacial heterogénea y el alcance regional de sus impactos. También se han incluido estimaciones preliminares para los sectores: aéreo, marítimo y de maquinaria fuera de ruta de potencia, tanto inferior como superior a 560 kW, siendo todos potencialmente relevantes por sus impactos sobre la salud o el clima regional. Por ejemplo, la estimación preliminar de las emisiones de carbono negro de maquinaria fuera de ruta de potencia superior a 560 kW indica una participación equivalente a la mitad de las emisiones de MFR (con potencias inferiores a 560kW) las que corresponden a un tercio de las emisiones nacionales de carbono negro para 2016. Por su parte, los sectores aéreo y marítimo incrementarían las emisiones nacionales de carbono negro en casi un 30% y de dióxido de carbono equivalente en aproximadamente un 5% para condiciones presentes (2016) y mucho más a futuro. Empero, ninguno de ellos ha sido incluido en los escenarios de mitigación presentados aquí pues no forman parte del paquete de medidas contemplados en la actualización de la NDC, y una caracterización detallada de dichos sectores requeriría de la recolección y análisis de información que excede el alcance de este estudio. Aquí, es pertinente recalcar las emisiones de carbono negro de maquinaria fuera de ruta con potencia

menor a 560 kW. Considerando que alrededor de un 40% de ellas ocurre en urbes en actividades asociadas con la construcción, para los fines de evitar impactos adversos para la salud, parece evidente que será necesario regular estas emisiones y mejorar sustantivamente la caracterización de los niveles de actividad. Entonces, se recomienda acelerar los procesos técnicos y administrativos orientados a cuantificar las emisiones y los impactos de maquinaria fuera de ruta en un espectro amplio de potencias y regularlos. Algo similar ocurre con los sectores marítimo y aéreo que son relevantes tanto en la discusión climática como en la de calidad de aire.

Por último, este estudio provee sugerencias para implementar, a través de la extensión o modificación de iniciativas existentes, un sistema de medición, reporte y verificación (MRV). Es importante destacar que, adicionalmente al seguimiento de actos administrativos, construcción y manutención de inventarios de emisiones y revisión regular de listados de medidas, se hace necesario aumentar la medición de trazas, dando cuenta de los impactos regionales del carbono negro. La buena implementación de sistemas de MRV, así como el seguimiento de los compromisos de Chile ante el Acuerdo de París y de los instrumentos nacionales de gestión ambiental, requiere en el caso del carbono negro y otros forzantes de vida media corta, particularmente ozono y metano y sus precursores, de una coordinación estrecha con las autoridades responsables de los planes de prevención y descontaminación de la calidad del aire, de desarrollo urbano (vivienda, transporte, etc.), de energía y, ciertamente, de quienes hacen el seguimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, así como de los responsables de la acción climática. Así, se hará necesario, por ejemplo, contar con planes de descontaminación que consideren en su concepción cobeneficios climáticos, y planes de mitigación y adaptación climática que den cuenta de sus impactos sobre la calidad del aire. Es posible que esto requiera de modificaciones legales en tanto los planes de descontaminación se aplican a determinadas zonas, según se constate la excedencia de normas de calidad, y la adopción Acuerdo de Paris en Chile no define los mecanismos para conseguir las metas y aplicar medidas de mitigación específicas. La discusión de la Ley de Cambio Climático puede abrir una oportunidad para abordar esta materia.

Ahora, adicionalmente al seguimiento de actos administrativos, la construcción y manutención de inventarios de emisiones y revisión regular de listados de medidas, se hace necesario aumentar la medición de las trazas de interés, estén o no normadas. En el caso de las zonas urbanas de Chile, debiera contarse, al menos, con monitores ópticos de carbono negro, tales como aetalómetros o espectrómetros de absorción multiángulo en, al menos, una estación de cada red de monitoreo urbana. Ello sería complementario a la caracterización de composición idealmente segregada por tamaño de aerosoles completamente respirables. Todo esto podría ser apoyado y retroalimentado por iniciativas académicas a través del recientemente creado Ministerio de Ciencia, Tecnología, Conocimiento e Innovación.

El compromiso de Chile de acelerar la acción climática, tal como evidencia la ciencia, hace imprescindible mitigar los forzantes climáticos de vida media corta, particularmente metano y carbono negro, al mismo tiempo que conseguir emisiones globales netas nulas de dióxido de carbono hacia 2050. La actualización de la Contribución Nacionalmente Determinada va en línea con ese compromiso, pero requiere abordar con celeridad la regionalización de tales compromisos y focalizar acciones en las ciudades. En efecto, las zonas urbanas constituyen el escenario donde transformaciones profundas y principales deben ocurrir para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los compromisos del Acuerdo de Paris. Este estudio es un paso en esa dirección.

## REFERENCIAS

Acuto, M.: Give cities a seat at the top table, *Nature*, 537(7622), 611–613, doi:10.1038/537611a, 2016.

Akagi, S. K., Yokelson, R. J., Wiedinmyer, C., Alvarado, M. J., Reid, J. S., Karl, T., Crounse, J. D. y Wennberg, P. O.: Emission factors for open and domestic biomass burning for use in atmospheric models, *Atmos. Chem. Phys.*, 11(9), 4039–4072, doi:10.5194/acp-11-4039-2011, 2011.

Alexander, D. T. L., Crozier, P. A. y Anderson, J. R.: Brown Carbon Spheres in East Asian Outflow and Their Optical Properties, *Science* (80-. ), 321(5890), 833 LP – 836, doi:10.1126/science.1155296, 2008.

Alvarado, M. J., McVey, A. E., Hegarty, J. D., Cross, E. S., Hasenkopf, C. A., Lynch, R., Kennelly, E. J., Onasch, T. B., Awe, Y., Sanchez-Triana, E. y Kleiman, G.: Evaluating the use of satellite observations to supplement ground-level air quality data in selected cities in low- and middle-income countries, *Atmos. Environ.*, 218, 117016, doi:10.1016/j.atmosenv.2019.117016, 2019.

Amigo-Jorquera, C.: Cultura y vulnerabilidad energética territorial : el problema de la contaminación en Coyhaique, Facultad de Ciencias Sociales, Universidad de Chile. [en línea] Available from: <https://massfacso.files.wordpress.com/2020/01/amigo-catalina-tesis-mass-2019.pdf>, 2019.

Andreae, M. O. y Gelencsér, A.: Black carbon or brown carbon? the nature of light-absorbing carbonaceous aerosols, *Atmos. Chem. Phys.*, 6(10), 3131–3148, doi:10.5194/acp-6-3131-2006, 2006.

Anenberg, S. C., Horowitz, L. W., Tong, D. Q. y West, J. J.: An estimate of the global burden of anthropogenic ozone and fine particulate matter on premature human mortality using atmospheric modeling, *Environ. Health Perspect.*, 118(9), 1189–1195, doi:10.1289/ehp.0901220, 2010.

Anenberg, S. C., Belova, A., Brandt, J., Fann, N., Greco, S., Guttikunda, S., Heroux, M. E., Hurley, F., Krzyzanowski, M., Medina, S., Miller, B., Pandey, K., Roos, J. y Van Dingenen, R.: Survey of Ambient Air Pollution Health Risk Assessment Tools, *Risk Anal.*, 36(9), 1718–1736, doi:10.1111/risa.12540, 2016.

Anenberg, S. C., Achakulwisut, P., Brauer, M., Moran, D., Apte, J. S. y Henze, D. K.: Particulate matter-attributable mortality and relationships with carbon dioxide in 250 urban areas worldwide, *Sci. Rep.*, 9(1), 11552, doi:10.1038/s41598-019-48057-9, 2019.

Barraza, F., Lambert, F., Jorquera, H., Villalobos, A. M. y Gallardo, L.: Temporal evolution of main ambient PM<sub>2.5</sub> sources in Santiago, Chile, from 1998 to 2012, *Atmos. Chem. Phys.*, 17(16), 10093–10107, doi:10.5194/acp-17-10093-2017, 2017.

Billi, M., Amigo, C., Calvo, R. y Urquiza, A.: Economía de la Pobreza Energética ¿Por qué y cómo garantizar un acceso universal y equitativo a la energía?, *Econ. y Política*, 5(2), 35–65, doi:10.15691./07194714.2018.006, 2018.

Blakey, S., Rye, L. y Wilson, C. W.: Aviation gas turbine alternative fuels: A review, *Proc. Combust. Inst.*, 33(2), 2863–2885, doi:https://doi.org/10.1016/j.proci.2010.09.011, 2011.

BNE: Balance Nacional de Energía. [en línea] Available from: <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>, 2017.

Bo, X., Xue, X., Xu, J., Du, X., Zhou, B. y Tang, L.: Aviation's emissions and

contribution to the air quality in China, *Atmos. Environ.*, 201, 121–131, doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.01.005>, 2019.

Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., Deangelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S. G. y Zender, C. S.: Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118(11), 5380–5552, doi:10.1002/jgrd.50171, 2013.

Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., Kerminen, V.-M., Kondo, Y., Liao, H., Lohmann, U., Rasch, P., Satheesh, S. K., Sherwood, S., Stevens, B. y Zhang, X. Y.: Clouds and aerosols, en *Climate Change 2013 the Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, vol. 9781107057, editado por Intergovernmental Panel on Climate Change, pp. 571–658, Cambridge University Press, Cambridge., 2013.

Brasseur, G. P., Gupta, M., Anderson, B. E., Balasubramanian, S., Barrett, S., Duda, D., Fleming, G., Forster, P. M., Fuglestedt, J., Gettelman, A., Halthore, R. N., Jacob, S. D., Jacobson, M. Z., Khodayari, A., Liou, K.-N., Lund, M. T., Miake-Lye, R. C., Minnis, P., Olsen, S., Penner, J. E., Prinn, R., Schumann, U., Selkirk, H. B., Sokolov, A., Unger, N., Wolfe, P., Wong, H.-W., Wuebbles, D. W., Yi, B., Yang, P. y Zhou, C.: Impact of Aviation on Climate: FAA's Aviation Climate Change Research Initiative (ACCRI) Phase II, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 97(4), 561–583, doi:10.1175/BAMS-D-13-00089.1, 2015.

Burnett, R. T., Arden Pope, C., Ezzati, M., Olives, C., Lim, S. S., Mehta, S., Shin, H. H., Singh, G., Hubbell, B., Brauer, M., Ross Anderson, H., Smith, K. R., Balmes, J. R., Bruce, N. G., Kan, H., Laden, F., Prüss-Ustün, A., Turner, M. C., Gapstur, S. M., Diver, W. R. y Cohen, A.: An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure, *Environ. Health Perspect.*, 122(4), 397–403, doi:10.1289/ehp.1307049, 2014.

Chow, J. C., Watson, J. G., Lowenthal, D. H., Antony Chen, L. W. y Motallebi, N.: PM<sub>2.5</sub> source profiles for black and organic carbon emission inventories, *Atmos. Environ.*, 45(31), 5407–5414, doi:10.1016/j.atmosenv.2011.07.011, 2011.

Van Damme, M., Clarisse, L., Whitburn, S., Hadji-Lazaro, J., Hurtmans, D., Clerbaux, C. y Coheur, P.-F.: Industrial and agricultural ammonia point sources exposed, *Nature*, 564(7734), 99–103, doi:10.1038/s41586-018-0747-1, 2018.

Van Dingenen, R., Dentener, F. J., Raes, F., Krol, M. C., Emberson, L. y Cofala, J.: The global impact of ozone on agricultural crop yields under current and future air quality legislation, *Atmos. Environ.*, 43(3), 604–618, doi:10.1016/j.atmosenv.2008.10.033, 2009.

van Donkelaar, A., Martin, R. V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C. y Villeneuve, P. J.: Global estimates of ambient fine particulate matter concentrations from satellite-based aerosol optical depth: Development and application, *Environ. Health Perspect.*, 118(6), 847–855, doi:10.1289/ehp.0901623, 2010.

EBP: Energía distrital: manual de desarrollo de proyectos. [en línea] Available from: <http://4echile.cl/agencia-sostenibilidad-publica-manual-desarrollo-energia-distrital/>, 2018.

Emodi, N. V., Emodi, C. C., Murthy, G. P. y Emodi, A. S. A.: Energy policy for low carbon development in Nigeria: A LEAP model application, *Renew. Sustain. Energy Rev.*,

68, 247–261, doi:10.1016/j.rser.2016.09.118, 2017.

Farías, L., K., U., Aguirre, C., L. Bedriñana, R. C., Delgado, V., Fernández, C., Fernández, M., Gaxiola, A., González, H., Hucke-Gaete, R., Marquet, P., Vivian Montecino, C. M., Narváez, D., Osses, M., Peceño, B., Quiroga, E., Ramajo, L., Sepúlveda, H. y Valencia, J.: Nueve medidas basadas en el océano para las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional de Chile. Comité científico COP25, mesa Océanos. [en línea] Available from: <http://www.minciencia.gob.cl/comitecientifico/documentos/mesa-oceanos/16.Oceanos-Nueve-soluciones-para-las-NDC.pdf>, 2019.

GEASUR: Analisis técnico económico de la aplicación de una nueva norma de emisión para motores de maquinaria fuera de ruta a nivel país. [en línea] Available from: [http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2016/proyectos/14.\\_Antecedentes\\_economicos.pdf](http://planesynormas.mma.gob.cl/archivos/2016/proyectos/14._Antecedentes_economicos.pdf), 2014.

Grande-Acosta, G. y Islas-Samperio, J.: Towards a low-carbon electric power system in Mexico, *Energy Sustain. Dev.*, 37, 99–109, doi:10.1016/j.esd.2017.02.001, 2017.

Grandin, J., Haarstad, H., Kjærås, K. y Bouzarovski, S.: The politics of rapid urban transformation, *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 31, 16–22, doi:10.1016/j.cosust.2017.12.002, 2018.

GreenlabUC: Apoyo a la Iniciativa para el Plan de Mitigación de los Contaminantes Climáticos de Vida Corta en Chile. Estudio en desarrollo para el Ministerio de Medio Ambiente. [en línea] Available from: [http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=8d935644-c283-4256-803e-38a8ad1948f4&fname=Apoyo a la Iniciativa para el Plan de Mitigación de los Contaminantes Climáticos de Vida Corta \(CCVC\) en Chile.pdf&access=public](http://catalogador.mma.gob.cl:8080/geonetwork/srv/spa/resources.get?uuid=8d935644-c283-4256-803e-38a8ad1948f4&fname=Apoyo a la Iniciativa para el Plan de Mitigación de los Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCVC) en Chile.pdf&access=public), 2016.

Grobler, C., Wolfe, P. J., Dasadhikari, K., Dedoussi, I. C., Allroggen, F., Speth, R. L., Eastham, S. D., Agarwal, A., Staples, M. D., Sabnis, J. y Barrett, S. R. H.: Marginal climate and air quality costs of aviation emissions, *Environ. Res. Lett.*, 14(11), 114031, doi:10.1088/1748-9326/ab4942, 2019.

Gustafsson, Ö. y Ramanathan, V.: Convergence on climate warming by black carbon aerosols, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 113(16), 4243 LP – 4245, doi:10.1073/pnas.1603570113, 2016.

Haines, A. y Ebi, K.: The imperative for climate action to protect health, *N. Engl. J. Med.*, 380(3), 263–273, doi:10.1056/NEJMra1807873, 2019.

Haines, A., Amann, M., Borgford-Parnell, N., Leonard, S., Kuylenstierna, J. y Shindell, D.: Short-lived climate pollutant mitigation and the Sustainable Development Goals, *Nat. Clim. Chang.*, 7(12), 863–869, doi:10.1038/s41558-017-0012-x, 2017.

Hasenkopf, C. A.: To combat air inequality, governments and researchers must open their data, *Clean Air J.*, 26(2), 8–10, doi:10.17159/2410-972X/2016/v26n2a5, 2016.

Henze, D. K., Hakami, A. y Seinfeld, J. H.: Development of the adjoint of GEOS-Chem, *Atmos. Chem. Phys.*, 7(9), 2413–2433, doi:10.5194/acp-7-2413-2007, 2007.

Hoesly, R. M., Smith, S. J., Feng, L., Klimont, Z., Janssens-Maenhout, G., Pitkanen, T., Seibert, J. J., Vu, L., Andres, R. J., Bolt, R. M., Bond, T. C., Dawidowski, L., Kholod, N., Kurokawa, J. I., Li, M., Liu, L., Lu, Z., Moura, M. C. P., O'Rourke, P. R. y Zhang, Q.: Historical (1750–2014) anthropogenic emissions of reactive gases and aerosols from the Community Emissions Data System (CEDS), *Geosci. Model Dev.*, 11(1), 369–408, doi:10.5194/gmd-11-369-2018, 2018.

Hong, S., Chung, Y., Kim, J. y Chun, D.: Analysis on the level of contribution to the

national greenhouse gas reduction target in Korean transportation sector using LEAP model, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 60, 549–559, doi:10.1016/j.rser.2015.12.164, 2016.

Hu, G., Ma, X. y Ji, J.: Scenarios and policies for sustainable urban energy development based on LEAP model – A case study of a postindustrial city: Shenzhen China, *Appl. Energy*, 238, 876–886, doi:10.1016/j.apenergy.2019.01.162, 2019.

Huo, T., Ren, H. y Cai, W.: Estimating urban residential building-related energy consumption and energy intensity in China based on improved building stock turnover model, *Sci. Total Environ.*, 650, 427–437, doi:https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.008, 2019.

Hutyra, L. R., Duren, R., Gurney, K. R., Grimm, N., Kort, E. A., Larson, E. y Shrestha, G.: Urbanization and the carbon cycle: Current capabilities and research outlook from the natural sciences perspective, *Earth's Futur.*, 2(10), 473–495, doi:10.1002/2014ef000255, 2014.

INDC: Contribución Nacional Tentativa de Chile (INDC) para el Acuerdo Climático de Paris 2015, editado por G. de Chile, [en línea] Available from: <https://www4.unfccc.int/sites/submissions/INDC/Published Documents/Chile/1/Chile INDC FINAL.pdf>, 2015.

IPCC: Aviation and the Global Atmosphere, editado por M. M. P. in collaboration with the S. A. P. to the M. P. on S. that D. the O. L. J.E.Penner, D.H.Lister, D.J.Griggs, D.J.Dokken, Cambridge University Press., 1999.

Johansson, L., Jalkanen, J.-P. y Kukkonen, J.: Global assessment of shipping emissions in 2015 on a high spatial and temporal resolution, *Atmos. Environ.*, 167, 403–415, doi:https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.042, 2017.

Kindbom, K., Mawdsley, I., Nielsen, O.-K., Saarinen, K., Jónsson, K. y Aasestad, K.: Emission factors for SLCP emissions from residential wood combustion in the Nordic countries, Nordic Council of Ministers, Copenhagen., 2017.

Kirrane, E. F., Luben, T. J., Benson, A., Owens, E. O., Sacks, J. D., Dutton, S. J., Madden, M. y Nichols, J. L.: A systematic review of cardiovascular responses associated with ambient black carbon and fine particulate matter, *Environ. Int.*, 127, 305–316, doi:10.1016/j.envint.2019.02.027, 2019.

Klimont, Z., Kupiainen, K., Heyes, C., Purohit, P., Cofala, J., Rafaj, P., Borken-Kleefeld, J. y Schöpp, W.: Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon, *Atmos. Chem. Phys.*, 17(14), 8681–8723, doi:10.5194/acp-17-8681-2017, 2017.

Krellenberg, K., Welz, J., Link, F. y Barth, K.: Urban vulnerability and the contribution of socio-environmental fragmentation, *Prog. Hum. Geogr.*, 41(4), 408–431, doi:10.1177/0309132516645959, 2017.

Lacey, F. y Henze, D.: Global climate impacts of country-level primary carbonaceous aerosol from solid-fuel cookstove emissions, *Environ. Res. Lett.*, 10(11), doi:10.1088/1748-9326/10/11/114003, 2015.

Lamb, W. F., Creutzig, F., Callaghan, M. W. y Minx, J. C.: Learning about urban climate solutions from case studies, *Nat. Clim. Chang.*, 9(4), 279–287, doi:10.1038/s41558-019-0440-x, 2019.

Lelieveld, J., Evans, J. S., Fnais, M., Giannadaki, D. y Pozzer, A.: The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale, *Nature*, 525(7569), 367–371, doi:10.1038/nature15371, 2015.

Li, M., Zhang, D., Li, C. T., Mulvaney, K. M., Selin, N. E. y Karplus, V. J.: Air quality co-benefits of carbon pricing in China, *Nat. Clim. Chang.*, 8(5), 398–403, doi:10.1038/s41558-018-0139-4, 2018.

Lund, M. T., Aamaas, B., Berntsen, T., Bock, L., Burkhardt, U., Fuglestvedt, J. S. y Shine, K. P.: Emission metrics for quantifying regional climate impacts of aviation, *Earth Syst. Dyn.*, 8(3), 547–563, doi:10.5194/esd-8-547-2017, 2017.

Mallet, M., Dulac, F., Formenti, P., Nabat, P., Sciare, J., Roberts, G., Pelon, J., Ancellet, G., Tanré, D., Parol, F., Denjean, C., Brogniez, G., Di Sarra, A., Alados-Arboledas, L., Arndt, J., Auriol, F., Blarel, L., Bourriane, T., Chazette, P., Chevaillier, S., Claeys, M., D'Anna, B., Derimian, Y., Desboeufs, K., Di Iorio, T., Doussin, J. F., Durand, P., Féron, A., Freney, E., Gaimoz, C., Goloub, P., Gómez-Amo, J. L., Granados-Muñoz, M. J., Grand, N., Hamonou, E., Jankowiak, I., Jeannot, M., León, J. F., Maillé, M., Mailler, S., Meloni, D., Menut, L., Momboisse, G., Nicolas, J., Podvin, T., Pont, V., Rea, G., Renard, J. B., Roblou, L., Schepanski, K., Schwarzenboeck, A., Sellegri, K., Sicard, M., Solmon, F., Somot, S., Torres, B., Totems, J., Triquet, S., Verdier, N., Verwaerde, C., Waquet, F., Wenger, J. y Zapf, P.: Overview of the Chemistry-Aerosol Mediterranean Experiment/Aerosol Direct Radiative Forcing on the Mediterranean Climate (ChArMEx/ADRIMED) summer 2013 campaign, *Atmos. Chem. Phys.*, 16(2), 455–504, doi:10.5194/acp-16-455-2016, 2016.

Marín, J. C., Raga, G. B., Arévalo, J., Baumgardner, D., Córdova, A. M., Pozo, D., Calvo, A., Castro, A., Fraile, R. y Sorribas, M.: Properties of particulate pollution in the port city of Valparaiso, Chile, *Atmos. Environ.*, 171, 301–316, doi:https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.044, 2017.

Markandya, A., Sampredo, J., Smith, S. J., Van Dingenen, R., Pizarro-Irizar, C., Arto, I. y González-Eguino, M.: Health co-benefits from air pollution and mitigation costs of the Paris Agreement: a modelling study, *Lancet Planet. Heal.*, 2(3), e126–e133, doi:10.1016/S2542-5196(18)30029-9, 2018.

Martínez-López, A. y Chica, M.: Joint Optimization of Routes and Container Fleets to Design Sustainable Intermodal Chains in Chile, *Sustain.*, 12(6), doi:10.3390/su12062221, 2020.

Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H. O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. ., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. y Waterfield, T.: Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to.* [en línea] Available from: <http://www.ipcc.ch/report/sr15/>, 2018.

Melamed, M. L., Schmale, J. y von Schneidemesser, E.: Sustainable policy—key considerations for air quality and climate change, *Curr. Opin. Environ. Sustain.*, 23, 85–91, doi:10.1016/j.cosust.2016.12.003, 2016.

Mena-Carrasco, M., Saide, P., Delgado, R., Hernandez, P., Spak, S., Molina, L., Carmichael, G. y Jiang, X.: Regional climate feedbacks in Central Chile and their effect on air quality episodes and meteorology, *Urban Clim.*, 10(P5), 771–781, doi:10.1016/j.uclim.2014.06.006, 2014.

Ménégoz, M., Krinner, G., Balkanski, Y., Boucher, O., Cozic, A., Lim, S., Ginot, P., Laj, P., Gallée, H., Wagnon, P., Marinoni, A. y Jacobi, H. W.: Snow cover sensitivity to black carbon deposition in the Himalayas: From atmospheric and ice core measurements to

regional climate simulations, *Atmos. Chem. Phys.*, 14(8), 4237–4249, doi:10.5194/acp-14-4237-2014, 2014.

MINVU: Guía de diseño para la eficiencia energética en la vivienda social., 2009.

Mitchell, L. E., Lin, J. C., Bowling, D. R., Pataki, D. E., Strong, C., Schauer, A. J., Bares, R., Bush, S. E., Stephens, B. B., Mendoza, D., Mallia, D., Holland, L., Gurney, K. R. y Ehleringer, J. R.: Long-term urban carbon dioxide observations reveal spatial and temporal dynamics related to urban characteristics and growth, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 115(12), 2912–2917, doi:10.1073/pnas.1702393115, 2018.

MMA: Planes de Descontaminación Atmosférica. Estrategia 2014-2018. [en línea] Available from: <http://airechile.mma.gob.cl/download/Plan-Descontaminacion-Atmosferica-2014-2018.pdf>, 2014.

MMA: ANÁLISIS GENERAL DEL IMPACTO ECONÓMICO Y SOCIAL ANTEPROYECTO NORMA DE EMISIÓN PARA MAQUINARIA MÓVIL FUERA DE RUTA., 2016.

MMA: Tercer Reporte del Estado del Medio Ambiente, Santiago, Chile. [en línea] Available from: <http://sinia.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2017/09/REMA-2017.pdf>, 2017.

MMA: Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático 2018. [en línea] Available from: <https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2018/12/3rd-BUR-Chile-SPanish.pdf>, 2018.

Molina, L. T., Gallardo, L., Andrade, M., Baumgardner, D., Borbor-Córdova, M., Bórquez, R., Casassa, G., Cereceda-Balic, F., Dawidowski, L., Garreaud, R., Huneus, N., Lambert, F., McCarty, J. L., Mc Phee, J., Mena-Carrasco, M., Raga, G. B., Schmitt, C. y Schwarz, J. P.: Pollution and its Impacts on the South American Cryosphere, *Earth's Futur.*, 3(12), 345–369, doi:10.1002/2015EF000311, 2015.

Nangini, C., Peregón, A., Ciais, P., Weddige, U., Vogel, F., Wang, J., Bréon, F. M., Bachra, S., Wang, Y., Gurney, K., Yamagata, Y., Appleby, K., Telahoun, S., Canadell, J. G., Grübler, A., Dhakal, S. y Creutzig, F.: A global dataset of CO<sub>2</sub> emissions and ancillary data related to emissions for 343 cities, *Sci. Data*, 6(1), 180280, doi:10.1038/sdata.2018.280, 2019.

NDC: Contribución determinada a nivel nacional (NDC) de Chile, Primera actualización. [en línea] Available from: [https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/10/Propuesta\\_actualizacion\\_NDC\\_Chile\\_2019.pdf](https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2019/10/Propuesta_actualizacion_NDC_Chile_2019.pdf), 2019.

Nichols, J. L., Owens, E. O., Dutton, S. J. y Luben, T. J.: Systematic review of the effects of black carbon on cardiovascular disease among individuals with pre-existing disease, *Int. J. Public Health*, 58(5), 707–724, doi:10.1007/s00038-013-0492-z, 2013.

Padilla-Barrera, Z., Torres-Jardón, R., Gerardo Ruiz-Suarez, L., Castro, T., Peralta, O., Saavedra, M. I., Maser, O., Tan Molina, L. y Zavala, M.: Determination of emission factors for climate forcers and air pollutants from improved wood-burning cookstoves in Mexico, *Energy Sustain. Dev.*, 50, 61–68, doi:10.1016/j.esd.2019.02.004, 2019.

Palma Behnke, R., Barría, C., Basoa, K., Benavente, D., Benavides, C., Campos, B., Maza, N. de la, Farías, L., Gallardo, L., García, M. J., Gonzales, L. E., Carrasco, Guarda, F., Guzmán, R., Jofré, A., Mager, J., Martínez, R., Montedónico, M., Morán, L., Muñoz, L., Osses, M., Pica, A., Rojas, M., Rudnick, A., Martín, J. P. S., Santander, A., Silva, C., Tolvet, S., Torres, R., Urquiza, A., Valdivia, P. y Vicuña, S.: Chilean NDC Mitigation Proposal: Methodological Approach and Supporting Ambition. Mitigation and Energy Working Group

Report., Santiago de Chile. [en línea] Available from: <http://www.minciencia.gob.cl/comitecientifico/documentos/mesa-mitigacion-y-energia/14.Mitigation-NDC-White-Paper.pdf>, 2019.

Penman, J., Gytarsky, M., Hiraishi, T., Irving, W. y Krug, T.: 2006 IPCC - Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. [en línea] Available from: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/index.html>, 2006.

Petzold, A., Ogren, J. A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S. M., Baltensperger, U., Holzner-Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A. y Zhang, X. Y.: Recommendations for reporting black carbon measurements, *Atmos. Chem. Phys.*, 13(16), 8365–8379, doi:10.5194/acp-13-8365-2013, 2013.

Phoenix, D., Khodayari, A., Wuebbles, D. y Stewart, K.: Aviation impact on air quality present day and mid-century simulated in the Community Atmosphere Model (CAM), *Atmos. Environ.*, 196, 125–132, doi:<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.10.005>, 2019.

Pichler, P. P., Zwickel, T., Chavez, A., Kretschmer, T., Seddon, J. y Weisz, H.: Reducing Urban Greenhouse Gas Footprints, *Sci. Rep.*, 7(1), 14659, doi:10.1038/s41598-017-15303-x, 2017.

Resquin, M. D., Santágata, D., Gallardo, L., Gómez, D., Rössler, C. y Dawidowski, L.: Local and remote black carbon sources in the Metropolitan Area of Buenos Aires, *Atmos. Environ.*, 182, 105–114, doi:10.1016/j.atmosenv.2018.03.018, 2018.

Romieu, I., Gouveia, N., Cifuentes, L. A., de Leon, A. P., Junger, W., Vera, J., Strappa, V., Hurtado-Díaz, M., Miranda-Soberanis, V., Rojas-Bracho, L., Carbajal-Arroyo, L., Tzintzun-Cervantes, G. y HEI Health Review Committee: Multicity study of air pollution and mortality in Latin America (the ESCALA study)., *Res. Rep. Health. Eff. Inst.*, (171), 5–86 [en línea] Available from: <http://europepmc.org/abstract/MED/23311234>, 2012.

Rowe, P. M., Cordero, R. R., Warren, S. G., Stewart, E., Doherty, S. J., Pankow, A., Schrempf, M., Casassa, G., Carrasco, J., Pizarro, J., MacDonell, S., Damiani, A., Lambert, F., Rondanelli, R., Huneus, N., Fernandez, F. y Neshyba, S.: Black carbon and other light-absorbing impurities in snow in the Chilean Andes, *Sci. Rep.*, 9(1), 4008, doi:10.1038/s41598-019-39312-0, 2019.

Schueftan, A., Sommerhoff, J. y González, A. D.: Firewood demand and energy policy in south-central Chile, *Energy Sustain. Dev.*, 33, 26–35, doi:10.1016/j.esd.2016.04.004, 2016.

SECTRA: Sector Transporte (STEP). Secretaría de Planificación de Transportes, Santiago. [en línea] Available from: <http://www.sectra.gob.cl/biblioteca/detalle1.asp?mf=3236>, 2014.

Shaddick, G., Thomas, M. L., Amini, H., Broday, D., Cohen, A., Frostad, J., Green, A., Gummy, S., Liu, Y., Martin, R. V., Pruss-Ustun, A., Simpson, D., Van Donkelaar, A. y Brauer, M.: Data Integration for the Assessment of Population Exposure to Ambient Air Pollution for Global Burden of Disease Assessment, *Environ. Sci. Technol.*, 52(16), 9069–9078, doi:10.1021/acs.est.8b02864, 2018.

Shindell, D., Borgford-Parnell, N., Brauer, M., Haines, A., Kuylenstierna, J. C. I., Leonard, S. A., Ramanathan, V., Ravishankara, A., Amann, M. y Srivastava, L.: A climate policy pathway for near- and long-term benefits, *Science* (80-. ), 356(6337), 493–494, doi:10.1126/science.aak9521, 2017.

Shindell, D. T.: Evaluation of the absolute regional temperature potential, *Atmos.*

Chem. Phys., 12(17), 7955–7960, doi:10.5194/acp-12-7955-2012, 2012.

Silva, R. A., West, J. J., Lamarque, J. F., Shindell, D. T., Collins, W. J., Faluvegi, G., Folberth, G. A., Horowitz, L. W., Nagashima, T., Naik, V., Rumbold, S. T., Sudo, K., Takemura, T., Bergmann, D., Cameron-Smith, P., Doherty, R. M., Josse, B., MacKenzie, I. A., Stevenson, D. S. y Zeng, G.: Future global mortality from changes in air pollution attributable to climate change, *Nat. Clim. Chang.*, 7(9), 647–651, doi:10.1038/nclimate3354, 2017.

Smith, J. J. y Ahmad, M. T.: Globalization's Vehicle: The Evolution and Future of Emission Regulation in the icao and imo in Comparative Assessment, *Clim. Law*, 8(1–2), 70–103, doi:<https://doi.org/10.1163/18786561-00801003>, 2018.

Smith, P. y Henríquez, C.: Public Spaces as Climate Justice Places? Climate Quality in the City of Chillán, Chile, *Environ. Justice*, 12(4), 164–174, doi:10.1089/env.2018.0041, 2019.

Sofiev, M., Winebrake, J. J., Johansson, L., Carr, E. W., Prank, M., Soares, J., Vira, J., Kouznetsov, R., Jalkanen, J. P. y Corbett, J. J.: Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs, *Nat. Commun.*, 9(1), doi:10.1038/s41467-017-02774-9, 2018.

Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M. M. B., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. y Midgley, P. M.: Climate change 2013 the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change, editado por T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, y P. M. Midgley, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA., 2013.

Sun, K., Tao, L., Miller, D. J., Pan, D., Golston, L. M., Zondlo, M. A., Griffin, R. J., Wallace, H. W., Leong, Y. J., Yang, M. M., Zhang, Y., Mauzerall, D. L. y Zhu, T.: Vehicle Emissions as an Important Urban Ammonia Source in the United States and China, *Environ. Sci. Technol.*, 51(4), 2472–2481, doi:10.1021/acs.est.6b02805, 2017.

Tagle, M., Reyes, F., Vásquez, Y., Carbone, S., Saarikoski, S., Timonen, H., Gramsch, E. y Oyola, P.: Spatiotemporal Variation in Composition of Submicron Particles in Santiago Metropolitan Region, Chile, *Front. Environ. Sci.*, 6, doi:10.3389/fenvs.2018.00027, 2018.

Toro, R. A., Canales, M., Flocchini, R. G., Morales, R. G. E. y Leiva G., M. A.: Urban Atmospheric Ammonia in Santiago City, Chile, *Aerosol Air Qual. Res.*, 14(1), 33–44, doi:10.4209/aaqr.2012.07.0189, 2014.

UNEP y WMO: Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone. Summary for Decision Makers. [en línea] Available from: [http://www.unep.org/publications/contents/pub\\_details\\_search.asp?ID=6201](http://www.unep.org/publications/contents/pub_details_search.asp?ID=6201), 2011.

Vandyck, T., Keramidis, K., Kitous, A., Spadaro, J. V., Van Dingenen, R., Holland, M. y Saveyn, B.: Air quality co-benefits for human health and agriculture counterbalance costs to meet Paris Agreement pledges, *Nat. Commun.*, 9(1), 4939, doi:10.1038/s41467-018-06885-9, 2018.

Wang, X., Heald, C. L., Sedlacek, A. J., de Sá, S. S., Martin, S. T., Alexander, M. L., Watson, T. B., Aiken, A. C., Springston, S. R. y Artaxo, P.: Deriving brown carbon from multiwavelength absorption measurements: method and application to AERONET and Aethalometer observations, *Atmos. Chem. Phys.*, 16(19), 12733–12752, doi:10.5194/acp-16-12733-2016, 2016.

WRI: MRV 101: Understanding Measurement, Reporting, and Verification of Climate Change Mitigation. [en línea] Available from: [https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/MRV\\_101\\_0.pdf](https://wriorg.s3.amazonaws.com/s3fs-public/MRV_101_0.pdf), 2016.

Xie, Y., Dai, H., Xu, X., Fujimori, S., Hasegawa, T., Yi, K., Masui, T. y Kurata, G.: Co-benefits of climate mitigation on air quality and human health in Asian countries, *Environ. Int.*, 119, 309–318, doi:10.1016/j.envint.2018.07.008, 2018.

Yan, J., Wang, X., Gong, P., Wang, C. y Cong, Z.: Review of brown carbon aerosols: Recent progress and perspectives, *Sci. Total Environ.*, 634, 1475–1485, doi:10.1016/j.scitotenv.2018.04.083, 2018.